



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : **Matériaux en Génie Civil**

Présenté par :

1. *Zerig Oussama*
2. *Hamed Saber*

Intitulé :

Étude Innovante sur un Mortier Plasto-Dunaire Antichoc et Imperméable : Comparaison avec le Mortier Traditionnel

Soutenue le : 29 Mai 2025

Devant le jury composé de :

Dr : Abdelhamid Khelifi

Dr : Fouzi Masmoudi

Dr : Tahar Zerig

Dr : Tarek Djedid

Président

Examineur

Encadreur

Co-encadreur

Année académique : 2024/2025

Dédicaces

Celui qui a dit que je suis à il ... l'aura ; Et je suis à il, et si il refuse contre sa volonté, je le lui amènera.

Je l'ai accompli. Aujourd'hui, j'ai embrassé une gloire immense. Le rêve semblait lointain, et le chemin fut semé d'embûches... mais j'y suis parvenu.

Louange à dieu pour le début et la fin ; louange à dieu pour l'amour, les remerciements et la gratitude, grâce à qui j'ai atteint les objectifs les plus élevés.

Je dédie ma mémoire de fin d'étude avec amour à :

*• Les personnes plus chères à mon cœur, mon premier soutien après dieu ﷻ **ma Mère et mon père.***

*• A ceux dont les mains se sont tendues vers moi dans les moments de faiblesse, vers mon cote inébranlable et la sécurité de mon cœur, mes **frères** et mes **sœur**, mes **amis** et a tous mes **collègues** de la spécialité.*

• A tous ceux qui m'ont donné un coup de main de près ou de loin et m'ont aidé.



Remerciements

Tout d'abord je remercie avant tous, Dieu clément et miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage, la patience durant cette étude, et la volonté pour atteindre mes objectifs.

*Nous avons l'honneur de remercier profondément notre directeur de thèse, le Docteur **Tahar ZERIG**, ainsi que le co-directeur, le Docteur **Tarek DJEDID**, envers qui nous restons redevables pour nous avoir inlassablement acceptés, soutenus et accompagnés, tant sur le plan moral que physique, dans les bons comme dans les mauvais moments.*

Nous tenons également à les remercier pour leur disponibilité malgré leurs nombreuses responsabilités, la sagesse de leurs conseils, la confiance qu'ils nous ont accordée, ainsi que la liberté qu'ils nous ont laissée pour prendre des initiatives tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également au responsable du Laboratoire pédagogique de Génie Civil de l'université d'El Oued, au Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des Ressources Énergétiques Sahariennes (LEVRES) de l'université d'El Oued, ainsi qu'au Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS) d'El Oued

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury, le Docteur **Abdelhamid Khelifi** et le Docteur **Fouzi Masoudi**, qui nous feront l'honneur de juger ce travail.*

Notre sincère gratitude va vers tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer mon profond respect à mes collègues de promotion pour tous les bons moments que nous avons partagés à l'université. Un grand merci à toutes celles et ceux qui ont soutenu et évalué ce travail de recherche.

Résumé

Cette étude vise la valorisation et le recyclage de matériaux largement négligés en Algérie, en les intégrant dans la formulation de mortiers plastiques. Dans un contexte où les considérations économiques et environnementales sont devenues incontournables dans le secteur de la construction, l'utilisation de matériaux alternatifs aux granulats naturels ou au ciment apparaît comme une solution durable, contribuant à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des émissions de CO₂.

L'approche adoptée consiste en une substitution progressive du sable de dune (SD) par du filler issu de béton de démolition (FBD), selon des taux de 0 à 40 % (par paliers de 5 %), combinée à l'ajout de granulés plastiques en polyéthylène téréphtalate (GP), de surface comprise entre 4 et 7 mm², à des proportions de 0, 5, 10 et 15 %. Les performances physico-mécaniques des mortiers obtenus ont été évaluées à travers divers essais : étalement, masse volumique à l'état frais, perméabilité, absorption par immersion totale, retrait (Sh), vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV), résistance à la compression, à la flexion et aux chocs.

Les résultats révèlent que les formulations M_{90/10/0} et M_{80/5/15} offrent les meilleures performances mécaniques, tandis que les compositions M_{60/40/0} et M_{80/15/5} se distinguent par leurs propriétés physiques optimales.

Mots clés: Mortier plastique, Sable de dune, Filler de béton, Grain plastique, Caractéristiques physico-mécaniques.

Abstract

This study focuses on the valorization and recycling of largely neglected materials in Algeria by incorporating them into the formulation of plastic mortars. In a context where economic and environmental concerns have become essential in the construction sector, the use of alternative materials to natural aggregates or cement presents a sustainable solution, contributing to the conservation of natural resources and the reduction of CO₂ emissions.

The adopted approach involves the gradual substitution of dune sand (DS) with filler derived from demolished concrete (CCF) at rates ranging from 0% to 40% (in 5% increments), combined with the addition of polyethylene terephthalate (PET) plastic granules (PG), with surface areas between 4 and 7 mm², at varying proportions of 0%, 5%, 10%, and 15%. The physico-mechanical performance of the resulting mortars was evaluated through various tests, including flow, fresh density, permeability, total water absorption, shrinkage (Sh), ultrasonic pulse velocity (UPV), compressive strength, flexural strength, and impact resistance.

The results indicate that the M_{90/10/0} and M_{80/5/15} mixtures exhibit the best mechanical performance, while M_{60/40/0} and M_{80/15/5} stand out for their superior physical properties.

Keywords: Plastic mortar, Dune sand, Concrete filler, Plastic granules, Physico-mechanical properties.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى استعادة وإعادة تدوير المواد المهملة إلى حد كبير في الجزائر، من خلال دمجها في صياغة الملاط البلاستيكي. في سياق أصبحت فيه الاعتبارات الاقتصادية والبيئية ضرورية في قطاع البناء، يبدو أن استخدام المواد البديلة للركام الطبيعي أو الإسمنت يشكل حلاً مستدامًا، يساهم في الحفاظ على الموارد الطبيعية والحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

النهج المتبع يتكون من الاستبدال التدريجي لرمال الكثبان الرملية (SD) بحشو من الخرسانة الهمدم (FBD)، بمعدلات تتراوح من 0 إلى 40% (بزيادات قدرها 5%)، مع إضافة حبيبات بلاستيكية من البولي إيثيلين تيريفثالات (GP)، بمساحة سطح تتراوح بين 4 و 7 مم²، بنسب 0 و 5 و 10 و 15%. تم تقييم الأداء الفيزيائي والميكانيكي للملاط المتحصل عليه من خلال اختبارات مختلفة: الانتشار، الكثافة الطازجة، النفاذية، الامتصاص بالغمر الكلي، الانكماش، سرعة النبضة فوق الصوتية (UPV)، مقاومة الضغط والانحناء والصدمة. وتكشف النتائج أن تركيبات M90/10/0 و M80/5/15 تقدم أفضل أداء ميكانيكي، في حين تتميز تركيبات M60/40/0 و M80/15/5 بخصائصها الفيزيائية المثالية.

الكلمات المفتاحية: ملاط بلاستيكي، رمل الكثبان الرملية، حشو الخرسانة، حبيبات بلاستيكية، لخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

Liste des Abréviations

SD	:	Sable de D une.
FDB	:	Fille de B éton D émolie.
GP	:	Graine P lastique.
PET	:	P olyéthylène T éréphtalate.
Mx/y/z	:	M ortier P lastique, x :% de SD, y :% de FDB, z : GP.
UPV	:	U ltrasonic P ulse V elocity (la vitesse d'impulsion ultrasonique).
Ab	:	Absorption d'eau.
Rc	:	R ésistance de compression.
Rf	:	R ésistance de flexion.
EN	:	Norme E uropéenne.
NF P	:	Norme F rançaises applicable au bâtiment et génie civil .
AFNOR	:	A ssociation F rançaise de N ormalisation .
PNAE-DD	:	P lan N ational d' A ctions pour l' E nvironnement et le D éveloppement D urable.
FEDEP	:	F onds N ational de l' E nvironnement et de dépollution.
DI	:	D échets I nertes
DIB	:	D échets I ndustriels B anals
DIS	:	D échets I ndustriels S péciaux
DD	:	D échets D angereux
ONEDD	:	O bservatoire N ational de l' E nvironnement et du D éveloppement D urable
MEB	:	M icroscopie E lectronique à B alayage
DRX	:	D iffraction par R ayons X
FTIR	:	F ourier T ransform I nfrared S pectroscopy
ASTM	:	A merican S ociety for T esting and M aterials.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Liste des abréviations	vi
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MORTIERS RENFORCÉS PAR DES DÉCHETS PLASTIQUES	
I.1 Introduction	4
I.2 Définition des matériaux cimentaires	4
I.3 Ciment Portland	4
I.3.1 Définition	5
I.3.2 Minéralogie du sable d'El Oued	6
I.3.3 Morphologie et analyse EDX	7
I.3.4 Classification granulaires des sables	8
I.3.5 FTIR et répartition granulométrique du sable d'El'Oued	8
I.3.6 Influence des composants sur les caractéristiques d'un mortier à base SD.	9
I.3.7 Sable de dune une ressource sous-exploitée	10
I.4 Plastiques Polyéthylène Téréphtalate	10
I.4.1 Définition	10
I.4.2 Propriétés mécaniques des composites cimentaires contenant des déchets plastiques	10
I.4.3 Types de plastiques utilisés dans les mortiers	11
I.4.4 Modes d'incorporation de plastique	12
I.4.5 Propriétés mécaniques et physiques des mortiers plastiques	12
I.4.6 Effet du PET sur l'absorption d'eau	13
I.5 Granulats	14
I.5.1 Filler de sable recyclé	14
I.5.2 Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats	14
I.5.3 Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés	15
I.6 Déchets	16
I.6.1 Impact des déchets sur l'environnement	16
I.6.2 Différents types de déchets	17
I.7 Collecte des déchets	23
I.8. Impacts du recyclage sur l'environnement et l'industrie	23
I.9 Conclusion	24

CHAPITRE II :	
CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES	
II.1 Introduction	26
II.2 Matériaux utilisés	27
II.3. Les essais préliminaires sur les granulats	28
II.3.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-2)	28
II.3.2. Module de finesse (Norme NA 2607)	29
II.3.3 Masses volumiques et Absorption d'eau	30
II.4 Protocole d'essai	33
II.4.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai	33
II.4.2 Préparation des échantillons d'essai	34
II.5. Méthodologie expérimentale	35
II.5.1. Caractéristiques à l'état frais	36
II.5.2 Caractéristiques à l'état durci	37
II.6 Conclusion	47
CHAPITRE III :	
ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS	
III. 1 Introduction	49
III.2 Propriétés à l'état frais	49
III.2.1 Ouvrabilité	49
III.2.2 Densité à l'état frais	50
III.3 Propriétés à l'état durci	51
III.3.1 Résistance à la flexion	51
III.3.2 Résistance à la compression	53
III.3.3 Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV)	54
III.3.5 Retrait/ gonflement	56
III.3.6 Permeabilité à l'eau	57
III.3.7 Résistance aux chocs	58
III.4 CONCLUSION	59
Conclusions générales	62
Recommandations	63
Références bibliographiques	64

Liste des Figures

CHAPITRE I

Figure I-1: Étapes de la fabrication du ciment	5
Figure I-2: Les sables des dunes mouvants	6
Figure I-3: Carte de l'Algérie montrant la localisation des dunes de sable dans le quartier d'El-Oued	6
Figure I-4: XRD des échantillons de sable d'El-Oued	7
Figure I-5: Analyses EDX des grains de sable S4 et S5	7
Figure I-6: a) Spectres d'absorption FTIR et b) courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued S1, S2, S3, S4 et S5,	8
Figure I-7: Résistance à la compression à (3, 7 et 28 jours) d'un mortier composé de : (a) sable binaire (CS/RS), (b) sable binaire (CS/DS), et (c) sable ternaire (CS /RS/DS)	9
Figure I-8: Classification des plastiques	11
Figure I-9: Déchets plastiques utilisés.	12
Figure I-10: Absorption d'eau des bétons contenant des granulats fins de PET	13
Figure I-11: Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats	15
Figure I-12: Résultats de la résistance à la compression	15
Figure I-13: Résultats de la résistance à la traction	16
Figure I-14: Compositions des déchets du bâtiment	19
Figure I-15: Composition de base des déchets de démolition (environ)	19
Figure I-16: (a) Déchets de construction et de démolition, (b) Déchets de béton stockés à l'usine de recyclage	21
Figure I-17: Total des déchets générés dans l'Union européenne: (a) l'activité économique (b) catégorie de déchets	22
Figure I-18: L'augmentation de la consommation du plastique en Algérie	23

CHAPITRE II

Figure II-1: Matériaux utilisés pour la formulation des mortiers	27
Figure II-2: Tamiseuse utilisée pour l'essai d'analyse granulométrique	28
Figure II-3: Courbes granulométriques du SD, SA et GP	30
Figure II-4: Mesure de la masse volumique des granulats utilisés	31
Figure II-5: Machine de mesure d'équivalent de sable utilisés	32

Figure II-6 Les essais à l'état frais, (a) l'étalement, (b) la masse volumique	34
Figure II-7 Huilage des moules et nivellement de la surface du mortier.	35
Figure II-8 Conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours de cure	35
Figure II-9 : Equipements tables à secousses et méthode de la mesure de l'étalement.	37
Figure II-10 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique du mortier étudié	38
Figure II-11 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique	40
Figure II-12 : Matériels utilisé pour l'essai de traction par flexion à trois points	41
Figure II-13 : Presse d'essai de compression	42
Figure II-14 : Principe de l'essai de la compression	42
Figure II-15 : Principe expérimental d'absorption d'eau par immersion totale des éprouvettes étudié	43
Figure II-16 : Appareil de mesure de la perméabilité à l'eau sous pression	44
Figure II-17 : Dispositif d'essai pour la mesure de la résistance aux choc	46

CHAPITRE III

Figure III-1 Étalement des mortiers en fonction du pourcentage de substitution du sable de dune par le filler de béton démolé et du taux de grains plastiques.	50
Figure III-2 9 volumique du mortier étudié à l'état frais.	51
Figure III-3 Résistance à la flexion des mortiers étudiés après 28 jours de cure à l'eau.	52
Figure III-4 Résistance à la compression des mortiers étudiés après 28 jours de cure à l'eau.	53
Figure III-5 Vitesse de propagation des ondes ultrasonores (UPV) des mortiers étudiés.	55
Figure III-6 Valeurs d'absorption d'eau par immersion totale des mortiers étudiés.	56
Figure III-7 Effet de l'incorporation de FBD et de GP sur le retrait des mortiers étudiés.	
Figure III-8 Valeurs des coefficients de perméabilité hydraulique (K) des mortiers étudiés.	57
Figure III-9 Résistance aux chocs des mortiers étudiés à 28 jours de cure.	58

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Analyse chimique des échantillons de sable d'El-Oued	8
Tableau I.2 : Caractéristiques et les types des granulats	14
Tableau I.3 : Taux de recyclage en Europe	20

CHAPITRE II

Table II.1 Répartition granulométrique du sable de dune, sable alluvionnaire et les grains de plastique	29
Tableau II.2. Les classifications des sables	30
Tableau II-3 : Masses volumiques des granulats utilisés	31
Tableau II-4 : Absorption d'eau des granulats utilisés	32
Tableau II-5 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable des matériaux utilisés	32
Table II.6 Les différents formulation des mortiers plastique étudiés.	33
Table II.7 Valeurs d'étalement NF EN 1015-6	36
Tableau II- 8 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion	38

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton demeure incontestablement le matériau clé de la construction moderne. Grâce à ses caractéristiques techniques, ses performances économiques et sa capacité d'adaptation, il est devenu le matériau incontournable sur tous les chantiers. À mesure que les exigences de la construction évoluent, en particulier en ce qui concerne les critères thermiques et environnementaux, le béton développe de nouvelles solutions, telles que les bétons biosourcés et écologiques, pour y répondre.

Les bâtiments et ouvrages de génie civil sont principalement réalisés en béton et en mortier, des matériaux faciles à mettre en œuvre grâce à leur plasticité, qui permet de créer diverses formes. Ils sont constitués de granulats (gravier et sable), de ciment, d'eau et parfois d'adjuvants.

Oued Souf est une ville désertique à vocation touristique, située à 650 km au sud-est d'Alger. Son climat est désertique, modéré et froid en hiver, et chaud en été. La région est renommée pour sa grande richesse naturelle, notamment ses dunes de sable siliceux. Ce matériau naturel, extrait des dunes, possède des propriétés distinctives et est largement utilisé dans des domaines variés tels que la construction, la fabrication de verre et la filtration de l'eau.

L'incorporation de fibres dans le béton améliore ses caractéristiques mécaniques, notamment la résistance à la traction, aux chocs, à la fatigue, ainsi que son comportement post-rupture et son homogénéité. Les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans diverses applications, telles que les dallages industriels, la réparation des canalisations d'assainissement, la projection sous voûte dans les tunnels et la réalisation de chaussées d'autoroutes ou chaussées de parkings aéronautique.

Parmi les types de fibres utilisées, on trouve les fibres minérales et les fibres plastiques. Ces dernières sont les plus couramment utilisées récemment en raison de leur amélioration significative des propriétés mécaniques du mortier et du béton. De plus, ce type de fibre est moins coûteux. Les matériaux alternatifs, basés sur le recyclage ou la réutilisation, semblent donc être la solution idéale pour réduire les coûts actuels.

D'autre part, l'accumulation croissante de déchets non biodégradables, de plus en plus difficile à contrôler et occupant une grande portion de l'espace public, a souligné l'intérêt

d'utiliser des granulés plastiques comme alternative au sable dans le mortier, afin d'améliorer certaines de ses propriétés. Ces matériaux dans plusieurs usages, à savoir, des applications dans le domaine de la construction, permettant à la fois, de réduire le cout de fabrication et d'améliorer les performances des composites cimentaires, sans oublier la protection de l'environnement.

De plus, le plastique est aujourd'hui l'un des matériaux les plus recyclés au monde. Grâce aux avancées technologiques, il peut être réintégré dans le cycle de production de manière répétée, tout en conservant ses propriétés essentielles. Cette capacité à être recyclé plusieurs fois en fait un matériau durable et particulièrement adapté pour des applications variées, notamment dans la construction, où il peut servir à la fabrication de bétons et mortiers renforcés par de granulés plastiques sont récupérées des bouteilles d'eau de boisson.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif d'étudier le comportement d'un mortier à base de sable de dune, substitué par du filler de béton démolé, et renforcé par des granulés plastiques. En d'autres termes, il s'agit de développer un mortier à partir de déchets abondants.

Nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des chapitres suivants :

1. Une introduction générale englobant la problématique du sujet, les objectifs envisagés, et mettant en évidence le plan de travail.
2. Dans le premier chapitre, nous présentons synthèse bibliographique complète sur le mortier.
3. Le deuxième chapitre aborde un récapitulatif des descriptions des divers matériaux et méthodes employés dans le cadre du programme expérimental, tout en exposant les procédures d'essai.
4. Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux, relatifs tant à l'état frais qu'à l'état durci, suivie de leur interprétation et analyse

Ce travail se termine par une conclusion générale et des recommandations pour de futures recherches.

CHAPITRE I:

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MORTIERS RENFORCÉS PAR DES DÉCHETS PLASTIQUES

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MORTIERS RENFORCÉS PAR DES DÉCHETS PLASTIQUES

I.1 Introduction

La gestion des déchets plastiques représente un enjeu environnemental crucial à l'échelle mondiale. Pour atténuer leur impact écologique, de nombreuses études ont été consacrées à leur valorisation, en particulier dans le domaine de la construction. L'intégration de plastiques recyclés de divers types dans les matériaux de construction, tels que les mortiers, constitue une approche innovante et durable. Par ailleurs, l'utilisation du sable de dune de la région de Oued Souf comme composant partiel ou total du sable naturel suscite un intérêt croissant, notamment en raison de sa disponibilité abondante dans certaines régions. La combinaison des déchets plastiques et du sable de dune dans la formulation des mortiers offre ainsi une alternative prometteuse, à la fois écologique et économique.

Ces dernières années, l'essor du secteur de la construction a entraîné une forte hausse de la demande en matières premières, alors que les ressources naturelles en granulats deviennent de plus en plus limitées, posant un défi majeur d'approvisionnement. Ce chapitre propose un aperçu des matériaux cimentaires, en s'intéressant aux additifs couramment utilisés, aux travaux de recherche antérieurs, ainsi qu'à la situation spécifique de l'Algérie en matière de production de bétons et mortiers .

I.2 Définition des matériaux cimentaires

Les matériaux cimentaires regroupent un ensemble de substances utilisées dans la construction pour leur capacité à durcir et à adhérer après mélange avec de l'eau. Le ciment, principal liant hydraulique, est obtenu par broyage du clinker, issu de la cuisson d'un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20 %) à haute température (1450–1550 °C). Mélangé à l'eau, il forme une pâte qui lie les agrégats (sable, gravier) pour constituer le béton ou le mortier.

Outre le ciment Portland classique, il existe d'autres variantes (ciments composés, à haut fourneau, pouzzolaniques, blanc, etc.), chacun adapté à des usages spécifiques. Ces matériaux peuvent être associés à des adjuvants ou renforts afin d'en optimiser la résistance, la durabilité ou la maniabilité. Les agrégats, quant à eux, sont des composants minéraux inertes constituant la partie granulaire du béton ou du mortier. Leur granulométrie varie du sable fin au gravier, jouant un rôle déterminant dans les propriétés mécaniques du matériau final.

En somme, les matériaux cimentaires sont au cœur de la construction moderne, offrant des solutions techniques variées pour répondre aux exigences structurelles et environnementales des projets [1].

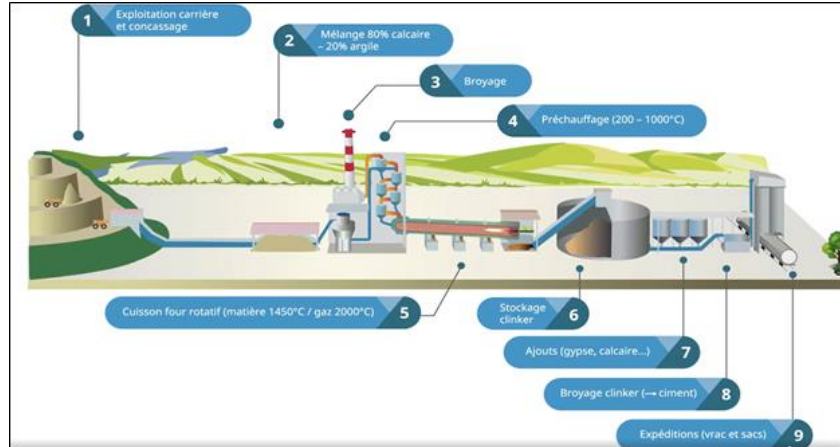


Figure I.1: Étapes de la fabrication du ciment [2].

I.3 Sable de dune

Présentes principalement dans le Sahara — le plus vaste désert chaud au monde — les dunes de sable sont typiques du nord de l’Afrique. Ce sable, utilisé comme composant du squelette granulaire, influence fortement les propriétés mécaniques et physiques du béton et du mortier [3].

I.3.1 Définition

Le sable des dunes mobiles (figure I.2) se compose majoritairement de particules siliceuses fines et uniformes, formées sous l’effet du vent qui en assure le tri, le transport et le dépôt. Ces sables, largement présents dans les régions désertiques comme le sud algérien, forment des dunes de tailles variables. Leur composition minéralogique est dominée par la silice, avec de faibles traces de carbonates et d’argiles. Les silicates, très abondants dans la croûte terrestre, constituent la principale famille minérale de ces sables [4,5].



Figure I.2: Les sables des dunes mouvants.

Le vent joue un rôle majeur dans la formation des sols sableux, en regroupant les particules pour créer des dunes de formes et de tailles variées [6]. Avec le développement des activités de construction en zones arides, il devient essentiel de mieux comprendre les mécanismes d'érosion éolienne, ainsi que la classification et le déplacement de ces sols. Cette connaissance est indispensable pour anticiper leur impact sur les projets d'aménagement. La figure I.3 présente une carte détaillée localisant les dunes de sable dans la région d'Oued Souf, offrant une visualisation claire de leur répartition géographique.

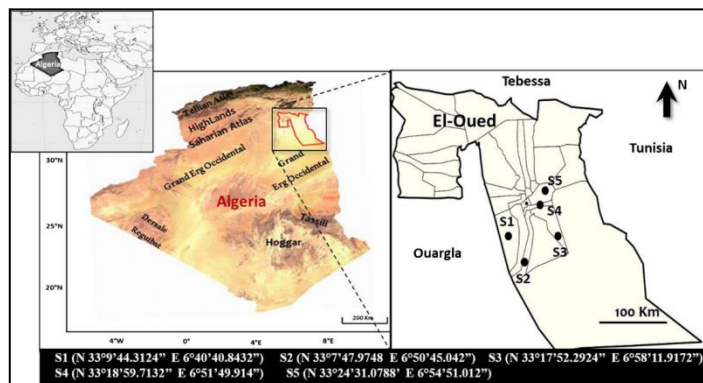


Figure I.3. Carte montrant la localisation des dunes de sable dans la région d'El-Oued [1,7].

Le sable de dune, couvrant plus de 60 % du territoire algérien, suscite un intérêt croissant comme matériau de construction. Des recherches, telles que celles de Wenlong et al. [8], proposent des méthodes de formulation optimales du béton à base de sable de dune via une modélisation statistique, tandis que Sangjun Park et al. [9] soulignent son effet positif sur l'ouvrabilité du béton frais. Face à la pénurie de granulats traditionnels et à leurs impacts environnementaux [10], le sable dunaire, notamment dans le sud algérien, apparaît comme une alternative prometteuse encore sous-exploitée.

I.3.2 Minéralogie du sable d'El Oued [8]

La figure I.4 présente les diffractogrammes XRD des sables S1 à S5 d'El-Oued, révélant une forte cristallinité. L'analyse minéralogique (via X'Pert HighScore et les fiches JCPDS), complétée par l'ajustement de Rietveld, a permis d'identifier et de quantifier les phases cristallines, ainsi que d'estimer des paramètres microstructuraux. Le quartz α (structure P3121) est la phase dominante, atteignant 93,5 % dans S1.

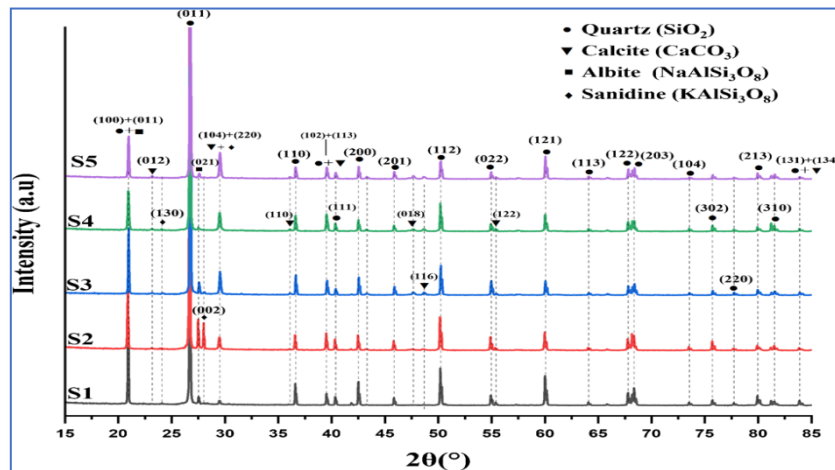


Figure I.4 XRD des échantillons de sable d'El-Oued [1,7].

I.3.3 Morphologie et analyse EDX [7]

L'analyse EDX (figure I.5) montre une prédominance d'oxygène et de silicium, surtout dans S4 et S5, confirmant la forte teneur en silice. Une faible proportion d'aluminium ($\leq 8,7\%$) suggère sa présence dans la matrice quartzique.

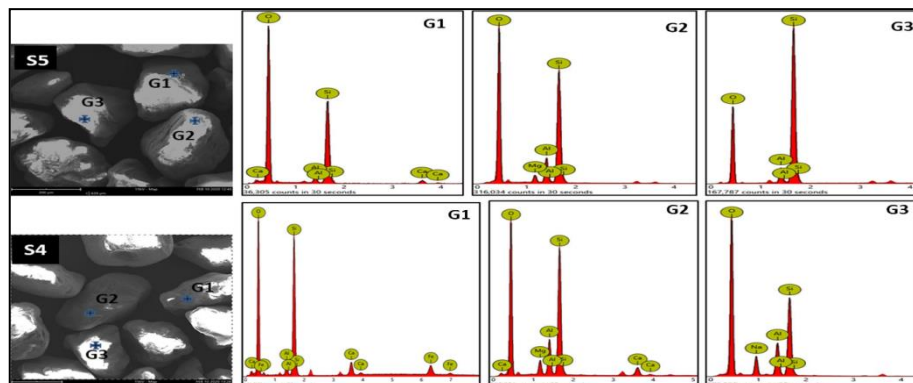


Figure I.5 Analyses EDX des grains de sable S4 et S5 [7].

I.3.4 Classification granulaires des sables

Le tableau I.1 présente la classification des grains de sol selon différents systèmes [11], fondée

sur la taille des particules. Il illustre les catégories reconnues et la subdivision du sable en fonction de leurs dimensions .

Tableau I.1. Classification granulométrique des sols selon le département américain de l'agriculture et la société internationale des sciences du sol [11,12].

	Classification américaine Département américain de l'agriculture (US Department of Agriculture)		Classification internationale Société internationale des sciences du sol (International Society of Soil Science)	
	Types	Diameters des grains (mm)	Types	Diameters des grains (mm)
Sable	Sable très grossier	1-2	Sable grossier	0.2-2
	Sable grossier	0.5-1		
	Sable moyen	0.25-0.5		
	Sable fin	0.1-0.25	Sable fin	0.02-0.2
	Sable très fin	0.063-0.1		
Limon grossier	0.02-0.063			
Limon	Limon fin	0.002-0.02	Limon	0.002-0.02
L'argile	L'argile	<0.002	L'argile	<0.002

I.3.5 FTIR et répartition granulométrique du sable d'El-Oued [7]

Les spectres FTIR des échantillons S1 à S5 (figure I-6a) montrent des bandes typiques de la silice, avec des pics liés aux vibrations Si–O–Si [13–15] . La distribution granulométrique (figure I.6b) présente des courbes sigmoïdes similaires, avec 90 % des grains entre 160 et 400 μm . Les sables S2 et S5 se distinguent par leur qualité supérieure [16–18].

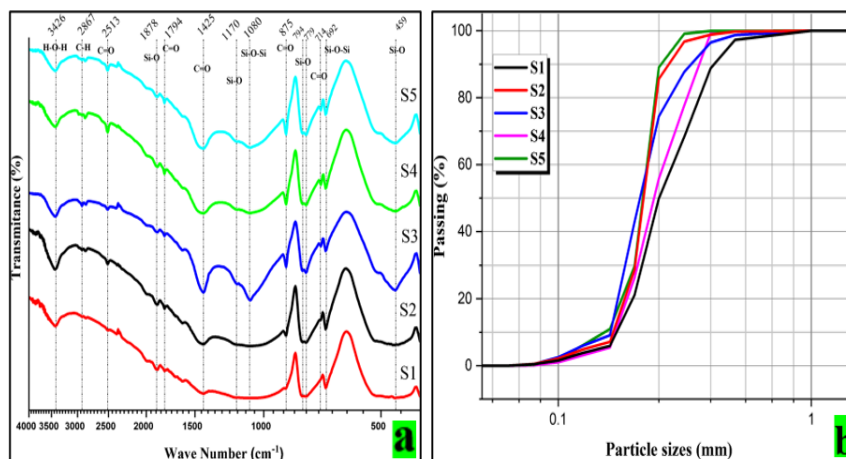


Figure I.6 a) Spectres d'absorption FTIR et b) courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued S1, S2, S3, S4 et S5, [7].

Les analyses du sable d'El-Oued (granulométrie, FTIR, XRF, XRD, SEM/EDX, TG-DTA) révèlent un sable fin, bien trié, siliceux (94,24 %), à grains arrondis et pauvre en impuretés.

Les cristallites de quartz varient de 331 à 3637 nm, avec une stabilité thermique jusqu'à 800 °C. Ce sable convient au béton, à la céramique, à la fonderie et au stockage solaire, mais non à la verrerie, offrant un potentiel pour un développement durable en Algérie [7,19].

I.3.6 Influence des composants sur les caractéristiques d'un mortier à base SD.

La correction granululaire, combinant sable grossier et sable fin, améliore la compacité et les propriétés mécaniques du mélange. Bédérina [10] a montré qu'un rapport RS/DS de 1,7 (sable alluvionnaire/sable de dunes) optimise la compacité. Benchaat et al. [20] ont confirmé que les mortiers issus de ce mélange présentent de meilleures performances mécaniques et une durabilité accrue face aux sulfates, contrairement aux mortiers à base de sable de dunes, plus poreux et sensibles aux agents agressifs.

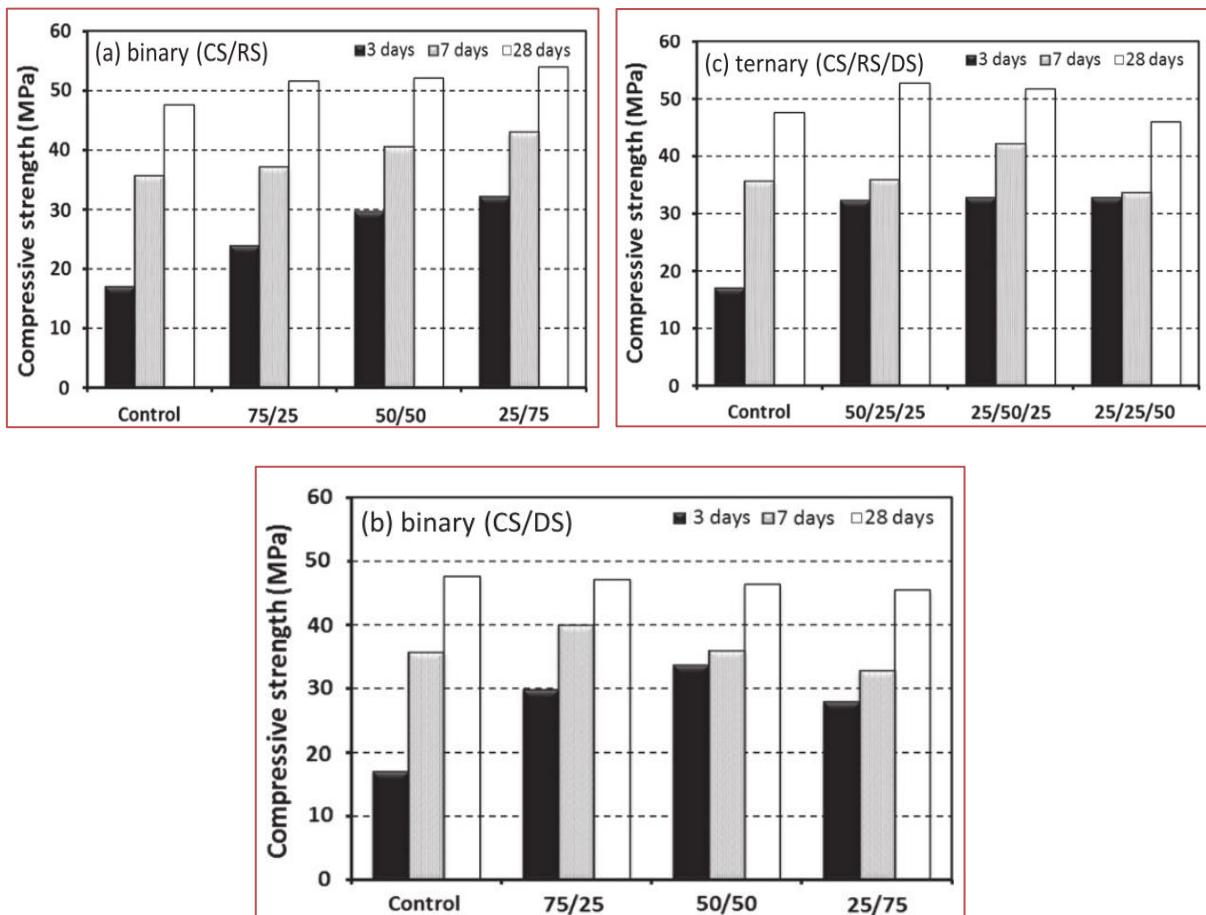


Figure I-7 Résistance à la compression à (3, 7 et 28 jours) d'un mortier composé de : (a) sable binaire (CS/RS), (b) sable binaire (CS/DS), et (c) sable ternaire (CS/RS/DS).

De nombreuses études ont intégré des déchets plastiques comme agrégats dans le béton, en se concentrant surtout sur les propriétés physiques et mécaniques, tout en négligeant souvent les

aspects de durabilité comme la porosité accrue ou la résistance réduite [21]. La dispersion aléatoire des fibres améliore la résistance aux fissures par effet de pontage [22–24]. Pour des mortiers plus durables, diverses fibres recyclées (mousse, acier, polypropylène, nylon) et végétales ont été explorées comme alternatives écologiques [25,26] .

I.3.7 Sable de dune une ressource sous-exploitée:

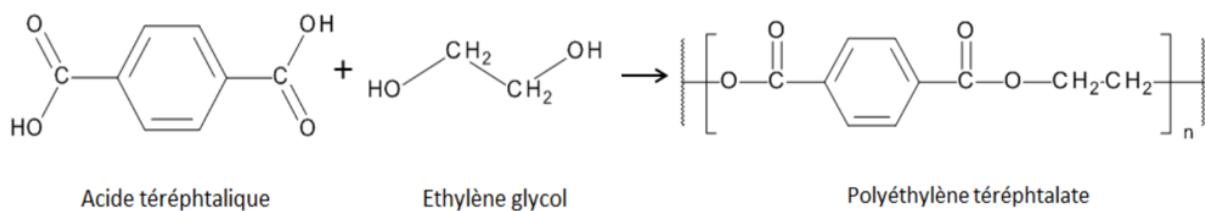
Malgré son abondance, le sable des dunes reste peu exploité en Algérie, notamment à cause du coût élevé des matériaux et du manque de valorisation dans le BTP. Pourtant, il offre un fort potentiel dans la construction, en remplacement du sable de rivière, contribuant à la préservation des ressources [27]. De nombreuses études [28–33] ont montré que son intégration dans les mortiers améliore les propriétés physico-mécaniques des composites. Face à la raréfaction des ressources et à la désertification, la valorisation durable du sable dunaire devient une priorité pour produire des matériaux à moindre coût[34–38] .

I.4 Plastiques Polyéthylène Téréphtalate

I.4.1 Définition

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polymère de synthèse élaboré par la polycondensation de l'éthylène glycol avec l'acide téréphtalique. Principalement employé dans la fabrication de bouteilles, flacons, pots, films, feuilles, fibres, etc., ce plastique fait partie de la famille des thermoplastiques et est recyclable.

Mais la tendance actuelle est de développer leurs applications en tant que matières plastiques techniques pour les industries mécaniques et électriques, en raison de leurs propriétés. La formule développée illustré ci-dessous :



I.4.2 Propriétés mécaniques des composites cimentaires contenant des déchets plastiques

Les déchets plastiques (PW) peuvent partiellement remplacer les granulats fins ou grossiers dans le béton. Leur nature non réactive, ainsi que leur taille, forme et texture, influencent notablement les performances du béton [39], bien que les résultats varient selon les études [40].

Les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des composites de déchets plastiques et de ciment (PWCC) sont résumées comme suit.

L'ajout de déchets plastiques (PWA) dans le béton entraîne une hausse de la teneur en air, une baisse de la maniabilité, de la densité, de la résistance mécanique (compression, flexion, traction) et du module d'élasticité, principalement en raison de leur forme irrégulière, nature hydrophobe et faible adhérence à la matrice cimentaire [39,41]. La vitesse ultrasonique diminue également, signalant une dégradation de la qualité du béton [40,41].

I.4.3 Types de plastiques utilisés dans les mortiers [42]

Les principaux types de plastiques issus des déchets municipaux et industriels utilisés dans les mortiers sont :

- *Polyéthylène Téréphtalate (PET)* : utilisé notamment sous forme de fibres ou granulés.
- *Polypropylène (PP)* : couramment utilisé en fibres pour améliorer la ténacité.
- *Polyéthylène haute ou basse densité (HDPE/LDPE)* : utilisé en granulés ou flocons.
- *Polystyrène expansé (EPS)* : souvent utilisé comme agrégat léger.

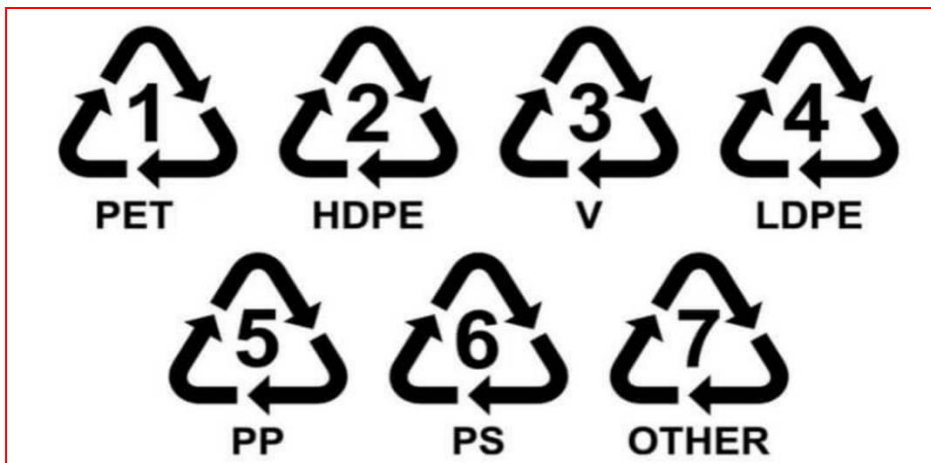


Figure I.8: Classification des plastiques [43].

La figure I.8 illustre la classification des plastiques, identifiable par un code de 1 à 7 dans un symbole triangulaire, facilitant leur tri et valorisation. Selon Khushefati et al. [44], l'usage de matériaux à forte inertie thermique peut réduire la consommation énergétique des bâtiments de 7 à 22 %. La conductivité thermique dépend de divers facteurs (agrégats, additifs, fibres, porosité, etc.). Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, améliorer la performance énergétique et réduire l'impact environnemental des matériaux est essentiel [1,45].



Figure I.9: Déchets plastiques utilisés.

I.4.4 Modes d'incorporation de plastique

La figure I.9 illustre les déchets plastiques peuvent être incorporés dans le mortier de plusieurs façons :

- ✓ En tant que substitut aux granulats (sable) : plastiques broyés ou granulés.
- ✓ Sous forme de fibres : pour améliorer la résistance à la fissuration.
- ✓ Comme additif chimique ou modificateur de rhéologie, bien que plus rare.

I.4.5 Propriétés mécaniques et physiques des mortiers plastiques

I.4.5.1 Résistance à la compression

- ✓ Généralement diminuée avec l'augmentation de la teneur en plastique.
- ✓ Le plastique, étant moins rigide que les granulats minéraux, réduit la capacité portante du matériau.

I.4.5.2 Résistance à la traction/flexion

- ✓ Améliorée dans certains cas, surtout avec l'ajout de fibres (PET, PP).
- ✓ Les fibres plastiques réduisent la propagation des fissures.

I.4.5.3 Densité

- ✓ Réduction significative avec l'utilisation de plastiques légers (EPS, PET broyé).
- ✓ Idéal pour les applications de mortiers légers ou isolants.

I.4.5.4 Conductivité thermique

- ✓ Les plastiques ont une faible conductivité, ce qui améliore l'isolation thermique des mortiers.

I.4.5.5 Durabilité et comportement environnemental [42]

- ✓ Les plastiques sont résistants à l'eau et aux produits chimiques, ce qui peut améliorer la durabilité du mortier.
- ✓ Toutefois, des études soulignent un risque de mauvaise adhérence entre les plastiques et la matrice cimentaire, pouvant affecter la cohésion.
- ✓ D'un point de vue environnemental, ces mortiers permettent une valorisation efficace des déchets plastiques, réduisant ainsi leur présence dans les décharges.

I.4.6 Effet du PET sur l'absorption d'eau

L'absorption d'eau, indicateur clé de la durabilité du béton, reflète sa porosité. Une absorption élevée signale une porosité accrue et une plus grande vulnérabilité aux agents agressifs. Il est donc crucial d'évaluer cette propriété dans les composites cimentaires à base de déchets plastiques pour garantir leur durabilité [39].

L'absorption d'eau augmente généralement avec l'ajout de déchets PET dans le béton, en raison de leur forme allongée et de l'hétérogénéité du mélange [42,46–50]. Une plus grande taille de PET et un rapport eau/ciment élevé accentuent cette absorption [56]. Des flocons fins de PET accroissent l'absorption dès 10 % de substitution, tandis que les palettes n'ont pas d'effet notable jusqu'à 15 % [54,56]. Une cure en milieu humide peut toutefois réduire cette absorption en améliorant la microstructure [56]. Marzouk et al. [51] notent aussi un gain de durabilité contre les agents agressifs.

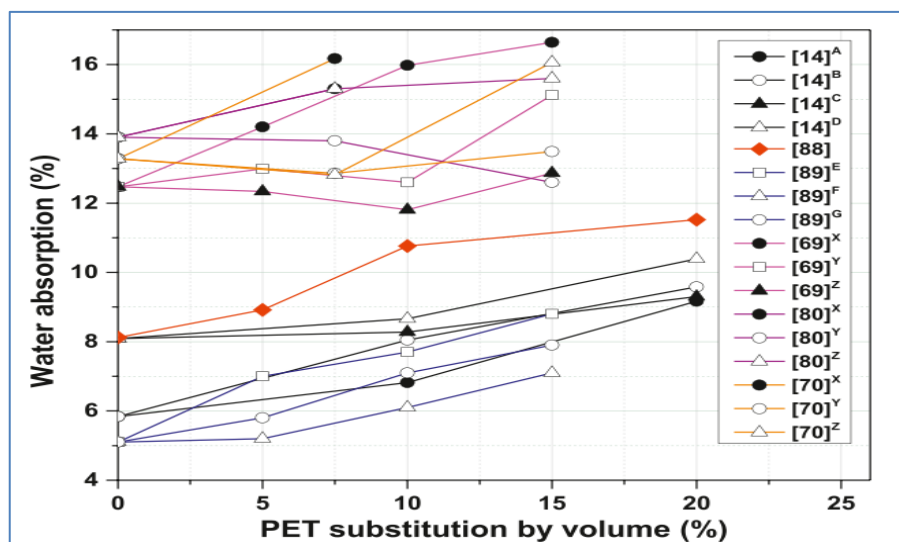


Figure I-10 Absorption d'eau des bétons contenant des granulats fins de PET [42,46–49].

I.5 Granulats :

Les granulats, fragments de roche <125 mm (sables, graviers), forment 80 % du poids du béton et en assurent la structure. Leur qualité est essentielle pour un usage en construction. Ils sont classés en six familles selon leur taille (tableau I.2).

Tableau I.2. Caractéristiques et les types des granulats [4].

Familles	Caractéristiques
Fillers	$D < 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	$D \leq 1$ mm avec moins de 10% de passant à 0,063 mm
Sables	$0 \text{ mm} < D \leq 4\text{mm}$
Graves	$D < 6,3$ mm
Gravillons	$d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 63$ mm
Ballasts	$d \geq 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

I.5.1 Filler de sable recyclé :

Le filler de sable recyclé est une fine fraction minérale issue du traitement et du concassage de sables ou déchets de construction, souvent récupérés sur des chantiers ou provenant de matériaux en fin de vie. Utilisé comme addition minérale dans les bétons et mortiers, ce matériau contribue à améliorer la compacité, la résistance et la durabilité, tout en favorisant l'économie circulaire et la valorisation des déchets dans le secteur du bâtiment.

I.5.2 Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats [52]

Des tests selon la norme NBR NM 53 ont montré que le nettoyage autogène des granulats recyclés réduit l'absorption d'eau, surtout après 15 min. Le mortier résiduel est le facteur clé. L'absorption diminue de 50 % pour Brita 0 et 20 % pour Brita 1 (Figure I-11a) [53][54].

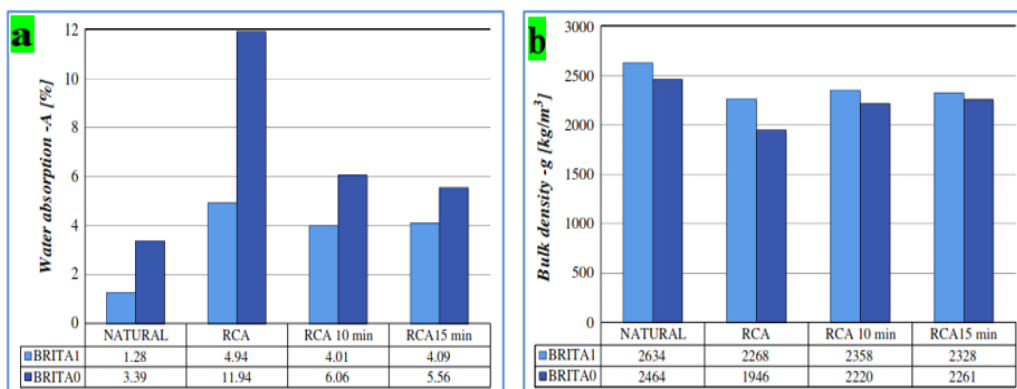


Figure I-11 Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats [52].

Les mesures de densité apparente (Figure I-11b) confirment l'efficacité du nettoyage autogène à transformer les débris de béton en granulats recyclés propres. Selon Naël-Redolfi [55], contrôler l'absorption d'eau et la microstructure est crucial pour anticiper le comportement des bétons recyclés. Toutefois, le sable recyclé, riche en mortier concassé, est peu utilisé en raison de la difficulté à évaluer son absorption selon les normes actuelles, à cause de sa surface rugueuse [56].

I.5.3 Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés

I.5.3.1 Résistance à la compression et à la traction

La résistance à la compression a été mesurée à 2, 7, 14, 28 et 60 jours selon la norme NF EN 12390-4 [57]. À 28 jours, le béton témoin (REF) atteint 33 MPa et 37 MPa à 60 jours. Le béton recyclé (RAC) affiche une baisse d'environ 20 %, due à une absorption d'eau accrue. Le nettoyage autogène améliore les performances : la réduction de résistance tombe à 8,9 % pour le mélange RAC CL.

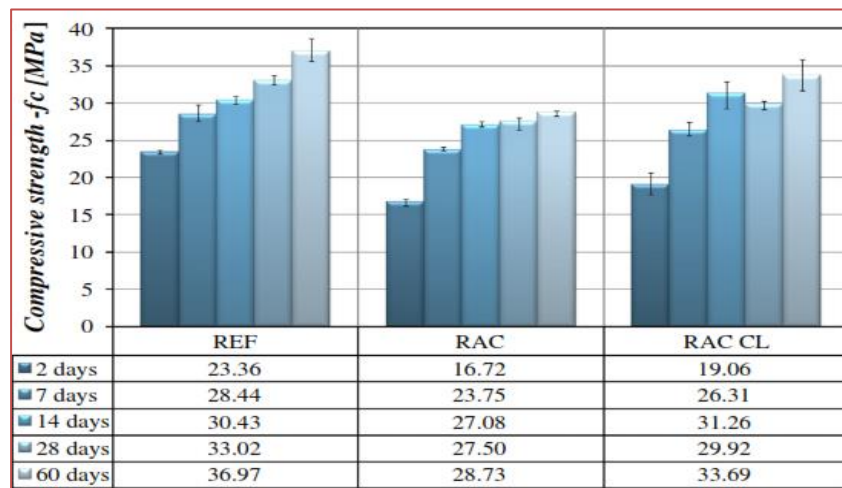


Figure I-12 Résultats de la résistance à la compression [52]

Après 28 jours de cure, la résistance à la traction diminue d'environ 13 % avec des granulats recyclés non nettoyés. Le nettoyage autogène améliore cette résistance et réduit la dispersion des résultats à moins de 4 % (Figure I-12) [40].

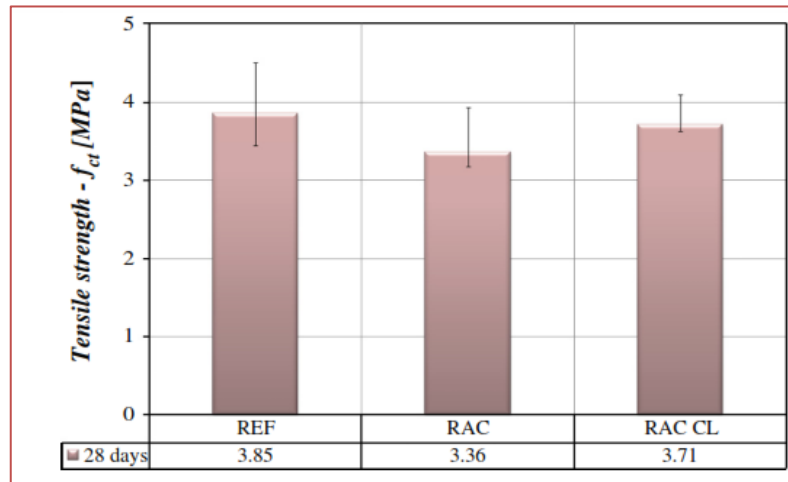


Figure I-13 Résultats de la résistance à la traction [52].

les résultats obtenus en termes de résistance à la compression uni-axiale et de résistance à la traction ont montré un effet positif du nettoyage autogène pour les échantillons des granulats recyclés testés dans ce programme expérimental (voir **Figures I-13**) [52].

I.5 Déchets [1]

Les déchets sont des substances, matériaux ou produits dont le détenteur se défait, à l'intention ou l'obligation de se défaire. Ils peuvent être solides, liquides ou gazeux, dangereux ou non, et proviennent de diverses sources (ménages, industries, etc.). Leur gestion, essentielle pour limiter les impacts environnementaux et sanitaires, est aujourd'hui une priorité mondiale. Face à la raréfaction des décharges et à l'augmentation des coûts, la valorisation des déchets s'impose comme une alternative durable [58].

I.5.1 Impact des déchets sur l'environnement

L'impact environnemental des déchets englobe divers aspects qui peuvent avoir des conséquences sur l'écosystème, la biodiversité, la qualité de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que sur la santé humaine.

Voici quelques-uns des principaux impacts environnementaux associés aux déchets :

I.5.1.1 Pollution de l'eau : Certains déchets peuvent contaminer les sources d'eau, entraînant une pollution des rivières, des lacs et des nappes phréatiques. Les produits chimiques provenant des déchets peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la qualité de l'eau potable.

I.5.1.2 Pollution de l'air : La combustion de déchets, en particulier celle des déchets plastiques, peut libérer des substances toxiques dans l'air. Cela peut contribuer à la pollution de l'air et avoir des effets sur la qualité de l'air, avec des implications pour la santé respiratoire.

I.5.1.3 Altération des sols : Les décharges non contrôlées peuvent entraîner une dégradation des sols, affectant leur fertilité et leur capacité à soutenir la végétation. Les déchets industriels peuvent également contenir des substances nocives qui polluent les sols.

I.5.1.4 Émissions de gaz à effet de serre : Certains déchets, en particulier ceux qui se décomposent organiquement, produisent des gaz à effet de serre lors de leur décomposition. Cela contribue au réchauffement climatique.

I.5.1.5 Impacts sur la faune et la flore : L'accumulation de déchets peut dégrader les habitats naturels, entraînant une perte de biodiversité. Certains animaux peuvent également être affectés par l'ingestion de déchets.

I.5.1.6 Problèmes de gestion des déchets : Une gestion inadéquate des déchets, telle que l'absence de tri sélectif, peut conduire à une surcharge des décharges, à des incinérations non contrôlées et à d'autres pratiques nuisibles à l'environnement.

I.5.1.7 Ressources épuisées : La production de biens consomme des ressources naturelles. La gestion inadéquate des déchets peut entraîner une utilisation inefficace de ces ressources et contribuer à l'épuisement des matières premières.

Comprendre et atténuer ces impacts environnementaux nécessite une approche globale de la gestion des déchets, axée sur la réduction à la source, le recyclage, la réutilisation et d'autres pratiques durables.

I.5.2 Différents types de déchets

I.5.2.1 Déchets ultimes :

Tout déchet ménager et assimilé brut résultant du ramassage parallèle à la collecte sélective, du refus de tri, des déchets industriels banals générés par les ménages et les déchetteries, ainsi que des boues provenant des stations d'épuration.

I.5.2.2 Déchets inertes :

Déchet inaltéré par des modifications physiques, chimiques ou biologiques significatives ; il ne se décompose pas, ne brûle pas et n'entraîne aucune réaction physique ou chimique. Ces déchets ne sont pas biodégradables, n'altèrent pas d'autres matières au contact, ce qui pourrait causer une pollution environnementale ou nuire à la santé humaine. Ils sont autorisés dans les installations de stockage et proviennent principalement des chantiers de construction, des travaux publics et des industries de fabrication de matériaux de construction, tels que le béton, les tuiles, les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres et les enrobés bitumineux.

I.5.2.3 Déchets assimilés :

Les déchets ménagers et assimilés englobent les ordures ménagères (OM) générées par les ménages ainsi que tous les déchets traités comme tels par les autorités locales (tels que les déchets des artisans ou commerçants).

I.5.2.4 Déchets verts :

Déchets végétaux issus des parcs et jardins, comprenant notamment le gazon et les branchages.

I.5.2.5 Déchets organiques (DO):

Les déchets organiques, d'origine biologique (restes alimentaires, déchets de jardin, résidus végétaux, etc.), sont riches en matière carbonée. Recyclables par compostage ou méthanisation, ils permettent la production de compost ou de biogaz. Leur gestion appropriée réduit le volume de déchets en décharge et favorise des pratiques environnementales durables.

I.5.2.6 Déchets industriels banals (DIB) :

Les déchets industriels banals (DIB), issus des activités industrielles non dangereuses, incluent papier, plastique, verre, métaux, bois, etc. Contrairement aux déchets spéciaux, ils ne nécessitent pas de traitement particulier et peuvent être gérés par tri, recyclage ou mise en décharge contrôlée.

I.5.2.7 Déchets dangereux (DD):

I.5.2.7.1 Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets sont répertoriés en raison de leurs propriétés dangereuses, par exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; issus de l'industrie pétrolière, etc.

I.5.2.7.2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Il s'agit des déchets à risque présents dans les déchets ménagers, comprenant des éléments tels que les aérosols, colles, détergents, détachants, insecticides, peintures, piles, tubes néon, et produits de nettoyage. Ces déchets sont également qualifiés de DTQS, c'est-à-dire des déchets toxiques en quantité dispersée.

I.5.2.8 Déchets de la construction (démolition):

La démolition d'ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction génèrent des déchets solides, dont le stockage contribue à la pollution environnementale. Les granulats recyclés issus de ces déchets comprennent divers résidus (bois, emballages, produits chimiques, etc.) provenant des processus de construction. Classés comme déchets industriels, ils se distinguent des déchets urbains et agroalimentaires. Quatre grandes catégories, illustrées dans la Figure I.14, permettent de les classer.

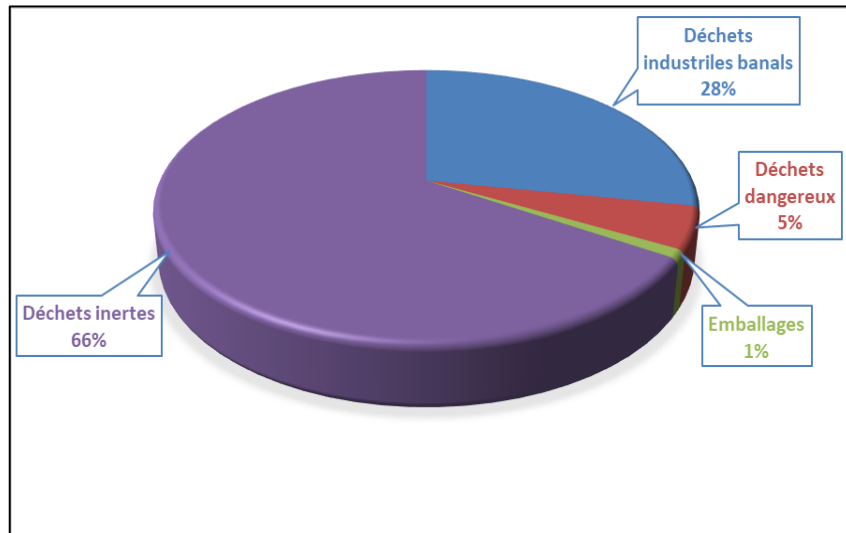


Figure I-14 Compositions des déchets du bâtiment [59].

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets. En effet, la composition estimative des déchets de démolition est illustrée à la **figure I-15** [60].

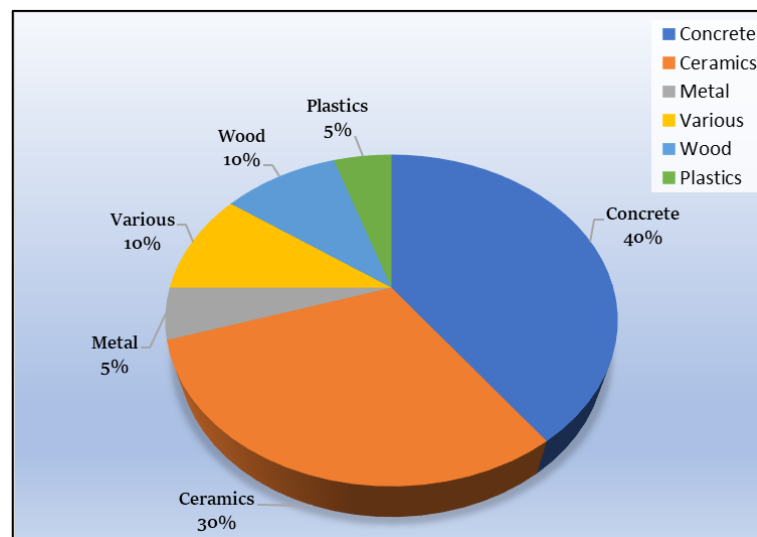


Figure I-15 Composition de base des déchets de démolition (environ) [60].

En Algérie, la valeur économique des déchets a connu une progression notable, atteignant 207 milliards de dinars en 2023, selon le système national de gestion des déchets [4]. Cette croissance traduit la transformation d'un enjeu environnemental en une opportunité économique. En comparaison, la valeur marchande des déchets s'élevait à 151 milliards de dinars en 2021, contre 92 milliards en 2020.

Toutefois, seuls 10 % des 36 millions de tonnes de déchets collectés annuellement sont recyclés, révélant un important potentiel encore inexploité malgré l'intérêt croissant pour ce secteur.[61].

I.5.2.9 Déchet de béton :

Les déchets de béton, issus de la démolition, de la construction ou de la rénovation d'ouvrages (bâtiments, routes, ponts, etc.), se présentent sous forme de fragments ou gravats. Leur recyclage, en tant qu'agrégats pour la fabrication de nouveaux bétons, constitue une solution pertinente pour réduire l'impact environnemental du secteur du BTP et préserver les ressources naturelles [62–65]. Malgré leur disponibilité abondante, les granulats recyclés issus de béton de ciment demeurent sous-exploités, et les recherches sur les performances des bétons recyclés restent limitées. Pour garantir une résistance mécanique et une durabilité adéquates, la formulation de ces bétons nécessite le respect de critères stricts : granulats de qualité, maîtrise du rapport eau/ciment, et incorporation d'air pour résister aux cycles gel/dégel. Chaque année, d'importantes quantités de déchets de démolition sont générées [66,67].

Selon Québaud M. [68], les bétons fabriqués avec des granulats de béton recyclé présentent des propriétés spécifiques, distinctes de celles des bétons traditionnels.

- ✓ Des résistances à la compression et à la traction inférieures d'environ 10 à 30 %;
- ✓ Des retraits plus élevés de l'ordre de 50 à 100 %;
- ✓ Des modules élastiques inférieurs d'environ 15 à 40 %;
- ✓ Une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et le granulats.

La qualité des granulats, essentielle à la performance du béton, influence directement sa résistance mécanique. Dans ce contexte, l'utilisation de granulats recyclés de haute qualité est primordiale pour préserver les propriétés du béton. Aujourd'hui, la valorisation des déchets de démolition dépasse le stade expérimental et connaît un essor significatif. Le tableau I-3 présente les taux de recyclage enregistrés dans plusieurs pays européens en 1992.

Tableau I-3 Taux de recyclage en Europe [69].

Pays	Déchets de démolition en million de tonnes par an	Matériaux recyclés en millions de tonne par an	Pourcentage de recyclage par rapport à la production de déchets	Pourcentage de recyclage par rapport à la production des granulats naturels
Pays-Bas	12.2	8.5	73	2.6
Royaume-Uni	24	11	45.8	3.8
Allemagne	58	14.9	34.6	3.6
Belgique	7.5	2.2	29	5.8
Danemark	5	1.25	25	4.25
France	25	3	13	0.75
Espagne	13.5	0.5	3.7	0.2
Total	14.5	42	moyenne = 31	21

Malgré sa forme angulaire et sa texture rugueuse [70–73], le sable recyclé de démolition présente un retrait endogène important, lié à sa forte demande en eau pour atteindre une plastification adéquate [33,74,75]. Plusieurs chercheurs [72,76–78] reconnaissent néanmoins ses qualités dans la fabrication de matériaux cimentaires, soulignant son potentiel comme

ressource durable en construction. Selon de Andrade Salgado F. et al., la composition des déchets de construction et de démolition (CDW) varie selon les techniques et matériaux utilisés, mais reste majoritairement composée de béton, mortier et céramique rouge, représentant plus de 70 % en poids [79,80]. La figure II-3 illustre un amas de CDW et de béton à l'usine Reciclax de Ribeirao Preto, au Brésil. La classification des CDW comme suit :

- Classe A : brique, carrelage, parquet, mortier et béton ;
- Classe B : plastique, verre, carton, papier, bois et métal ;
- Classe C : matériaux pour lesquels aucune technique de recyclage économiquement réalisable (par exemple, le gypse) ;
- Classe D : déchets dangereux (par exemple, solvants, huiles, peintures et matériaux contenant de l'amiante).



Figure I-16 (a) Déchets de construction et de démolition, (b) Déchets de béton stockés à l'usine de recyclage [80].

Néanmoins, le béton concassé et la maçonnerie concassée constituent le principal matériau CDW pouvant être transformé en différents types de granulats recyclés, comme décrit ci-dessous [81]:

- Granulats de Béton Recyclé (RCA) : constitués d'un minimum de 90 % en poids de fragments à base de ciment Portland.
- Granulats de Maçonnerie Recyclés (RMA) : constitués d'un minimum de 90 % en poids de briques céramiques, de tuiles et d'enduits de mortier.
- Les Granulats Mixtes Recyclés (MRA) sont constitués de matériaux à base de maçonnerie et de fragments à base de ciment Portland, ces derniers représentant moins de 90 % en masse.

En 2010, les secteurs de la construction et de l'exploitation minière ont surpassé tous les autres secteurs économiques en termes de production de déchets (**Fig. I-17a**). Parmi ces déchets provenant des activités de construction, de démolition, d'exploitation minière et de carrière, 97 % étaient des déchets minéraux ou des sols, tels que terres excavées, déchets de construction routière, déchets de démolition, déblais de dragage, stériles, résidus, etc. La part des déchets minéraux et solidifiés par rapport à la quantité totale de déchets était de 76 % (**Fig. I-17b**) [81].

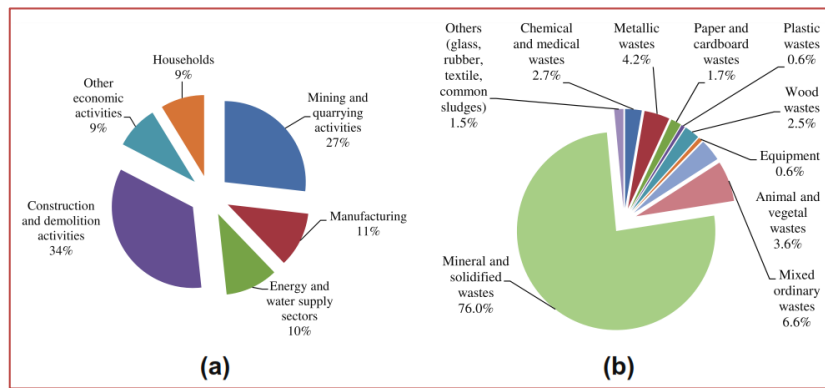


Figure I-17 Total des déchets générés dans l'Union européenne:
(a) l'activité économique ; (b) catégorie de déchets [81].

I.5.2.10 Déchet plastiques:

Les déchets plastiques sont des déchets solides composés principalement de matières plastiques. Ces déchets sont issus de diverses sources, notamment les emballages, les produits de consommation, les équipements électroniques, etc. Les déchets plastiques posent des défis environnementaux en raison de leur durée de décomposition élevée et de leur impact potentiel sur les écosystèmes. Le recyclage des déchets plastiques est une stratégie visant à réduire leur impact environnemental en les réutilisant dans la fabrication de nouveaux produits.

I.5.2.11 Consommation des plastiques en Algérie:

Selon les chiffres du Centre National de l'Informatique et des Statistiques (CNIS), l'Algérie a importé près de 203 milliards de dollars d'intrants pour l'industrie de plastique en 2017, contre 1.9 milliards de dollars en 2016 et 1.7 milliards en 2015 [82,83].

En termes de consommation de cette matière, une augmentation de 11% par an a été enregistrée durant ces dix dernières années, passant d'un usage de 10 kg par habitant en 2007 à 23kg en 2017, avec une estimation de 25.8 kg en 2020, 60% de cette consommation est consacrée aux emballages, 20% au secteur du bâtiment et de la construction et le reste à d'autres industries. La figure I-18 illustre l'évolution de la consommation de plastique en Algérie, exprimée en kilogrammes par habitant, pour les années 2007, 2017 et 2020.

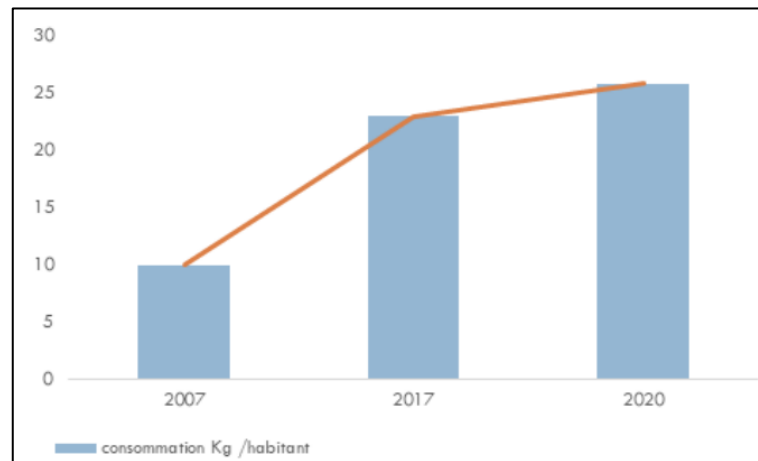


Figure I-18 L'augmentation de la consommation du plastique en Algérie [82].

I.6 Collecte des déchets:

La collecte des déchets constitue une étape clé de la gestion des déchets. Elle consiste à ramasser régulièrement les déchets solides issus des ménages, entreprises et autres sources, par le biais de services municipaux ou d'organismes spécialisés. Son objectif principal est d'acheminer ces déchets vers des installations de traitement appropriées (centres de recyclage, décharges sanitaires, etc.). Ce processus contribue à prévenir la pollution environnementale et à promouvoir une gestion durable des déchets.

I.7. Impacts du recyclage sur l'environnement et l'industrie

Le recyclage réduit les déchets solides, préserve les ressources naturelles, consomme moins d'énergie que la production de matériaux neufs et diminue les émissions de gaz à effet de serre. Il soutient l'économie circulaire, crée des emplois, et encourage des pratiques industrielles durables. Il constitue ainsi un levier stratégique pour conjuguer performance environnementale et développement économique responsable.

I.8 Conclusion

Les mortiers renforcés par des déchets plastiques offrent un potentiel intéressant pour la construction durable. Malgré certaines limites, notamment mécaniques, leur emploi permet de répondre à des enjeux environnementaux tout en ouvrant de nouvelles voies pour le recyclage des plastiques. Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires pour assurer leur généralisation à grande échelle.

L'examen de la littérature met en évidence le potentiel d'intégration de matériaux alternatifs dans la formulation du mortier, notamment le sable de dune, le filler de béton démolé et les granulats plastiques. Le sable de dune, bien que fin et faiblement angulaire, peut être valorisé moyennant un contrôle rigoureux de la granulométrie et de la composition, afin de limiter les effets négatifs sur la compacité et la résistance mécanique du mortier. Le filler de béton démolé, riche en fines minérales, contribue à la réactivité pouzzolanique et à la densification de la matrice cimentaire, tout en réduisant l'impact environnemental lié à l'enfouissement des déchets de construction. Les granulats plastiques, quant à eux, offrent une solution innovante pour la valorisation des déchets polymériques, bien qu'ils induisent généralement une diminution des performances mécaniques, compensée partiellement par une meilleure légèreté et durabilité vis-à-vis des agressions chimiques.

Ainsi, la combinaison rationnelle de ces trois composantes secondaires ouvre des perspectives prometteuses pour la production de mortiers plus durables, économiques et écologiquement responsables, à condition d'optimiser les proportions et les traitements de surface des matériaux recyclés.

CHAPITRE II :

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1 Introduction

L'utilisation rationnelle de matériaux récupérés en vue de leur réemploi dans le domaine de la construction nécessite une compréhension approfondie de leurs propriétés fondamentales — notamment mécaniques, physiques, chimiques et minéralogiques — afin de déterminer leur aptitude à de nouveaux usages.

L'objectif principal de ce travail est de valoriser la richesse considérable du sable de dune de la région de Oued Souf, en le substituant à d'autres types de sable couramment utilisés en construction, tels que les sables alluvionnaires. Parallèlement, cette recherche vise à contribuer à la transformation des déchets de béton en filler très fin, ainsi qu'à la valorisation des déchets plastiques pour la production de granulés plastiques.

L'ensemble de ces démarches s'inscrit dans une perspective de développement d'un **mortier plastique**, destiné à des ouvrages spécifiques. Pour concrétiser cette approche, un programme pilote a été élaboré, dont les principales étapes sont présentées ci-après.

Dans la première partie de ce chapitre, nous exposons la caractérisation des matériaux de base nécessaires à la fabrication du mortier plastique : le ciment, le sable de dune, le filler issu de béton démolé, l'eau de gâchage, ainsi que les déchets plastiques recyclés.

Dans la seconde partie, nous détaillons les méthodes et procédures utilisées pour caractériser le mortier, tant à l'état frais qu'à l'état durci, en mettant en évidence plusieurs indicateurs de performance.

À l'état frais, les propriétés évaluées incluent la consistance (l'étalement et la densité).

À l'état durci, les essais portent sur :

- les performances mécaniques (résistance à la compression, à la flexion, et vitesse de propagation des ondes ultrasonores),
- le retrait dimensionnel,
- l'absorption d'eau par immersion totale,
- la perméabilité à l'eau,
- et la résistance aux chocs.

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire pédagogique du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université Hamma Lakhdar (Algérie),
- Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS) à El Oued (Algérie).

II.2 Matériaux utilisés

Dans le cadre de cette étude, le mortier a été élaboré à partir de matériaux locaux délaissés et largement disponibles, soigneusement sélectionnés pour leur accessibilité et leur abondance dans la wilaya d'El-Oued. Le choix de ces matériaux s'inscrit dans une démarche visant à valoriser les ressources locales, tout en assurant la reproductibilité du travail dans un contexte régional. Afin de garantir la pertinence de leur utilisation, une caractérisation physico-mécanique complète a été réalisée à travers des essais expérimentaux. Ces essais ont permis de déterminer les propriétés fondamentales des composants du mortier, en lien avec les performances attendues. Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont présentés dans la figure II.1 sont:

- **Sable de dune (0/2 mm)** : sable roulé provenant de la région d'El-Oued.
- **Sable alluvionnaire (0/5 mm)** : sable roulé issu de la région de la commune de Djamaa.
- **Filler de béton démolé (0/0,08 mm)** : produit à partir de déchets de béton démolir.
- **Ciment CEM I 42,5N-SR3** : fourni par la cimenterie LAFARGE à Alger.
- **Eau de gâchage** : eau potable de la région Bayadha.
- **Grain plastiques** : récupérées à partir de déchets de bouteilles de boissons gazeuses.



Figure II.1. Matériaux utilisés pour la formulation des mortier.

II.3. Les essais préliminaires sur les granulats

Les granulats représentent un constituant essentiel dans la composition du mortier, influençant directement ses propriétés mécaniques, physiques et sa durabilité. Afin d'assurer la qualité et la conformité des matériaux utilisés, des essais préliminaires ont été réalisés sur les différents types de granulats retenus pour cette étude, à savoir le sable de dune, le sable alluvionnaire et le filler issu de béton recyclé.

Ces essais ont pour objectif de déterminer les principales caractéristiques physiques des granulats, telles que la granulométrie, la masse volumique apparente et l'absolu, équivalant de sable, la teneur en fines et l'humidité..... Les résultats obtenus permettent non seulement d'évaluer la conformité des matériaux aux normes en vigueur, mais aussi d'orienter la formulation du mortier en fonction des performances recherchées.

II.3.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-2 [84])

Le tracé de la courbe granulométrique des granulats est une étape indispensable pour l'étude de la composition du mortier, en vue d'optimiser ses propriétés telles que la maniabilité, l'étanchéité, la résistance mécanique, le faible retrait et la durabilité.... etc

II.3.1.1. Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner un matériau à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit ; et faire peser le refus dans chaque tamis.



Figure II.2. Tamiseuse utilisée pour l'essai d'analyse granulométrique.

II.3.1.2. Description de l'essai :

On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du fond de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un

couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis. Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différents granulats sont présentés dans les tableaux Tableau II-1.

Table II.1 Répartition granulométrique du sable de dune, sable alluvionnaire et les grains de plastique.

Diamètre des Tamis (mm)	Tamisâtes cumulés (%)			
	Type de sable	Sable de dune (SD)	Sable alluvionnaire (SA)	Grains plastique (GP)
8		100	100	100
6.3		100	99.46	97
5		100	98.99	82.46
4		100	98.46	50.67
3.15		100	98	19.12
2.5		100	97.92	10.06
2		99.75	96.33	3.00
1.6		99.00	95.86	1.00
1.25		98.44	94.79	0.65
1		78.00	89.12	0.63
0.63		58.25	84.24	
0.50		46.00	69.29	0.47
0.315		36.20	54.35	
0.25		25.00	39.86	0.10
0.16		13.35	4.65	0.09
0.125			1.46	
0.08			1.17	

Pour simplifier la comparaison de la répartition granulaire des sables analysés, leurs courbes granulométriques sont regroupées dans la Figure II-3. Il est notable que le sable alluvionnaire possède une proportion de fines plus importante par rapport au sable de dune, D'après les courbes granulométriques du sable de dune et sable alluvionnaire, on constate qu'elles se trouvent en dehors de la plage spécifiée mais le sable alluvionnaire dans le fuseau. De plus, il est à noter que SA conduit à une meilleure qualité du sable (sable préférentiel).

II.3.2. Module de finesse (Norme NA 2607)

Par définition le module de finesse est égal au $1/100^{\text{ième}}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante l'équation (1). A partir de la valeur du module de finesse, on classe les sables selon les trois catégories présentées sur le tableau II.2.

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

Tableau II.2. Les classifications des sables.

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	[2.8 – 3.3]
Préférentiel	[2.2 – 2.8]
Fin	[1.8 – 2.2]

Dans notre recherche le module de finesse sont :

- 1- M_f Sable de dune = 1,94 on est en présence d'un sable fin.
- 2- M_f Sable aaluvionnaire = 2,67 on est en présence d'un sable Préférentiel.

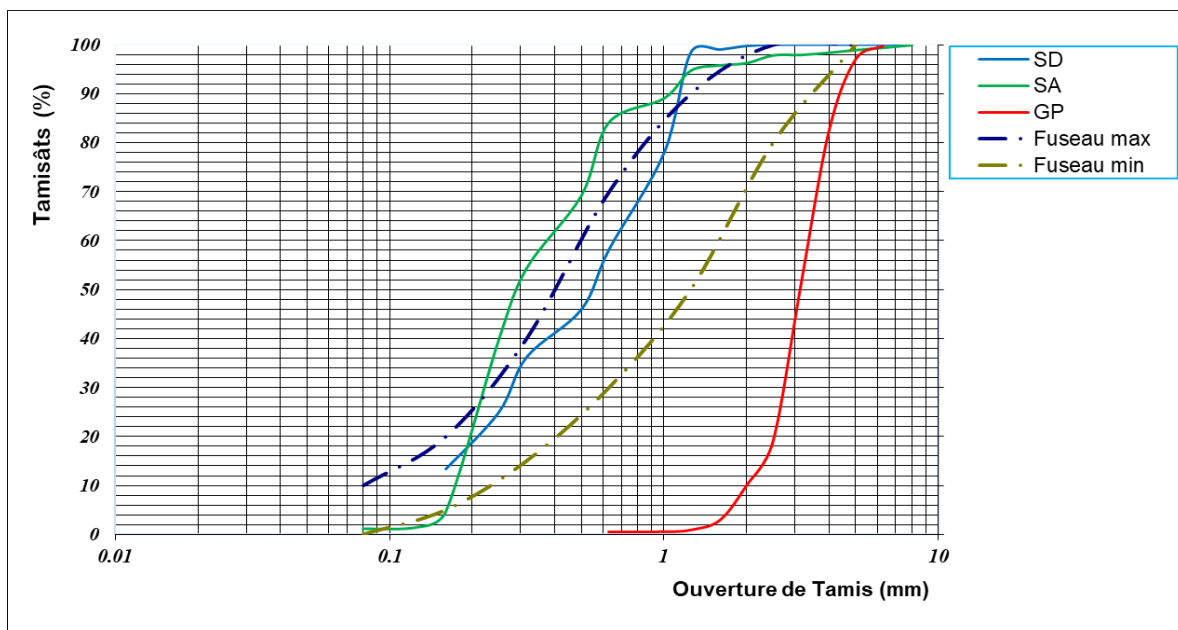


Figure II-3 : Courbes granulométriques du SD, SA et GP.

II.3.3 Masses volumiques et Absorption d'eau

Les masses volumiques absolues (ρ_{abs}) et apparentes (ρ_{app}) des granulats ont été établies en accord avec les directives des normes NF P18-555 [85] et NF EN 1097-6 [86] (Figure II-4) Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau II-3 ci-dessus.

Tableau II-3 : Masses volumiques des granulats utilisés

Granulats	Masse volumique absolues (g/cm ³)	Masse volumique apparents (g/cm ³)
Sable alluvionnaire	2.67	1.60
Sable de dune	2.67	1.68
Grains plastique	1.25	0.38
Filler de béton démoli	2.56	1.50

**Figure II-4** : Mesure de la masse volumique des granulats utilisés.

La méthode d'essai d'absorption d'eau sur le sable peut varier en fonction des normes ou des protocoles spécifiques utilisés. Pour commencer, sélectionnez un échantillon représentatif de sable, puis séchez-le au four à une température de 110 °C jusqu'à obtenir un poids constant. Notez le poids initial (P1) du sable sec. Laissez l'échantillon refroidir à la température ambiante, puis tamisez le sable pour obtenir une granulométrie uniforme. Immergez complètement l'échantillon de sable dans de l'eau pendant 24 heures. Retirez délicatement l'échantillon de l'eau, en veillant à éliminer l'excès d'eau de la surface. Pesez immédiatement l'échantillon mouillé et notez le poids final (P2) du sable saturé. Enfin, calculez l'absorption d'eau en utilisant la équation (2) suivante :

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = [(P2 - P1) / P1] \times 100. \quad (2)$$

Tableau II-4 : Absorption d'eau des granulats utilisés

Granulats	Sable alluvionnaire	Sable de dune	Grains plastique
Absorption d'eau Ab (%)	1,83	0,90	00

II.3.4 Mesure de la propreté des granulats

II.3.4.1 Essai d'équivalent de sable

Pour évaluer la qualité des granulats utilisés, nous avons effectué l'essai de l'équivalent de sable (E_S) des particules de taille 0/5 mm conformément à la norme NF P 18-598 [87] (voir Figure II-5). L'équivalent de sable est un paramètre qui caractérise la propreté d'un sable, en indiquant la présence de particules fines, principalement d'origine argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

Tableau II-5 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable des matériaux utilisés

Granulats	Sable alluvionnaire	Sable de dune	Grains plastique
Equivalent de sable			
Esv (%)	76.85	98,82	
Es (%)	76,00	97,00	/

Selon la classification de la norme NF P18-589, le sable de dune analysé peut être qualifié de sable très propre, tandis que le sable alluvionnaire correspond à un sable propre

**Figure II-5** : Machine de mesure d'équivalent de sable utilisés.

II.4 Protocole d'essai

Après la caractérisation des matières premières, cette section présente les différentes méthodes de mesure utilisées pour analyser les mortiers plastiques, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Les propriétés rhéologiques, mécaniques et physiques de ces matériaux à matrice cimentaire dépendent étroitement de la nature et de la forme des constituants utilisés. Dans le but de sélectionner les formulations de mortier à étudier pour leurs performances physico-mécaniques et leurs indicateurs de durabilité, une composition de référence a été définie sur la base de critères mécaniques.

II.4.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai

Une étude préliminaire a d'abord été menée sur une formulation témoin (C = 450 g, 100 % SD, 100 % SA) afin d'obtenir un mortier plastique avec un étalement compris entre 140 et 200 mm. Les rapports ciment/sable (C/S) et eau/ciment (E/C) ont été fixés respectivement à 1:3 et 0,57, en tenant compte des masses volumiques des solides pour les substitutions. L'objectif principal de l'étude est ensuite de substituer le sable de dunes par du filler de béton démolé (FBD), en proportions volumiques de 0 à 40 % avec un pas de 5%, et du grain plastique (GP) à hauteur de 0 à 15 %, selon les formulations définies dans le plan d'expérience (voir tableau II-6 pour les détails et la codification des échantillons). Tous les mélanges ont été vérifiés pour leur plasticité à l'aide de l'essai d'étalement selon la norme EN 1015-6 [88], afin de s'assurer que la consistance reste dans la plage cible (140–200 mm).

Table II.6 Les différents formulations des mortiers plastique étudiés.

N°	Code	Pourcentage			E/C	Sable	FBD	GP	Ciment	Eau	Total
		SD	FBD	GP		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
1	MCSA	100	0	0	0.57	9040.43	0	0	3013.48	1717.68	11208.11
2	MTSD	100	0	0	0.57	9040.43	0	0	3013.48	1717.68	11208.11
3	MP90/10/0	90	10	0	0.57	8136.387	866.79	0	3013.48	1717.68	11170.87
4	MP90/5/5	90	5	5	0.57	8136.387	433.39	60.75	3013.48	1717.68	10798.23
5	MP80/20/0	80	20	0	0.57	7232.344	1733.59	0	3013.48	1717.68	11133.62
6	MP80/15/5	80	15	5	0.57	7232.344	1300.19	60.75	3013.48	1717.68	10760.98
7	MP80/10/10	80	10	10	0.57	7232.344	866.79	121.51	3013.48	1717.68	10388.34
8	MP80/5/15	80	5	15	0.57	7232.344	433.39	182.27	3013.48	1717.68	10015.69
9	MP70/30/0	70	30	0	0.57	6328.301	2600.39	0	3013.48	1717.68	11096.38
10	MP70/25/5	70	25	5	0.57	6328.301	2166.99	60.75	3013.48	1717.68	10723.73
11	MP70/20/10	70	20	10	0.57	6328.301	1733.59	121.51	3013.48	1717.68	10351.09
12	MP70/15/15	70	15	15	0.57	6328.301	1300.19	182.27	3013.48	1717.68	9978.448
13	MP60/40/0	60	40	0	0.57	5424.258	3467.19	0	3013.48	1717.68	11059.13

14	MP60/35/5	60	35	5	0.57	5424.258	3033.79	60.75	3013.48	1717.68	10686.49
15	MP60/30/10	60	30	10	0.57	5424.258	2600.39	121.51	3013.48	1717.68	10313.85
16	MP60/25/15	60	25	15	0.57	5424.258	2166.99	182.27	3013.48	1717.68	9941.203

II.4.2 Préparation des échantillons d'essai

Les expérimentations ont été réalisées sur des échantillons prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) pour les essais d'absorption d'eau, de retrait, de vitesse d'impulsion ultrasonique, de flexion et de compression. Des éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ont été utilisées pour l'essai de résistance au choc, et celles de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ pour l'essai de perméabilité. Après le malaxage de chaque formulation, les essais à l'état frais (étalement et masse volumique) ont été immédiatement réalisés, comme illustré en Figure II-6 (a et b), puis le mortier a été coulé en deux couches dans des moules préalablement huilés (Figure II-7). Faute de table vibrante, le compactage a été effectué manuellement pendant une minute. Une fois les moules remplis, le mortier a été nivelé à la truelle, puis conservé à température ambiante pendant 24 heures avant démoulage. Les éprouvettes ont ensuite été immergées dans l'eau (Figure II-8) pendant 28 jours. Pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été préparées en vue des essais physico-mécaniques.



Figure II-6 : Les essais à l'état frais, (a) l'étalement, (b) la masse volumique .



Figure II-7 : Huilage des moules et nivellement de la surface du mortier.

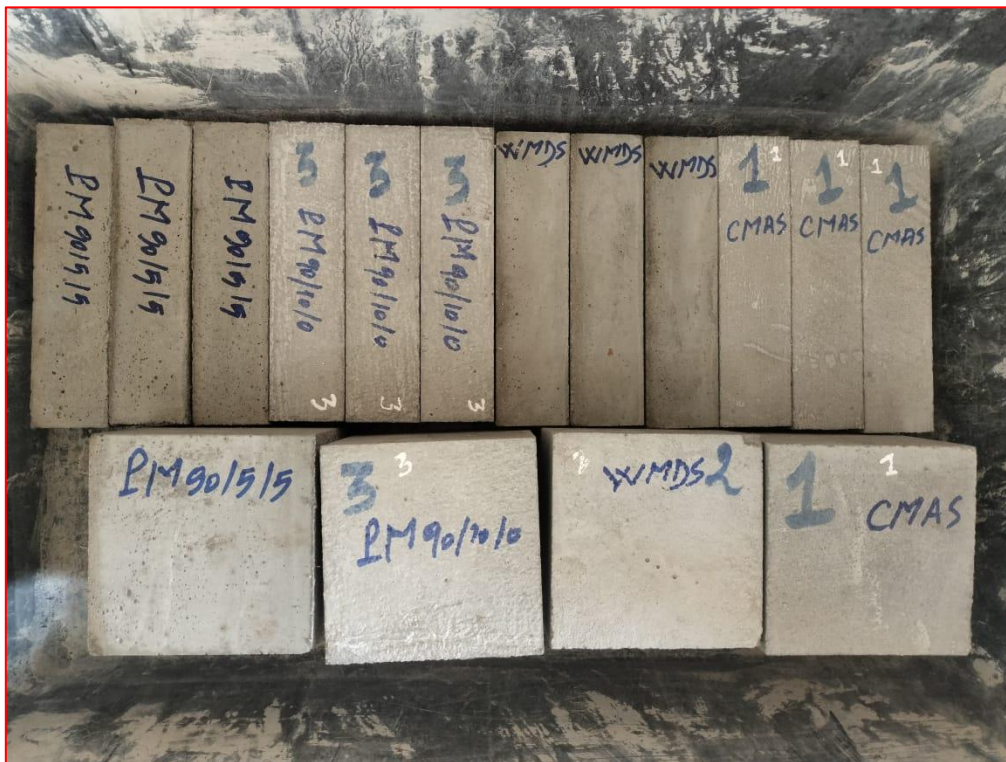


Figure II-8 : Conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours de cure.

II.5. Méthodologie expérimentale

Afin d'évaluer les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du mortier plastique étudié, une série d'essais a été réalisée sur différentes formulations. Celles-ci ont été obtenues en faisant varier les proportions de sable de dunes (SD), de filler de béton démolé (FBD) et de

grains plastiques (GP). Les performances des mélanges ainsi obtenus ont été comparées à celles d'un mortier de contrôle ainsi qu'à un mortier témoin, après une période de cure standard de 28 jours. Cette démarche a permis d'analyser l'effet des substitutions sur le comportement global du matériau, notamment en termes de résistance, de compacité et de durabilité.

II.5.1. Caractéristiques à l'état frais

II.5.1.1 Ouvrabilité

L'essai à la table à secousses a été utilisé pour évaluer la consistance des mortiers plastiques, dans le but de garantir une homogénéité entre les formulations des mortiers. La masse volumique de chaque mélange a également été déterminée. L'essai est réalisé à l'aide d'un moule tronconique (diamètre inférieur : 100 mm ; diamètre supérieur : 70 mm ; hauteur : 60 mm), centré sur la table. Le mortier est introduit en deux couches, chacune compactée par 10 coups de pilon, puis arasée à l'aide d'une règle métallique. Le moule est ensuite retiré verticalement et 15 secousses sont appliquées à raison d'une par seconde. L'étalement est mesuré selon deux diamètres perpendiculaires (d_1 et d_2), et la moyenne de ces valeurs, exprimée en centimètres, représente la consistance du mélange (Figure II-9).

Où d_1 et d_2 représentent respectivement les diamètres de la galette.

L'étalement noté D_{moy} est la moyenne de d_1 et d_2 donnée par l'équation (3) suivante:

$$D_{moy} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (cm) \quad (3)$$

Les classes de consistance sont définies en fonction des valeurs d'affaissement, comme présenté dans le tableau II.7 ci-dessous.

Table II.7 Valeurs d'étalement NF EN 1015-6 [88].

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



Figure II-9 : Equipements tables à secousses et méthode de la mesure de l'étalement.

II.5.1.2 Masse volumique

Ensuite, immédiatement après avoir réalisé le processus de détermination de la densité à l'état frais, comme illustré respectivement dans la Figure II-6b, nous avons calculé la masse volumique du mortier frais à partir des mesures gravimétriques des moules remplis après le coulage, donnée par l'équation (4) ci-dessous.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (4)$$

II.5.2 Caractéristiques à l'état durci

II.5.2.1 Essais d'auscultation dynamique (UPV)

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est un essai non destructif couramment utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, notamment leur compacité. Conformément à la norme ASTM C597-02 [26], l'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$), préalablement conservées 28 jours dans l'eau, puis séchées à 105°C jusqu'à masse constante. Le principe repose sur l'émission d'une onde acoustique à travers le matériau, la mesure du temps de transit entre l'émetteur et le récepteur permettant de calculer la vitesse de l'onde. Une vitesse plus élevée est généralement corrélée à un module d'élasticité plus important et à une meilleure résistance du matériau. Cet essai, réalisé à l'aide d'un appareil de marque Controls (voir Figure II-10), fournit ainsi une évaluation qualitative de la structure interne des mortiers. Les critères d'interprétation des résultats sont présentés dans le tableau II-8.



Figure II-10 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique du mortier étudié.

Tableau II- 8 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [89].

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

Remarque : En cas de qualité « douteuse », il peut être nécessaire d'effectuer des tests supplémentaires.

L'essai exige une surface de contact qui s'adapte parfaitement à la forme de l'appareil, nécessitant l'application d'une fine couche de gel de contact. Après avoir parcouru une distance connue dans le mortier, un deuxième transducteur (récepteur) convertit les vibrations en signal électrique. Des compteurs électroniques mesurent ensuite le temps de parcours de l'impulsion, exprimé en microsecondes (μsec), une fois l'appareil activé.

La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour le calcul de la vitesse de propagation, selon l'équation (5) suivante :

$$V = \frac{L}{T} \quad (5)$$

Où :

V: La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le mortier (m/sec).

L: La distance entre les têtes (m).

T : Le temps de propagation (sec).

II.5.2.2 Essai du retrait et gonflement

Le retrait/gonflement est un paramètre crucial car elle est souvent responsable de l'apparition de fissures qui peuvent compromettre la durabilité du béton et du mortier. Les déformations de la matrice peuvent résulter de processus physico-chimiques pendant l'hydratation ou du gradient hydrique entre le matériau et son environnement extérieur.

Les variations dimensionnelles ont été quantifiées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage numérique très sensible, avec une précision de 0.001 mm (voir Figure II-11).

Le retrait et le gonflement du mortier désignent les variations dimensionnelles qui surviennent au cours du temps, résultant principalement de processus physico-chimiques liés à l'hydratation du ciment et aux échanges hydriques avec l'environnement. Le retrait correspond à une diminution de volume, souvent due à l'évaporation de l'eau capillaire ou à la dessiccation, tandis que le gonflement traduit une augmentation de volume, pouvant être induite par certaines réactions internes ou par une absorption excessive d'humidité. Ces phénomènes sont des paramètres critiques, car ils peuvent engendrer des contraintes internes conduisant à la fissuration, compromettant ainsi la durabilité et l'intégrité structurelle du matériau.

Dans cette étude, les variations dimensionnelles ont été mesurées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage numérique, doté d'une précision de 0,001 mm (voir Figure II-11), permettant une évaluation fine des déformations au cours du temps.



Figure II-11 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique.

Cet essai, réalisé conformément à la norme NF P15-433, vise à mesurer les variations dimensionnelles dues au retrait des mortiers durcis au fil du temps. Les mesures ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) après 28 jours de cure dans l'eau. Pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été testées, et les résultats présentés correspondent à la moyenne des valeurs enregistrées.

II.5.2.3 Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion en trois points a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) conformément à la norme NA 428 et en accord avec la norme NF EN 1015-11 [90]. Les tests ont été effectués à l'aide d'une machine universelle UTEST UTC-4320 d'une capacité de 2000 kN, avec un affichage de la charge de rupture et du déplacement offrant une précision respective de 10^{-3} kN et 10^{-2} kN . Pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été testées. Celles-ci sont positionnées sur le bâti de la presse avec un entraxe de 100 mm entre les appuis, puis sollicitées jusqu'à rupture. La résistance à la flexion est déterminée selon l'équation (6).

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_{f \max} \cdot L}{b^3} \quad (6)$$

Avec :

R_f : La résistance en flexion du mortier en MPa ;

F_{max} : la charge maximale appliquée au milieu du prisme à la rupture en KN ;

L : la distance entre les appuis en mm ($L=100$ mm) ;

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

La Figure II-12 ci-dessous illustre les essais de résistance à la traction par flexion réalisés dans le cadre de cette étude.



Figure II-12 : Matériels utilisés pour l'essai de traction par flexion à trois points.

II.5.2.4 Essai de compression

L'essai de compression a été réalisé sur les demi-prismes issus de l'essai de traction par flexion, conformément à la norme NF EN 12390-4 [57], à l'aide d'une presse de 2000 kN opérant à une vitesse de 0,5 MPa/s. Les éprouvettes, de dimensions $4 \times 4 \times 4$ cm³, sont centrées sur le plateau de la presse, assurant une surface de contact de 16 cm² (voir Figure II-13). La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est déterminée selon l'équation (7), en rapportant cette charge à la section transversale de l'éprouvette. Les résultats présentés représentent la moyenne de trois essais par formulation.

La Figure II-14 illustre les demi-prismes utilisés.

$$R_c = \frac{F_{c \max}}{b^2} \quad (7)$$

Avec :

R_c : la résistance en compression du mortier en MPa ;

$F_{c \max}$: la charge maximale en compression provoquant la rupture en Newtons;

b : Le coté de la section carrée de l'éprouvette en mm.



Figure II-13 : Presse d'essai de compression

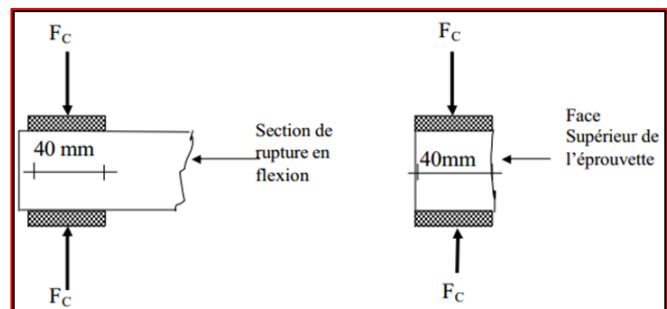


Figure II-14 : Principe de l'essai de la compression

II.5.2.5 Absorption d'eau par immersion totale

L'essai d'absorption d'eau consiste à évaluer la quantité d'eau qu'un mortier peut absorber en état de saturation. Les éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) sont d'abord séchées dans une étuve ventilée à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 72 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante. Elles sont ensuite entièrement immergées dans de l'eau à $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant au moins 48 heures, jusqu'à saturation. Avant la pesée, les surfaces sont essuyées à l'aide d'une éponge humide. La masse est considérée comme stable lorsque deux pesées successives, espacées de 24 heures, ne présentent pas d'écart supérieur à 0,1 %.

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque formulation de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne des trois valeurs mesurées. La masse d'eau absorbée est ensuite calculée à partir de la masse sèche (M_s) et de la masse à saturation (M_a), selon l'équation (8) suivante :

$$Ab (\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (8)$$

M_a : Masse de l'échantillon imbibé d'eau. M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.



Figure II-15 : Principe expérimental d'absorption d'eau par immersion totale des éprouvettes étudiées.

II.5.2.6 Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau des mortiers a été évaluée conformément à la norme EN 12390-8, qui mesure la capacité du matériau à laisser passer l'eau sous pression. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cubiques de 150×150×150 mm, préalablement conservées en cure humide pendant 28 jours. Avant l'essai, les faces latérales ont été enduites d'un revêtement imperméabilisant (goudron, paraffine ou résine) afin de limiter la pénétration d'eau à la seule face exposée. À l'aide d'une cellule à pression constante, cette face est soumise à une pression

d'eau comprise entre 0,5 et 1 MPa pendant 72 heures, à température ambiante. Une fois l'essai terminé, les éprouvettes sont fendues pour observer visuellement la zone humidifiée. La profondeur maximale de pénétration est mesurée au réglet ou au pied à coulisse, et plusieurs relevés peuvent être moyennés. Ce paramètre, exprimé en millimètres, reflète la compacité du matériau : plus la pénétration est faible, plus la perméabilité est réduite. La Figure II-16 illustre la machine de perméabilité à l'eau.



Figure II-16 : Appareil de mesure de la perméabilité à l'eau sous pression.

Cette mesure constitue un indicateur qualitatif de la compacité du mortier et de sa résistance à la pénétration de l'eau. Une faible valeur de P_{moy} reflète une structure plus dense, traduisant une meilleure durabilité du matériau. L'équation (9) ci-dessous permet de calculer la profondeur moyenne de pénétration de l'eau.

$$P_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (9)$$

Où :

- P_{moy} : profondeur moyenne de pénétration de l'eau (mm)
- i : profondeur mesurée au point i (mm)
- n : nombre total de points de mesure

Détermination du coefficient de perméabilité K

Le coefficient de perméabilité K aussi appelé perméabilité hydraulique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau poreux comme le mortier ou le béton à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Il peut être déterminé de manière quantitative par la loi de *DARCY*, selon l'équation (10) suivante :

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta H \cdot t} \quad (10)$$

Où :

K : coefficient de perméabilité (m/s)

Q : volume d'eau traversant l'échantillon (m³)

L : longueur (ou épaisseur) de l'échantillon dans le sens de l'écoulement (m)

A : surface de la section transversale (m²)

ΔH : hauteur de charge hydraulique appliquée (m)

t : temps d'écoulement (s)

II.5.2.7 Resistance aux choc

La mesure de la résistance au choc, également appelée essai d'impact, ne fait pas encore partie des essais normalisés couramment utilisés pour les mortiers, contrairement aux essais de compression ou de flexion. Néanmoins, dans le cadre de travaux de recherche expérimentale, plusieurs méthodes ont été développées afin d'évaluer la ténacité et la capacité des mortiers à absorber des chocs mécaniques, notamment ceux simulant une sollicitation dynamique ponctuelle, telle qu'une chute d'objet. Parmi ces méthodes, celle inspirée de l'ACI Commette 544 (généralement utilisée pour le béton fibré) s'est révélée adaptée à l'évaluation des performances des mortiers modifiés. Elle consiste en un essai simplifié par chute de masse. Les éprouvettes utilisées sont généralement de forme cubique, avec des dimensions standards de 100×100×100 mm ou 150×150×150 mm, préalablement conservées pendant 28 jours de cure dans l'eau afin d'assurer un durcissement optimal. L'essai est réalisé à l'aide

d'un dispositif comportant une masse standard (typiquement 4,5 kg), un guide vertical (tube ou colonne) de hauteur fixe (souvent 450 mm à 1 m), une surface rigide de réception, un compteur de chocs, et un système de sécurité (grille ou cage) pour prévenir les projections [91].



Figure II-17 : Dispositif d'essai pour la mesure de la résistance aux chocs.

La procédure expérimentale consiste à placer l'éprouvette sur une plaque rigide, puis à laisser tomber la masse depuis la hauteur définie, en visant le centre supérieur de l'éprouvette. Deux paramètres sont relevés : le nombre d'impacts nécessaires pour observer la première fissure visible, et le nombre total d'impacts jusqu'à la rupture complète. Ces données permettent d'évaluer l'énergie absorbée et, par conséquent, la résistance dynamique du matériau en (Joules) selon l'équation (11) suivante:

$$E = m \cdot g \cdot h \cdot N \quad (11)$$

Où :

m: masse de l'objet (kg)

g: gravité (9,81 m/s²)

h: hauteur de chute (m)

N : nombre de coups à la rupture

II.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les caractéristiques des différentes matières premières recyclées intégrées dans les matériaux composites développés dans le cadre de cette étude. Une attention particulière a été portée aux granulés plastiques de type polyéthylène téréphtalate (PET). L'incorporation de fillers issus de béton démolé dans la composition des mortiers s'avère être d'une importance majeure, tant pour l'optimisation des performances mécaniques que pour la valorisation des déchets de construction. Par ailleurs, la substitution partielle du sable de dune par le filler de béton démolé (FBD) peut influencer de manière significative la granulométrie, la cohésion de la matrice, le comportement rhéologique du matériau, et, par conséquent, ses propriétés physiques, mécaniques ainsi que sa durabilité.

La seconde partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation détaillée des méthodes de caractérisation des matériaux utilisés. Celles-ci sont majoritairement conformes aux normes en vigueur, bien que certaines aient été adaptées à partir de tests préliminaires afin de mieux répondre aux spécificités des matériaux étudiés.

Dans ce contexte, nous avons également exposé les procédures de préparation des échantillons ainsi que les protocoles expérimentaux relatifs aux différentes techniques de caractérisation mises en œuvre.

Enfin, ce chapitre se conclut par l'introduction des formulations des mortiers témoins et expérimentaux, en vue d'une évaluation comparative à l'aide des méthodes de caractérisation précédemment décrites.

CHAPITRE III :

ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

III. 1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse et à l'interprétation des résultats issus d'un programme expérimental réalisé dans le cadre de cette recherche. Bien que la thématique des mortiers incorporant divers types de granulats et de fibres soit vaste et largement explorée, les études portant sur des mortiers à base de sable de dune, partiellement remplacé par du filler de sable recyclé et renforcé par des grains de plastique en polyéthylène téréphtalate (PET), restent encore très limitées [92]. Cette section expérimentale présente les aspects essentiels relatifs à l'étude de la rhéologie de ces mortiers à l'état frais, ainsi qu'à la caractérisation de leurs propriétés physiques et mécaniques à l'état durci.

III.2 Propriétés à l'état frais

III.2.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité des mortiers, formulés avec différents pourcentages de remplacement du sable de dune par du filler de béton démolé (FBD) et diverses fractions massiques de grains de plastique (GP), a été évaluée à travers la mesure de l'étalement à l'aide d'une table à secousses. Cette évaluation vise à quantifier la teneur en eau nécessaire pour atteindre la plasticité souhaitée.

La figure III-1 illustre les résultats d'étalement des différents mortiers testés. Ces étalements sont exprimés sous forme de rapport par rapport au diamètre initial du cône d'essai, dont la base inférieure mesure 10 cm, la base supérieure 7 cm, pour une hauteur de 6 cm. Le mortier de référence présente un étalement relatif moyen de 19,57, correspondant à une consistance typique d'un mortier plastique. Le mortier MP_{90/5/5}, composé à parts égales de sable de dune et de sable recyclé, affiche la meilleure performance avec un étalement de 22,5 cm.

L'incorporation de FBD entraîne une réduction significative de l'étalement, atteignant une valeur minimale de 15,5 cm pour le mortier MP_{60/40/0}, comme présenté dans le tableau III-1. Toutefois, malgré cette diminution notable de l'étalement, les mortiers conservent une consistance fluide, caractéristique des mortiers plastiques. Il convient également de noter que les formulations MCSA, MP_{60/40/0} et MP_{60/35/5} enregistrent les valeurs d'étalement les plus faibles parmi l'ensemble des mélanges étudiés.

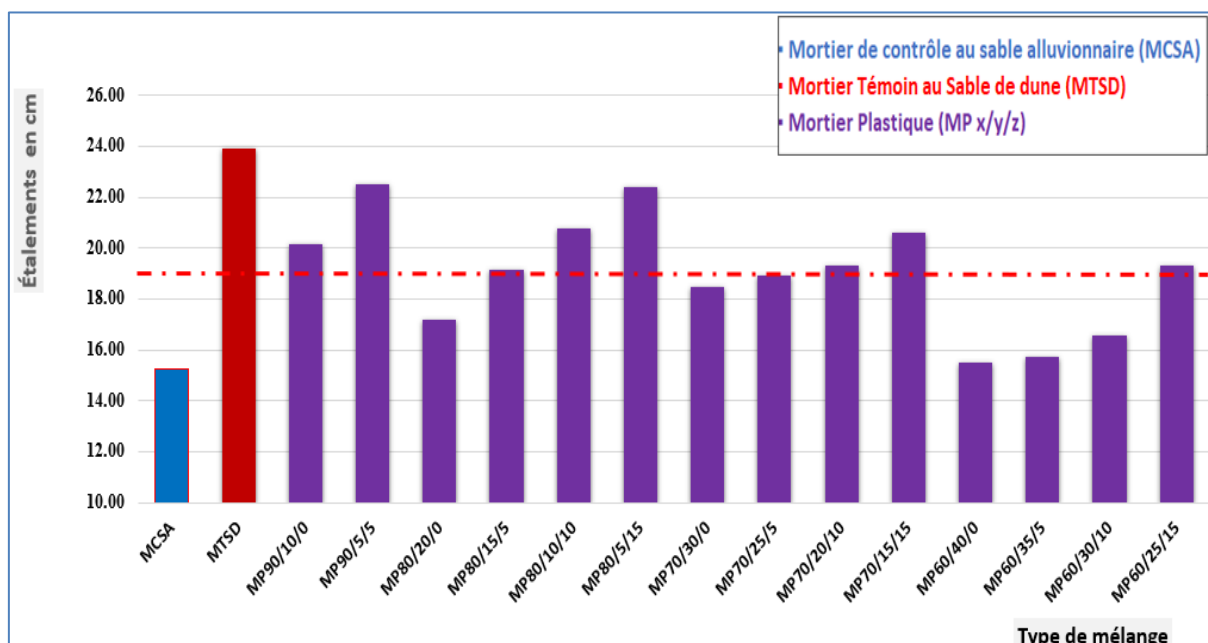


Figure III-1 Étalement des mortiers en fonction du pourcentage de substitution du sable de dune par le filler de béton démolé et du taux de grains plastiques.

Par ailleurs, bien que les granulats recyclés présentent une capacité d'absorption élevée, le sable alluvionnaire a absorbé une quantité d'eau supérieure à celle du sable de dune. Cette différence s'explique par la forte teneur en fines du sable alluvionnaire [72,93].

La ligne horizontale en pointillés représente la courbe de tendance, correspondant à la moyenne des valeurs expérimentales obtenues pour l'ensemble des mélanges.

2.2 Densité à l'état frais

Les valeurs de la masse volumique à l'état frais des mortiers se situent dans une plage comprise entre 2170 et 2370 kg/m³. Il a été observé que cette densité diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de remplacement par des grains plastiques (GP), ce qui a également été confirmé par plusieurs auteurs [94]. Les formulations MTSD, MP_{90/5/5}, MP_{80/15/5}, MP_{70/25/5} et MP_{70/15/15} ont enregistré les densités les plus élevées parmi l'ensemble des mélanges étudiés. Il est bien établi que la masse volumique du mortier dépend principalement de la densité des constituants utilisés, ainsi que de la teneur en air incorporé.

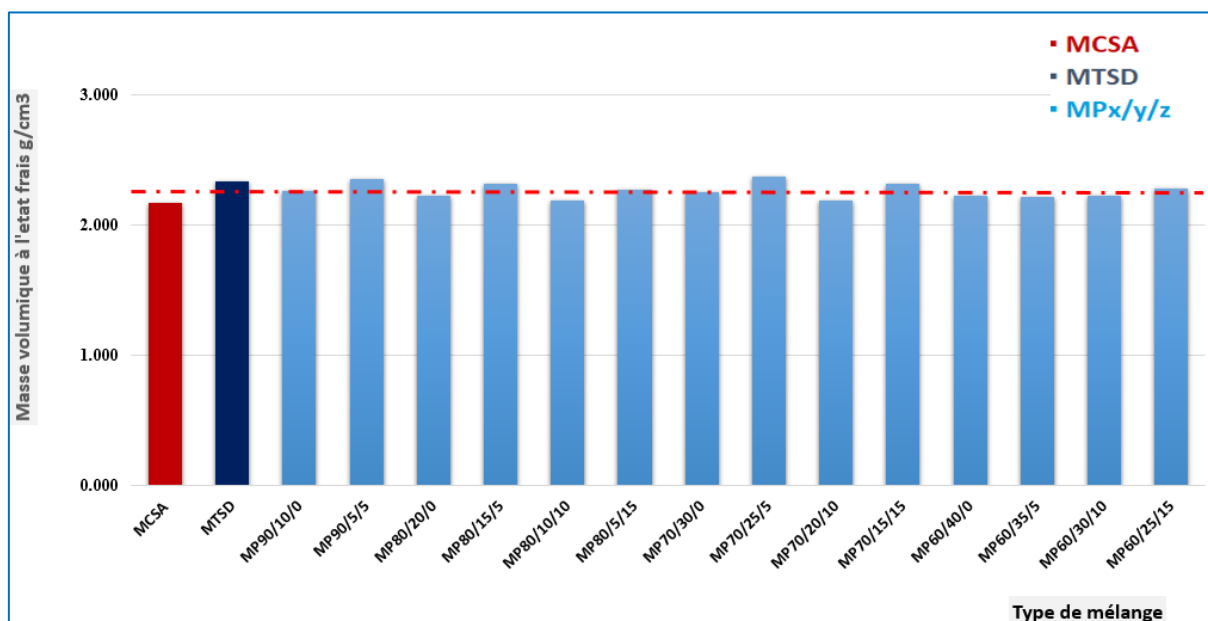


Figure III-2 Masse volumique du mortier étudié à l'état frais.

Parmi les différentes formulations à base de sable de dune, la composition MCSA présente la plus faible masse volumique, que ce soit par rapport à la formulation entièrement constituée de sable de dune (codifiée MTSD) ou à celles intégrant un remplacement partiel du filler par des déchets de béton démolé (FDB) et l'ajout de granulés plastiques (GP). En revanche, une tendance à l'augmentation de la masse volumique a été observée avec certaines substitutions, notamment dans les formulations combinant FDB et GP. Il convient de souligner que la formulation contenant 25 % de FDB et 5 % de GP a enregistré la densité la plus élevée, surpassant à la fois le mortier témoin et le mortier de référence. Par ailleurs, la formulation M_{90/5/5}, dans laquelle le sable de dune est partiellement remplacé par du FDB, a permis d'obtenir une densité à l'état frais particulièrement importante. Ce comportement est principalement attribué à un agencement plus optimal des particules solides dans le mélange.

III.3 Propriétés à l'état durci

III.3.1 Résistance à la flexion

Les résultats des essais de flexion en trois points réalisés à 28 jours sur les mortiers plastiques sont présentés à la Figure III-3. Cette figure compare la résistance à la flexion du mortier de contrôle (MCSA), du mortier témoin (MTSD) et des mortiers formulés avec un remplacement partiel du filler par des déchets de béton démolé (FDB) ainsi qu'un ajout de granulés plastiques (GP).

De manière générale, les résultats obtenus montrent une amélioration notable de la résistance à la flexion pour certaines formulations. En particulier, les mortiers MP_{90/10/0}, MP_{90/5/5}, MP_{80/20/0} et

MP_{60/40/0} ont enregistré des gains respectifs de 7,297 %, 6,336 %, 7,18 % et 6,922 % par rapport aux échantillons de référence (MCSA et MTSD).

En revanche, les formulations MP_{80/5/15} et MP_{60/25/15} ont affiché les plus faibles valeurs de résistance à la flexion, avec des résultats de 4,547 MPa et 4,711 MPa, respectivement. Ces valeurs représentent une diminution de 25,24 % et 20,88 % par rapport au mélange de contrôle (MCSA).

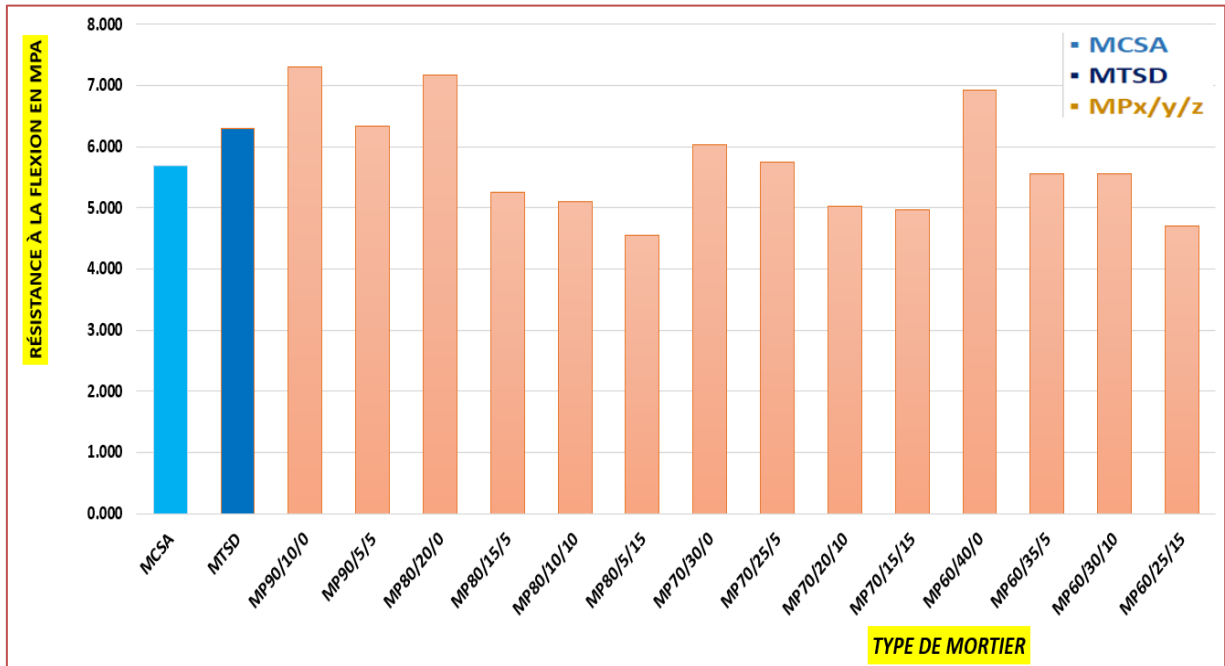


Figure III-3 Résistance à la flexion des mortiers étudiés après 28 jours de cure à l'eau.

Dans le cadre de cette étude, il a été constaté que la résistance à la flexion des mortiers s'est améliorée avec l'introduction progressive de déchets de béton démolé (FDB) en substitution partielle du sable de dune (SD), mais uniquement jusqu'à un certain pourcentage. Cette amélioration peut être attribuée à la forme et à la texture des particules de FDB, qui favorisent une meilleure interconnexion entre la pâte cimentaire et les grains solides, renforçant ainsi l'adhérence au sein de la matrice.

En revanche, l'ajout de granulés plastiques (GP) a entraîné une diminution de la résistance à la flexion. Ce comportement peut s'expliquer par la surface lisse et peu adhérente des grains plastiques, qui limite l'ancrage mécanique dans la matrice cimentaire et affaiblit la liaison interfaciale entre les composants du mortier.

III.3.2 Résistance à la compression

La Figure III-4 illustre l'évolution de la résistance à la compression après 28 jours de cure à l'eau pour différents types de mortiers : le mortier de contrôle (MCSA), le mortier témoin (MTSD), ainsi que les mortiers formulés avec un remplacement partiel du filler par des déchets de béton démolé (FDB) et l'ajout de granulés plastiques (GP). La résistance à la compression a été évaluée en calculant la moyenne de trois échantillons cubiques de mortier plastique de dimensions $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$.

L'analyse de cette figure montre que l'augmentation du taux de remplacement du sable de dune par le FDB entraîne une amélioration initiale de la résistance à la compression, jusqu'à un certain seuil. Ainsi, les formulations MP_{90/10/0}, MP_{80/20/0}, MP_{70/30/0} et MP_{60/40/0} présentent des hausses de résistance respectives de 10,7 %, 7,12 %, 6,44 % et 5,18 % respectivement par rapport au mortier de contrôle (MCSA). Toutefois, au-delà de certaines proportions, notamment avec l'ajout de granulés plastiques, une diminution progressive de la résistance à la compression est observée. Cela suggère que l'introduction de GP, en raison de leur faible adhérence et de leur nature non réactive, affaiblit la structure du mortier et compromet sa résistance mécanique.

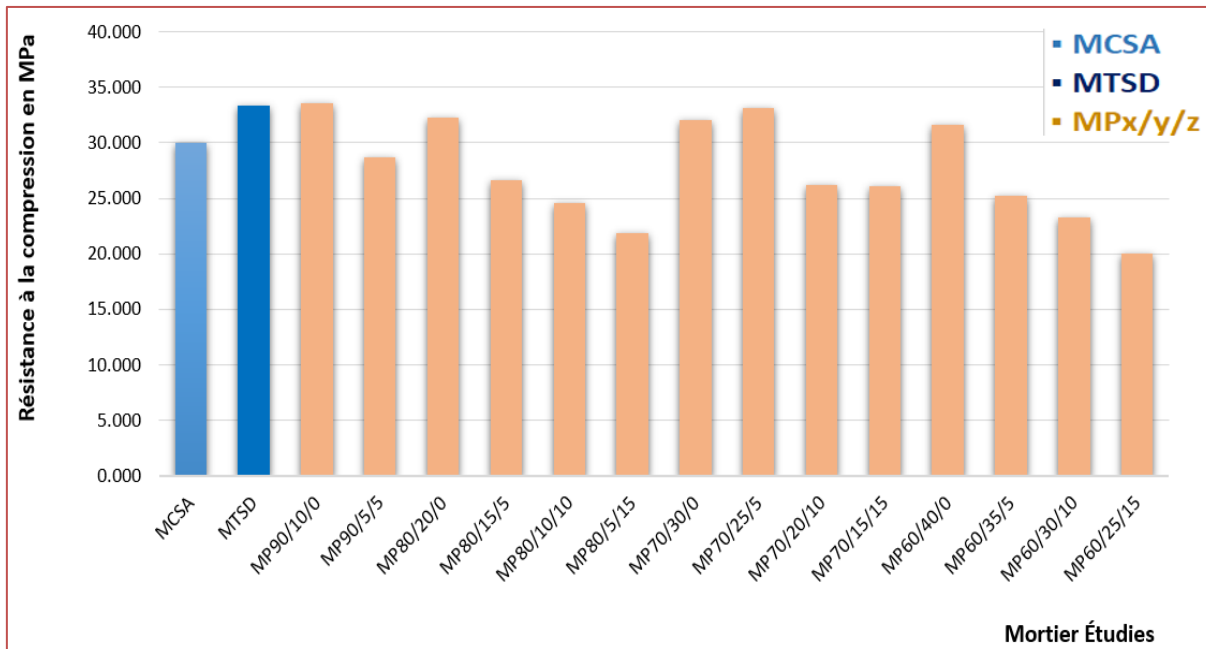


Figure III-4 Résistance à la compression des mortiers étudiés après 28 jours de cure à l'eau.

La diminution de la résistance des mortiers plastique, est due à la distribution des tailles de grains se situant à l'extérieur des limites du fuseau maximal et minimal. De plus, leur capacité d'absorption d'eau est élevée, ce qui entraîne une obstruction importante de l'air à l'état frais,

conduisant ainsi à la formation d'une porosité supplémentaire à l'état durci.

Les résultats des essais de résistance à la compression réalisés sur les éprouvettes conservées dans l'eau jusqu'au jour de l'essai indiquent que l'intégration de granulés plastiques (GP) dans la matrice cimentaire n'exerce pas d'influence significative. Toutefois, une légère diminution de la résistance à la compression est observée par rapport aux mortiers de référence (MCSA et MTSD) [94,95]. Cette baisse peut s'expliquer principalement par la faible densité des granulés plastiques comparée à celle des mortiers formulés uniquement avec du sable de dune (SD) ou un mélange de SD et de filler de béton démolé (FDB). Une autre cause probable de cette réduction est la distribution aléatoire des granulés plastiques dans la matrice, pouvant provoquer une accumulation désordonnée des filaments, ce qui accroît le volume des vides à l'interface entre les granulés plastiques et la pâte cimentaire [96–99]. Par ailleurs, les résultats montrent que les mortiers MTSD (100 % SD) et MP90/10/0 (90 % SD + 10 % FDB) présentent les meilleures résistances à la compression parmi toutes les formulations testées. Ces deux compositions affichent des performances similaires, suggérant que le remplacement de 10 % du sable de dune par du FDB peut être une alternative favorable sans compromettre la résistance mécanique.

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

La Figure III-5 présente les résultats des essais de vitesse de propagation des ondes ultrasonores (UPV) réalisés sur les différentes formulations de mortiers. De manière générale, les vitesses mesurées varient entre 3316,07 m/s et 3928,08 m/s pour l'ensemble des échantillons testés. Ces valeurs indiquent une bonne compacité ainsi qu'une cohérence structurelle satisfaisante des éprouvettes, reflétant la qualité des formulations étudiées. Parmi l'ensemble des mélanges, le mortier MP70/30/0 se distingue par une vitesse UPV élevée, traduisant une compacité et une homogénéité supérieures. Ce mortier enregistre une augmentation de la vitesse UPV de 7,84 % par rapport au mortier de référence MCSA, et de 2,23 % par rapport au mortier témoin MTSD. Cette amélioration peut être attribuée à la combinaison optimale entre le sable de dune (SD) et le filler de béton démolé (FDB). En effet, la finesse des particules de FDB et de SD permet un meilleur remplissage des vides dans la matrice cimentaire, réduisant ainsi la porosité globale du mortier et améliorant la transmission des ondes ultrasonores.

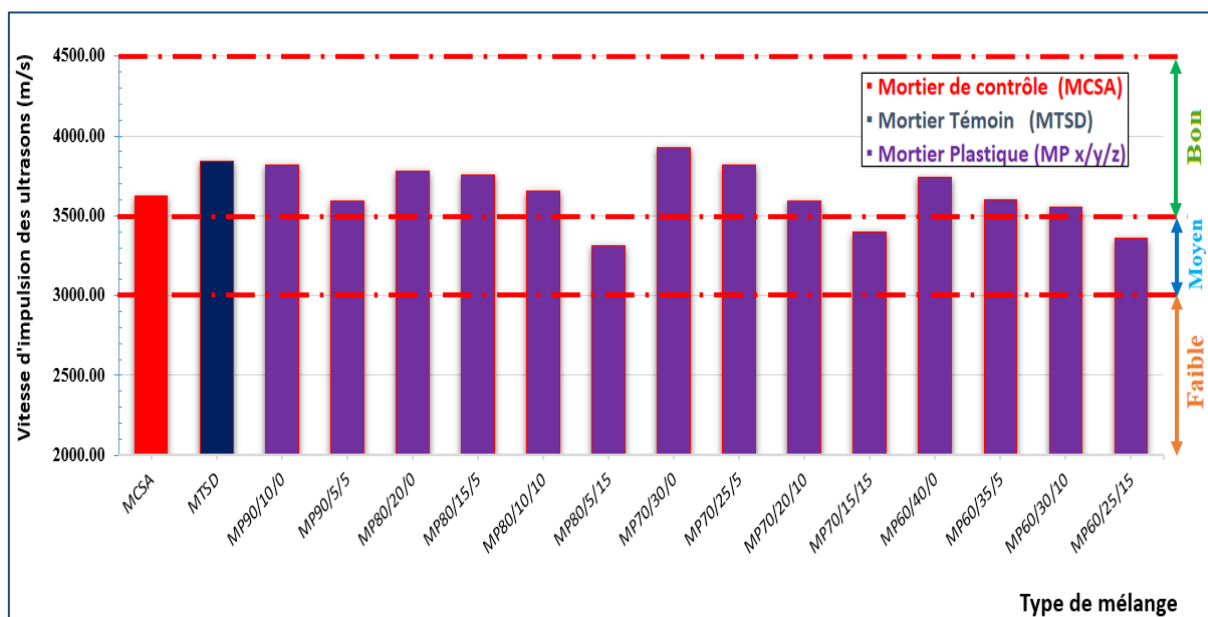


Figure III-5 Vitesse de propagation des ondes ultrasonores (UPV) des mortiers étudiés.

Une diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores a été observée pour les mortiers $MP_{80/5/15}$ et $MP_{60/25/15}$, contenant respectivement 5 % de FDB et 15 % de granulés plastiques (GP), ainsi que 25 % de FDB et 15 % de GP, en comparaison avec les mortiers de référence MCSA et MTSD. Cette réduction peut être principalement attribuée à la présence de granulés plastiques, dont la répartition aléatoire dans la matrice cimentaire favorise la formation de zones de discontinuités ou « nids », ce qui entraîne une augmentation de la porosité globale. En effet, la faible adhérence des GP à la pâte cimentaire, combinée à leur faible densité, génère des vides à l'interface granulé-matrice, altérant ainsi la compacité du matériau et ralentissant la propagation des ondes ultrasonores.

Ces observations sont en accord avec les résultats des essais de compression présentés dans la Figure III-4, où l'on constate que les mortiers présentant des vitesses UPV plus élevées sont également ceux affichant les meilleures résistances mécaniques. Cette corrélation confirme que la compacité et la densité interne du mortier influencent à la fois la résistance mécanique et la propagation des ondes ultrasonores.

III.3.4 Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau désigne la quantité d'eau qu'un matériau composite immergé absorbe pendant une durée déterminée. Elle permet d'évaluer la capacité du matériau, à l'état insaturé, à laisser pénétrer l'eau à travers ses pores, éléments clés du processus d'infiltration en milieu humide [100]. Cet indicateur est essentiel pour juger des performances du composite dans des environnements soumis à l'humidité.

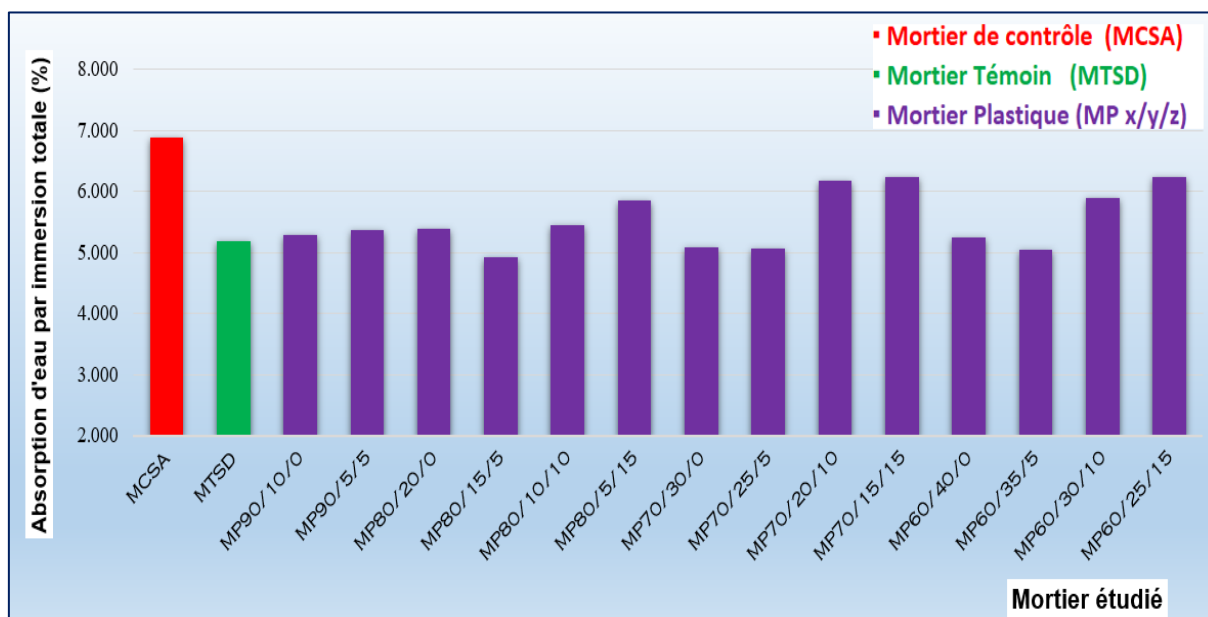


Figure III-6 Valeurs d'absorption d'eau par immersion totale des mortiers étudiés.

Selon la figure III.6, l'absorption d'eau par immersion totale des mortiers à base de sable de dune est globalement inférieure à celle du mortier de contrôle (MCSA). Cette absorption tend à augmenter avec l'accroissement du pourcentage de grains plastiques (GP). Par rapport au mortier de référence (MTSD), une diminution de l'absorption d'eau a été observée pour les formulations $MP_{80/15/5}$, $MP_{70/30/0}$, $MP_{70/25/5}$ et $MP_{60/35/5}$, avec des taux respectifs de -5,63 %, -1,97 %, -2,45 % et -2,79 %. À l'inverse, une augmentation de l'absorption a été enregistrée pour les mortiers $MP_{90/10/0}$, $MP_{90/5/5}$, $MP_{80/20/0}$, $MP_{80/10/10}$, $MP_{80/5/15}$, $MP_{70/20/10}$, $MP_{70/15/15}$, $MP_{60/40/0}$, $MP_{60/30/10}$ et $MP_{60/25/15}$, avec des hausses respectives de 1,91 %, 3,42 %, 3,78 %, 4,66 %, 11,27 %, 15,90 %, 16,76 %, 1,12 %, 11,96 % et 16,82 %.

III.3.5 Retrait/ gonflement

La figure III.7 illustre l'évolution du retrait/gonflement des différentes formulations de mortier en fonction du temps de cure. De manière générale, tous les mortiers présentent une augmentation progressive du gonflement au fil du temps. Toutefois, les mortiers incorporant des proportions croissantes de FBD affichent un gonflement légèrement supérieur à celui du mortier de contrôle et du mortier témoin, en particulier pour les formulations $MP_{90/5/5}$, $MP_{80/10/10}$, $MP_{80/5/15}$, $MP_{70/20/10}$, $MP_{70/15/15}$, $MP_{60/30/10}$ et $MP_{60/25/15}$. Par ailleurs, l'ajout combiné de FBD et de GP semble accentuer le gonflement, ce qui pourrait être attribué à la finesse des matériaux et à leur capacité à retenir l'eau, favorisant ainsi une plus grande perte d'humidité et, par conséquent, un retrait ultérieur. Ce comportement suggère que les granulés plastiques jouent un rôle bénéfique dans le renforcement des spécimens et le maintien de leur forme géométrique.

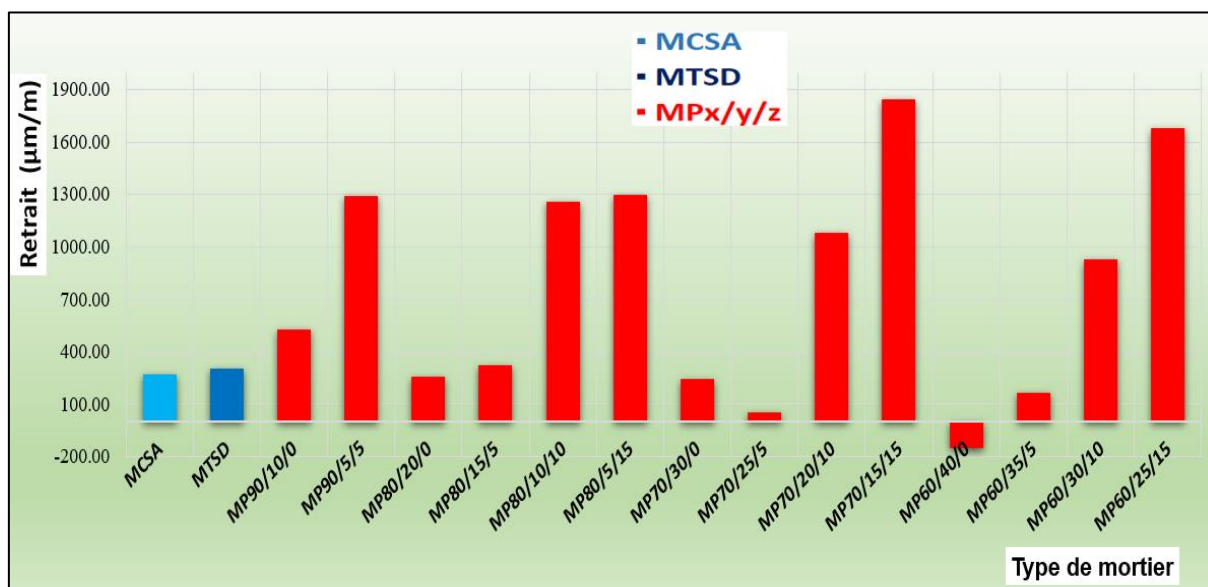


Figure III-7 Effet de l'incorporation de FBD et de GP sur le retrait des mortiers étudiés.

III.3.6 Permeabilite à l'eau

La figure III.8 illustre les valeurs des coefficients de perméabilité K obtenues pour les différents mortiers étudiés permettent d'évaluer leur aptitude à limiter le passage de l'eau ou à travers leur matrice. Une perméabilité plus faible traduit une meilleure compacité du matériau, une moindre connectivité des pores et, par conséquent, une meilleure durabilité face aux agents agressifs (eau, ions chlorure, sulfates, etc....).

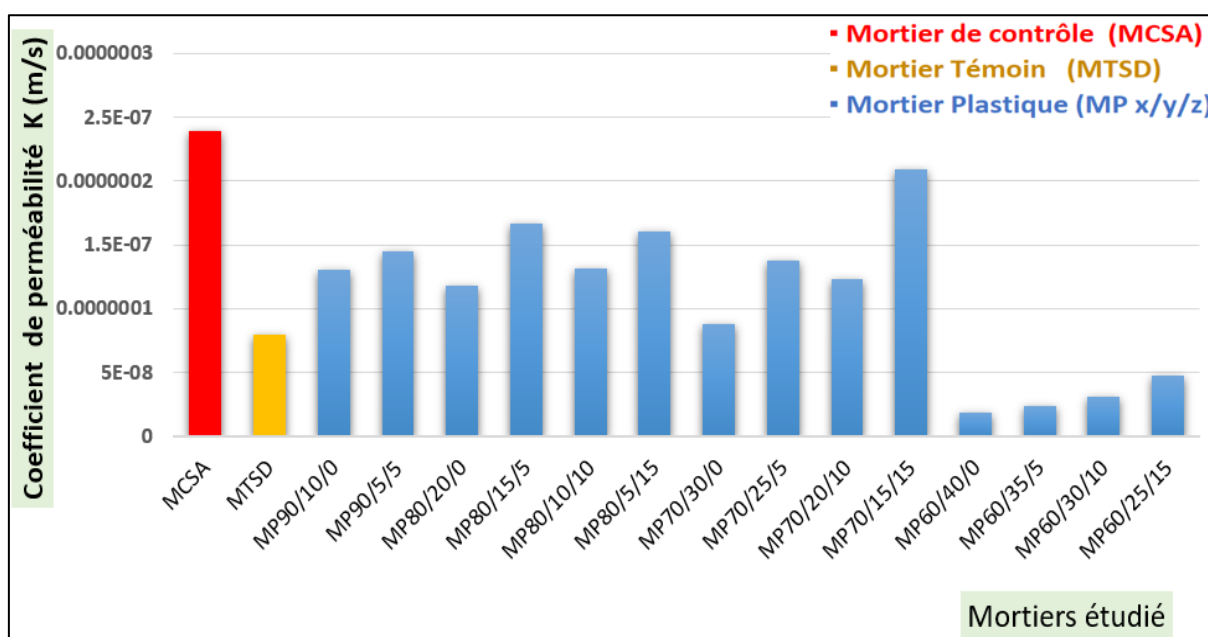


Figure III-8 Valeurs des coefficients de perméabilité hydraulique (K) des mortiers étudiés.

Les mortiers présentant une faible perméabilité (valeurs de K faibles) sont généralement

caractérisés par une microstructure dense et homogène. Cette densité peut être attribuée à un rapport eau/liant réduit, la présence d'ajouts minéraux, qui améliorent la compacité et réduisent la porosité capillaire. À l'inverse, les mortiers ayant des coefficients de perméabilité plus élevés présentent une structure plus poreuse, ce qui peut résulter d'un excès d'eau de gâchage, d'une mauvaise compaction ou d'une faible réactivité des constituants. Ces observations sont cohérentes avec les mécanismes de transport dans les matériaux cimentaires, où la perméabilité dépend essentiellement de la porosité totale, de la taille des pores, et de leur distribution.

En conclusion, l'analyse des coefficients de perméabilité permet non seulement de classer les mortiers en termes de performance face à la pénétration de fluides, mais aussi de juger indirectement de la qualité de leur formulation et de leur mise en œuvre.

III.3.7 Résistance aux chocs

La figure III.9 illustre les résultats des essais de résistance aux chocs effectués sur les différents échantillons testés. On remarque que la capacité d'absorption d'énergie varie significativement en fonction de la substitution de FBD et GP. Les matériaux renforcés présentent une amélioration notable de leur résistance, traduisant une meilleure dissipation de l'énergie lors de l'impact. Cette performance peut être attribuée à une microstructure plus homogène et à une meilleure cohésion entre les phases. En revanche, les matériaux non traités ou contenant des défauts internes montrent une fragilité accrue, se manifestant par une rupture plus rapide sous l'effet du choc.

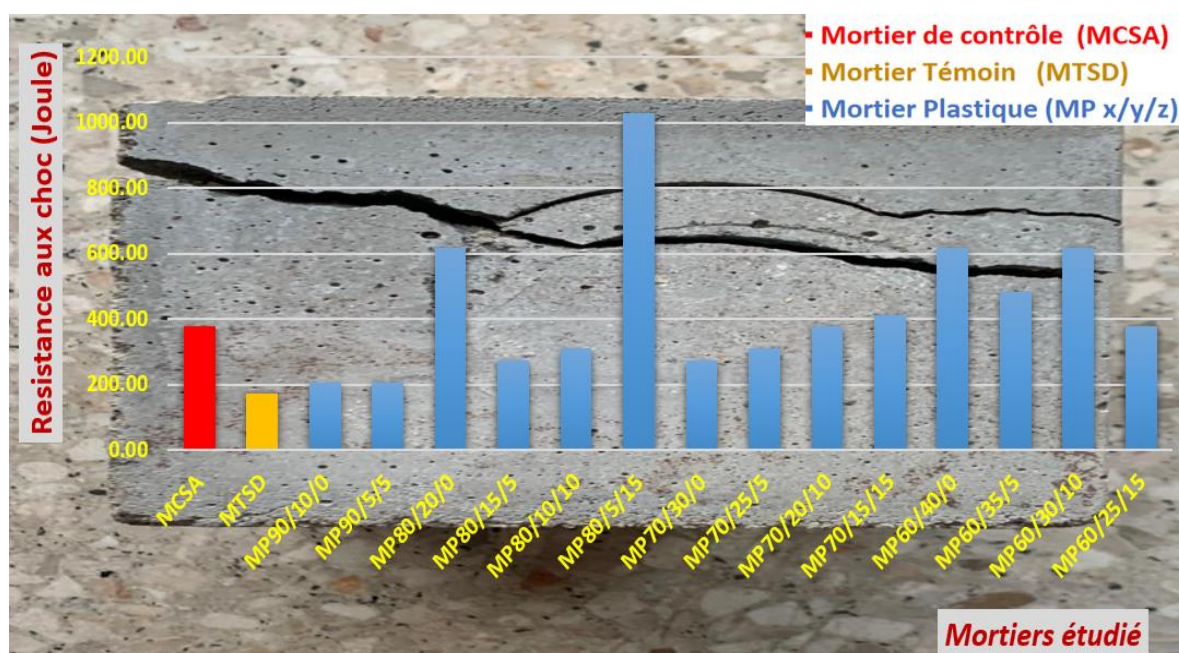


Figure III-9 Résistance aux chocs des mortiers étudiés à 28 jours de cure.

Ces résultats confirment l'influence des paramètres microstructuraux et de fabrication sur le comportement dynamique des matériaux.

D'autre part, la figure III.9 montre que les mortiers MP80/20/0, MP80/5/15, MP60/40/0 et MP60/30/10 présentent une résistance aux chocs nettement supérieure à celle des autres formulations, y compris les mortiers de référence MCSA et MTSD. Cette amélioration s'explique par la synergie entre les composants recyclés, notamment le filler de béton de démolition et les granulés plastiques, qui confèrent au matériau une meilleure capacité d'absorption d'énergie. Cette technique de formulation permet ainsi d'améliorer la ténacité du mortier, le rendant plus apte à résister aux sollicitations dynamiques, ce qui représente un atout majeur pour des applications en zones à risques ou soumises à des contraintes d'impact.

III.4 CONCLUSION

L'analyse approfondie des propriétés physico-mécaniques des mortiers formulés à partir de différents taux de substitution du sable de dune par du filler de béton démolé (FBD) et de granulés plastiques (GP) a mis en évidence des effets contrastés selon les caractéristiques étudiées.

Sur le plan de l'ouvrabilité, l'ajout de FBD entraîne une diminution de l'étalement, traduisant une réduction de la fluidité. Néanmoins, la plupart des formulations conservent une consistance plastique acceptable, notamment le mortier MP90/5/5, qui combine de bonnes performances d'étalement et une composition équilibrée.

Concernant la masse volumique à l'état frais, une baisse progressive est observée avec l'augmentation du pourcentage de GP, en raison de leur faible densité. Cette tendance influence directement la compacité du mortier, mais certaines formulations (comme MP90/5/5 et MP80/15/5) présentent encore des densités élevées.

Les résultats des essais mécaniques montrent que l'incorporation modérée de FBD peut améliorer la résistance à la flexion et la résistance à la compression, comme le démontrent les formulations MP90/10/0 et MP80/20/0. En revanche, une teneur élevée en GP tend à altérer les performances mécaniques, principalement en raison de leur faible adhérence à la matrice cimentaire et de la porosité additionnelle qu'ils introduisent.

L'analyse par ultrasons (UPV) confirme cette tendance : les formulations contenant des taux élevés de GP présentent une vitesse de propagation réduite, ce qui corrobore l'existence de défauts internes liés à la présence de vides et à une compacité moindre.

En ce qui concerne l'absorption d'eau, les formulations riches en GP enregistrent des taux plus élevés, soulignant l'effet poreux de ces ajouts. Toutefois, certaines compositions à faible teneur en GP affichent une absorption comparable, voire inférieure, à celle du mortier de référence, montrant qu'un dosage optimisé peut limiter les effets négatifs.

Enfin, l'étude du retrait/gonflement montre une tendance générale à l'augmentation du gonflement avec le temps, en particulier dans les formulations à forte teneur en FBD et GP. Ce comportement semble lié à la finesse des matériaux et à leur capacité à retenir l'eau, influençant le comportement hygrométrique des mortiers. Cependant, les GP contribuent également au maintien de la forme géométrique, jouant un rôle stabilisateur dans la matrice cimentaire.

En somme, l'utilisation combinée de FBD et de GP dans les mortiers présente un compromis entre performances mécaniques, durabilité et comportement au retrait, à condition de maîtriser finement les proportions de substitution. Des dosages modérés permettent d'atteindre un bon équilibre entre propriétés physiques et mécaniques, tout en valorisant des déchets dans une optique de durabilité environnementale.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES & RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

Ces travaux ont principalement exploré la faisabilité de valoriser divers types de déchets, notamment les dunes de sable, les résidus de béton provenant de démolitions, ainsi que les déchets plastiques. L'objectif était d'intégrer ces matériaux dans la fabrication de mortier plastique durable, cet mortier est formulé comme suite:

1. Formulations de mortier de contrôle composées, de 100 % de sable alluvionnaire, ciment et de l'eau potable, pour le gâchage.
2. Formulations de mortier de contrôle composées, de 100 % de sable de dune, ciment et de l'eau potable, pour le gâchage.
3. Quatorze formulations de mortier ont été composées avec différentes proportions, allant de 60 à 90 % de sable de dunes et de 0 à 40 % de filler de béton démolie, par pas de substitution de 5 % et l'ajout de graine plastique des proportions 0 à 15% de pas de 5%, en plus du ciment et de l'eau potable, pour le gâchage.

Les conclusions principales sont synthétisées comme suit :

Cette étude a démontré la faisabilité et la pertinence de valoriser des déchets abondants et sous-exploités en Algérie, notamment le sable de dunes, les résidus de béton issus de démolitions, ainsi que les déchets plastiques, dans le cadre de la fabrication de mortiers plastiques durables. Trois séries de formulations ont été développées : des mortiers de référence à base de sable alluvionnaire ou de sable de dunes, et quatorze formulations combinant différentes proportions de sable de dunes (60 à 90 %), de filler de béton démoli (0 à 40 %, par pas de 5 %) et de granulés plastiques (0 à 15 %, par pas de 5 %).

Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel technique de ces matériaux alternatifs. Certains mélanges, tels que MP90/10/0, MP80/5/15 ou MP60/40/0, se sont distingués par de bonnes performances physico-mécaniques, notamment en termes de résistance à la compression, à la flexion, aux chocs et à la durabilité. Ces performances, combinées à une réduction significative de l'empreinte environnementale, confirment la viabilité de ces formulations pour des applications dans la construction, tout en contribuant à une économie circulaire.

Recommandations

À la lumière de cette étude, plusieurs pistes de recherche se dessinent pour optimiser l'usage du sable de dune, du filler de béton démolé et des granulats plastiques dans les éco-mortiers. Il est recommandé de poursuivre les investigations sur leurs propriétés mécaniques, chimiques et thermiques, en mettant l'accent sur l'optimisation des dosages pour renforcer la durabilité, notamment dans des environnements chauds ou agressifs.

Des études à long terme sur la résistance aux cycles gel-dégel, à l'abrasion et aux attaques chimiques sont également nécessaires pour évaluer leur comportement en conditions réelles. Par ailleurs, l'adoption de technologies avancées de caractérisation et de modélisation pourrait permettre une meilleure compréhension des interactions entre les composants du mortier.

En conclusion, ces recherches sont essentielles pour faire progresser les pratiques de construction durable. Elles permettront de valoriser efficacement les ressources locales et les déchets, tout en réduisant l'empreinte environnementale des matériaux de construction.

Références bibliographiques

- [1] Pr D, Zerig T. Contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de sable de dune avec ajouts. 2024.
- [2] Site W. Etapes de fabrication du ciment. <https://www.facebook.com/watch/?v=473778313163610> 2010. https://www.google.com/search?q=Étapes+de+la+fabrication+du+ciment.&sca_esv=0625c367a110485f&hl=ar&biw=1280&bih=551&udm=2&sxsrf=AHTn8zqs-z5PIbPL4udkBVm-Y4_qfS6PHQ%3A1744823435602&ei=i-T_Z7-_JMy9i-gP77PNwAg&ved=0ahUKEwj_sMzohd2MAxXM3gIHHe9ZE4gQ4dUDCBE&uact
- [3] Yacine A. Thèse de Doctorat en Science Influence de l'ajout de déchets de céramique broyés sur les performances des mortiers à base de sable de dune. Polytech Ec Natl 2018.
- [4] Elhaj Guesmia D. Comportement t d'un mélange Tuf -Sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques. 2019.
- [5] Zerig T, Aidoud A, Belachia M, Djedid T, Abbas M. Combined sand eco-mortar reinforced with polyethylene Terephthalate: Behavior and optimization using RSM method. *Constr Build Mater* 2023;404:133160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133160>.
- [6] Al-Soud MS, Al-Shakarchi YJ. Stabilization of Baiji sand dunes by petroleum residues. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2020;870. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012081>.
- [7] Meftah N, Hani A, Merdas A, Sadik C, Sdiri A. A holistic approach towards characterizing the El-Oued siliceous sand (eastern Algeria) for potential industrial applications. *Arab J Geosci* 2021;14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08591-1>.
- [8] Yan W, Wu G, Dong Z. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model. *Constr Build Mater* 2019;226:469–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287>.
- [9] Park S, Lee E, Ko J, Yoo J, Kim Y. Rheological properties of concrete using dune sand. *Constr Build Mater* 2018;172:685–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.192>.
- [10] Bédérina M, Khenfer MM, Dheilily RM, Quéneudec M. Reuse of local sand: Effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cem Concr Res* 2005;35:1172–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.006>.
- [11] Gee, G.W. and Or, D. (2002) Particle Size Analysis. In Dane, J.H. and Topp, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, 255-293. - References - Scientific Research Publishing n.d. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1612861> (accessed April 17, 2025).
- [12] Sayhia B. Etude Physique et Structurale des Échantillons de Sable Prises de la Région de Sidi Slimane et la Région de Touggourt. Université Kasdi Merbah - OUARGLA, 2023.
- [13] Mechri ML, Chihi S, Mahdadi N, Beddiaf S. Diagnosis of the heating effect on the electrical resistivity of Ouargla (Algeria) dunes sand using XRD patterns and FTIR spectra. *J African Earth Sci* 2017;125:18–26. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.007>.
- [14] Kumara GHAI, Hayano K, Ogiwara K. Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel. *Int J GEOMATE* 2012;3:290–7. <https://doi.org/10.21660/2012.5.1261>.
- [15] Sdiri A, Higashi T, Hatta T, Jamoussi F, Tase N. Mineralogical and spectroscopic characterization, and potential environmental use of limestone from the Abiod formation, Tunisia. *Environ Earth Sci* 2010;61:1275–87. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0450-5>.
- [16] Saleh NJ, Ibrahim RI, Salman AD. Characterization of nano-silica prepared from local silica sand and its application in cement mortar using optimization technique. *Adv Powder*

- Technol 2015;26:1123–33. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.05.008>.
- [17] Diago M, Iniesta AC, Soum-Glaude A, Calvet N. Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology. *Appl Energy* 2018;216:402–13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.106>.
- [18] Elipe MGM, López-Querol S. Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction - The State-of-the-art. *Constr Build Mater* 2014;73:728–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008>.
- [19] Meftah N, Hani A, Merdas A. Extraction and Physicochemical Characterization of Highly-pure Amorphous Silica Nanoparticles from Locally Available Dunes Sand. *Chem Africa* 2023. <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00688-2>.
- [20] Benabed B, Kadri EH, Azzouz L, Kenai S. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cem Concr Compos* 2012;34:1167–73. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>.
- [21] Bhagat G V., Savoikar PP. Durability related properties of cement composites containing thermoplastic aggregates – A review. *J Build Eng* 2022;53:104565. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104565>.
- [22] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2016;83:98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.
- [23] Mallat A, Alliche A. Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system. *Constr Build Mater* 2011;25:1587–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.017>.
- [24] Kawashima S, Shah SP. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cem Concr Compos* 2011;33:201–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>.
- [25] Ramakrishna G, Sundararajan T. Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study. *Cem Concr Compos* 2005;27:547–53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>.
- [26] Pacheco-Torgal F, Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Constr Build Mater* 2011;25:575–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.
- [27] Shi Z. Green manufacturing of silicate materials using desert sand as a raw-material resource. *Constr Build Mater* 2022;338:127539. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127539>.
- [28] Pastore G, Baird T, Vermeesch P, Resentini A, Garzanti E. Provenance and recycling of Sahara Desert sand. *Earth-Science Rev* 2021;216:103606. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103606>.
- [29] Aidoud A, Bencheikh M, Khaldi N, Herga IMA. Mortar Based on Dune Sand and Substitute Wood Sawdust: Physico-Mechanical Characterization and Relationship Between Properties in Young Age. *Ann Chim Sci Des Mater* 2021;45:447–53. <https://doi.org/10.18280/acsm.450603>.
- [30] Guettala S, Mezghiche B. Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Constr Build Mater* 2011;25:1263–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.026>.
- [31] Abadou Y, Mitiche-Kettab R, Ghrieb A. Ceramic waste influence on dune sand mortar performance. *Constr Build Mater* 2016;125:703–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.083>.
- [32] Abu Seif ESS, Sonbul AR. Geotechnical performance of sandy bricks made with fine aggregates of sand dunes, Saudi Arabia. *Arab J Geosci* 2019;12. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4345-9>.

- [33] Pastore G, Baird T, Vermeesch P, Resentini A, Garzanti E, Ren QX, et al. Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates. *Constr Build Mater* 2020;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>.
- [34] Cheboub T, Senhadji Y, Khelafi H, Escadeillas G. Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate. *J Clean Prod* 2020;249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119406>.
- [35] Djedid T, Mani M, Ouakouak A, Guettala A. Effect of varying silica-limestone sand fines on the physical-mechanical performance of concrete. *Frat Ed Integrita Strutt* 2022;16:580–91. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.38>.
- [36] Djedid T, Mani M, Guettala A, Hima A. Analysis of workability, mechanical strength and durability by the FT-IR method of concrete based on silica-limestone sand preserved in aggressive environments. *Frat Ed Integrita Strutt* 2021;15:566–79. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.37>.
- [37] Aidoud A, Bencheick M, Boukour S. Valuation of Rubber Waste and Dune Sand: Mortar for Construction and Environmental Protection. *Mater Geoenvironment* 2022;0:1–11. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2021-0007>.
- [38] Penacho P, De Brito J, Rosário Veiga M. Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate. *Cem Concr Compos* 2014;50:47–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.007>.
- [39] Mohammed H, Sadique M, Shaw A, Bras A. The influence of incorporating plastic within concrete and the potential use of microwave curing; A review. *J Build Eng* 2020;32:101824. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101824>.
- [40] Almeshal I, Tayeh BA, Alyousef R, Alabduljabbar H, Mustafa Mohamed A, Alaskar A. Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review. *Constr Build Mater* 2020;253:119146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146>.
- [41] Babafemi AJ, Šavija B, Paul SC, Anggraini V. Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review. *Sustain* 2018;10. <https://doi.org/10.3390/su10113875>.
- [42] Saikia N, De Brito J. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Constr Build Mater* 2014;52:236–44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>.
- [43] Arapack FR. Types de plastiques: comment les différencier 2020. <https://doi.org/https://arapack.fr/classification-des-plastiques/>.
- [44] Khushefati WH, Demirboğa R, Farhan KZ. Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites—A review. *Clean Mater* 2022;5. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100127>.
- [45] Sartori I, Hestnes AG. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy Build* 2007;39:249–57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>.
- [46] Albano C, Camacho N, Hernández M, Matheus A, Gutiérrez A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Manag* 2009;29:2707–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>.
- [47] Sadrmomtazi A, Dolati-Milehsara S, Lotfi-Omran O, Sadeghi-Nik A. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of selfcompacting concrete. *J Clean Prod* 2016;112:2363–73. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.
- [48] Silva R V., De Brito J, Saikia N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cem Concr Compos* 2013;35:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>.
- [49] Correia JR, Lima JS, De Brito J. Post-fire mechanical performance of concrete made with

- selected plastic waste aggregates. *Cem Concr Compos* 2014;53:187–99. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004>.
- [50] Hossain M, Bhowmik P, Shaad K. Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent material. *Progress Agric* 2016;27:383–91. <https://doi.org/10.3329/pa.v27i3.30835>.
- [51] Marzouk OY, Dheilly RM, Queneudec M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Manag* 2007;27:310–8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>.
- [52] Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EAB, Martinelli E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Constr Build Mater* 2014;69:124–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>.
- [53] NBR N-53. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. ABNT-Brazilian Stand 2003:1–8.
- [54] ABNT. NBR NM 53 : Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Assoc Bras Normas Técnicas, Rio Janeiro 2006:8.
- [55] Naël-Redolfi J. Absorption d' eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons. PhD Thesis, Univ Paris-Est 2016.
- [56] NF EN 1097-6. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. *Nf En 1097-6* 2014;33:56.
- [57] EN N 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019.
- [58] Boucedra A, Bederina M, Ghernouti Y. Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates. *Constr Build Mater* 2020;256:119447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>.
- [59] Nadjoua B. GRANULATS RECYCLES DE SUBSTITUTION POUR BETONS HYDRAULIQUES. 2017.
- [60] Oikonomou ND. Recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos* 2005;27:315–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>.
- [61] Cite Internet A focus. <https://www.algerie-focus.com/la-valeur-marchande-des-dechets-en-algerie-atteint-207-milliards-de-dinars-en-2023/> 2023.
- [62] de Andrade Salgado F, de Andrade Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *J Build Eng* 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>.
- [63] Xie J, Chen W, Wang J, Fang C, Zhang B, Liu F. Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete. *Constr Build Mater* 2019;226:345–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>.
- [64] Mistri A, Bhattacharyya SK, Dhami N, Mukherjee A, Barai S V. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Constr Build Mater* 2020;233:117894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117894>.
- [65] Kotwal S, Singh H, Kumar R. Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates. *Mater Today Proc* 2021;48:1032–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.436>.
- [66] Hammoudi A, Moussaceb K, Belebchouche C, Dahmoune F. Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 2019;209:425–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>.
- [67] Ferreira L, De Brito J, Barra M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Mag Concr Res* 2011;63:617–27.

- <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>.
- [68] Quebaud M. Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Université d'Artois, Artois, France. 250 p., 1996.
- [69] Elhadj B. Durabilité des bétons à base du sable de démolition et ajouts minéraux actifs. Thèse Dr 2019.
- [70] Krobba B, Bouhicha M, Kenai S, Courard L. Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and *Stipa tenacissima* microfibers plant. *Constr Build Mater* 2018;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200>.
- [71] Li L, Zhan BJ, Lu J, Poon CS. Systematic evaluation of the effect of replacing river sand by different particle size ranges of fine recycled concrete aggregates (FRCA) in cement mortars. *Constr Build Mater* 2019;209:147–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.044>.
- [72] Kachouh N, El-Hassan H, El-Maaddawy T. Effect of steel fibers on the performance of concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand. *Constr Build Mater* 2019;213:348–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.087>.
- [73] Meftah N, Mahboub MS. Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses. *Silicon* 2020;12:147–53. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00109-5>.
- [74] Liu Y, Li Y, Jiang G. Orthogonal experiment on performance of mortar made with dune sand. *Constr Build Mater* 2020;264:120254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120254>.
- [75] Belferra A, Kriker A, Abboudi S, Bi ST. Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates. *J Clean Prod* 2016;112:3048–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.007>.
- [76] Jesus S, Maia C, Brazão Farinha C, de Brito J, Veiga R. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. *Constr Build Mater* 2019;229:116844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116844>.
- [77] Calcado G, Alves L, Vazquez E, Toledo Filho RD. Construction and demolition waste aggregates: Analysis of the physical and mechanical properties of mortars. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2019;652. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/652/1/012016>.
- [78] Tabsh SW, Abdelfatah AS. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr Build Mater* 2009;23:1163–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>.
- [79] Cabral AEB, Schalch V, Molin DCCD, Ribeiro JLD. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2010;24:421–30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>.
- [80] de Andrade Salgado F, de Andrade Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *J Build Eng* 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104452>.
- [81] Silva R V., De Brito J, Dhir RK. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr Build Mater* 2014;65:201–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- [82] ONA. Agence Nationale des dechetes 2020;23. <https://and.dz/site/wp-content/uploads/RapportPlastique.pdf>.
- [83] CNIS. Centre National de l'Informatique et des Statistiques. <https://www.cnis.fr/> 2020.
- [84] 933-2 NE. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2: détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures 2020.
- [85] NF EN P18-555. Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau

- des sables. 1990.
- [86] 1097-6 NE. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau 2014.
- [87] NF EN P18-598. Granulats Équivalent de sable analyse descripteurs. NORME Eur 1993:1-8.
- [88] 1015-6 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6:détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre 1999. Norme Française 1999.
- [89] IS 13311 (Part 1). Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity. Bur Indian Satandards 1992;1:1-14.
- [90] 1015-11 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci 2019.
- [91] Abid SR, Abdul Hussein ML, Ali SH, Kazem AF. Suggested modified testing techniques to the ACI 544-R repeated drop-weight impact test. *Constr Build Mater* 2020;244:118321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118321>.
- [92] Zerig T, Belachia M, Aidoud A, Meftah N, Djedid T, Abbas M. Statistical analysis using the RSM approach of the physical behavior of green polymerized eco-mortar. *J Clean Prod* 2024;450:141858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141858>.
- [93] Luo FJ, He L, Pan Z, Duan WH, Zhao XL, Collins F. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand. *Constr Build Mater* 2013;47:131-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005>.
- [94] Pereira De Oliveira LA, Castro-Gomes JP. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Constr Build Mater* 2011;25:1712-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [95] Al-hadithi AI. Improving Impact and Mechanical Properties of Gap-Graded Concrete by Adding Waste Plastic Fibers 2014.
- [96] El Ouni MH, Shah SHA, Ali A, Muhammad S, Mahmood MS, Ali B, et al. Mechanical performance, water and chloride permeability of hybrid steel-polypropylene fiber-reinforced recycled aggregate concrete. *Case Stud Constr Mater* 2022;16:e00831. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00831>.
- [97] Das CS, Dey T, Dandapat R, Mukharjee BB, Kumar J. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2018;189:649-59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036>.
- [98] Ali-Boucetta T, Ayat A, Laifa W, Behim M. Treatment of date palm fibres mesh: Influence on the rheological and mechanical properties of fibre-cement composites. *Constr Build Mater* 2021;273:121056. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121056>.
- [99] Tonoli GHD, Belgacem MN, Bras J, Pereira-Da-Silva MA, Rocco Lahr FA, Savastano H. Impact of bleaching pine fibre on the fibre/cement interface. *J Mater Sci* 2012;47:4167-77. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6271-z>.
- [100] Salima B. Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco- composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés. 2017.