



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université de Hamma Lakhder El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Hydraulique et Génie Civil

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Matrieux en génie civil

**Caractérisation et optimisation des propriétés physico-
mécanique d'un mortier à base de sable de dune**

Supervisé par :

Dr. ZERIG Taher

Présenté par :

CHERRAHI Chaima

BEY Mourad

President		M.C.A	Université de Hamma LakhderEl Oued
Examiner	Dr. ZERIG Taher	M.A.A	Université de Hamma LakhderEl Oued
Supervisor		M.C.A	Université de Hamma LakhderEl Oued

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur, **Dr. ZERIG Taher**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail et pour les remarques constructives qu'ils apporteront à son amélioration.

*Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du **Département d'Hydraulique et Génie Civil de l'Université de Hamma Lakhdar El Oued**, qui ont contribué à notre formation académique et scientifique.*

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire, par leurs conseils, leur soutien ou leurs encouragements.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles pour leur amour, leur patience, leur confiance et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours universitaire.

À tous, nous adressons nos sincères remerciements.

Abstract :

This study is part of an initiative to valorize local materials available in the El-Oued region by incorporating them into the formulation of plastic mortars. Faced with the economic and environmental challenges of the construction sector, the use of alternative materials represents a concrete way to preserve natural resources and reduce CO₂ emissions.

The experimental approach is based on the partial substitution of dune sand (DS), extracted from the municipality of Bayadha, with filler from demolition concrete (DCC), combined with the incorporation of polyethylene terephthalate (PE) plastic granules, recovered from recycled mineral water bottles, in proportions of 0, 5, 10, and 15%. The binder used is Portland cement CEM I 42.5 N-SR3, with a water-cement ratio of 0.57.

The mortars obtained were evaluated through tests in their fresh state—spreadability and density—and in their hardened state: compressive, flexural, and impact strength, ultrasonic impulse velocity (UPV), shrinkage, total immersion absorption, and water permeability.

The results show that dune sand is a high-performance raw material, and the resulting mortar surpasses conventional alluvial sand mortar in strength. The introduction of FBD without the addition of PET, particularly the MP50/50/0 formulation, did not significantly degrade mechanical performance. However, progressively increasing the PET granule content leads to a decrease in compressive and flexural strength due to the weak adhesion between the plastic grains and the cementitious matrix, while significantly improving impact resistance. The MP50/35/15 formulation stood out with the best impact performance of all the formulations tested.

Keywords: Plastic mortar · Dune sand · Demolition concrete filler · PET granules · Physico-mechanical properties · El-Oue

Résumé:

Cette étude s'inscrit dans une démarche de valorisation de matériaux locaux disponibles dans la région d'El-Oued, en les intégrant dans la formulation de mortiers plastiques. Face aux enjeux économiques et environnementaux du secteur de la construction, le recours à des matériaux alternatifs représente une voie concrète pour préserver les ressources naturelles et réduire les émissions de CO₂.

La démarche expérimentale repose sur la substitution partielle du sable de dune (SD), extrait de la commune de Bayadha, par du filler issu de béton de démolition (FBD), combinée à une incorporation de granulés plastiques en polyéthylène téréphtalate (GP), récupérés à partir de bouteilles d'eau minérale recyclées, à des proportions de 0, 5, 10 et 15 %. Le liant utilisé est un ciment Portland CEM I 42,5 N-SR3, avec un rapport E/C de 0,57.

Les mortiers obtenus ont été évalués à travers des essais à l'état frais — étalement et masse volumique — et à l'état durci : résistance à la compression, à la flexion et aux chocs, vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV), retrait, absorption par immersion totale et perméabilité à l'eau.

Les résultats montrent que le sable de dune constitue une matière première performante, dont le mortier dépasse en résistance le mortier à sable alluvionnaire classique. L'introduction du FBD sans ajout de PET, notamment la formulation MP50/50/0, n'a pas dégradé significativement les performances mécaniques. En revanche, l'augmentation progressive du taux de granulés PET entraîne une baisse des résistances en compression et en flexion, due à la faible adhérence entre les grains plastiques et la matrice cimentaire, tout en améliorant nettement la résistance aux chocs. La formulation MP50/35/15 s'est distinguée par les meilleures performances aux chocs de toutes les formulations testées.

Mots clés : Mortier plastique · Sable de dune · Filler de béton de démolition · Granulés PET · Propriétés physico-mécaniques · El-Oued

ملخص :

تُعَدّ هذه الدراسة جزءاً من مبادرة تهدف إلى الاستفادة من المواد المحلية المتوفرة في منطقة الوادي، وذلك من خلال دمجها في تركيبات الملاط البلاستيكي. في ظل التحديات الاقتصادية والبيئية التي يواجهها قطاع البناء، يُمثّل استخدام المواد البديلة وسيلةً عمليةً للحفاظ على الموارد الطبيعية والحدّ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

تعتمد الدراسة التجريبية على الاستبدال الجزئي لرمال الكثبان الرملية، المستخرج من بلدية بياضة، بحشو من خرسانة الهدم، بالإضافة إلى دمج حبيبات بلاستيكية من البولي إيثيلين تيريفثالات، مُستخلصة من زجاجات المياه المعدنية المُعاد تدويرها، بنسب 0، 5، 10، و 15%. المادة الرابطة المستخدمة هي أسمنت بورتلاند CEM I 42.5 N-SR3، بنسبة ماء إلى أسمنت تبلغ 0.57.

تم تقييم الملاط الناتج من خلال اختبارات في حالته الطرية (قابلية الانتشار والكثافة) وفي حالته المتصلبة (مقاومة الضغط، ومقاومة الانحناء، ومقاومة الصدم، وسرعة النضج فوق الصوتية، والانكماش، وامتصاص الماء الكلي، ونفاذية الماء)

تُظهر النتائج أن رمل الكثبان الرملية مادة خام عالية الأداء، وأن الملاط الناتج يتفوق على ملاط الرمل الطمي التقليدي من حيث المقاومة. لم يُؤدّ استخدام مادة FBD دون إضافة PET، وخاصةً تركيبة MP50/50/0، إلى تدهور ملحوظ في الأداء الميكانيكي. مع ذلك، فإن الزيادة التدريجية في محتوى حبيبات PET تؤدي إلى انخفاض في مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء نتيجة ضعف التماسك بين الحبيبات البلاستيكية والمصفوفة الأسمنتية، بينما تُحسّن بشكل ملحوظ مقاومة الصدم. وقد برزت تركيبة MP50/35/15 بأفضل أداء في مقاومة الصدم من بين جميع التركيبات المختبرة.

الكلمات المفتاحية: ملاط بلاستيكي · رمل الكثبان الرملية · حشو الخرسانة للهدم · حبيبات البولي إيثيلين تيريفثالات · الخصائص الفيزيائية والميكانيكية · الوادي

Liste des Abréviations

SD : **S**able de **D**une.

FDB : **F**ille de **B**éton **D**émolie.

GP : **G**raîne **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 : **A**bsorption d'eau.

Rc : **R**ésistance de **c**ompression.

Rf : **R**ésistance de **f**lexion.

EN : **N**orme **E**uropéenne.

NF P : **N**orme **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**

ASTM : **A**merican **S**ociety for **T**esting and **M**aterials.

Liste des Figures

Figure I.1 : Étapes de la fabrication du ciment.	4
Figure I.2 : Composition du ciment Portland (CPA – CEM I)	4
Figure I.3 : Les sables des dunes mouvants.	5
Figure I.4 : : Carte de l'Algérie montrant la localisation des SD d'El-Oued.....	6
Figure I.5 : Modèles XRD des échantillons de sable d'El-Oued.	6
Figure I.6 : Caractérisation chimique par EDX des constituants du sable de dune	7
Figure I.7 : courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued	9
Figure I.8 : Résultats des essais de résistance à la compression (MPa) à 3, 7 et 28 jours pour différentes formulations (Contrôle, CS/RS, CS/DS, CS/RS/DS).	10
Figure I.9 : Équation de la réaction de polycondensation du PET	12
Figure I.10 : Déchets de plastique	13
Figure I.11 : Classification des plastiques	14
Figure I.12 : Évaluation du comportement d'absorption d'eau des composites cimentaires intégrant des fines de PET.	17
Figure I.13 : Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats.....	19
Figure I.14 : Variation des résistances à la compression des bétons	20
Figure I.15 : Recyclage des déchets	25
Figure I.16 : Comparaison de la consommation annuelle de plastique par habitant en Algérie et dans le monde (en kg).....	26
Figure II.1 : Constituants de la formulation expérimentale	31
Figure II.2 : Tamiseuse utilisée pour l'essai d'analyse granulométrique.	32
Figure II.3 : Courbes granulométriques du SD, FBD et GP.	36
Figure II.4 : Mesure de la masse volumique des granulats utilisés.	37
Figure II.5 : Essai d'équivalent de sable	38
Figure II.6 : Les essais à l'état frais, (1) l'étalement, (2) la masse volumique.	41
Figure II.7 : Coulage du mortier et arasement de la surface des éprouvettes	41
Figure II.8 : Conservation des éprouvettes en cure humide pendant 28 jours	41
Figure II.9 : Méthode de mesure de l'étalement à la table à secousses	43
Figure II.10 : Mesure de la masse du moule vide et rempli de mortier pour le calcul de la masse volumique	44
Figure II.11 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique du mortier étudié	45

Figure II.12 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique.	47
Figure II.13 : Matériels utilisé pour l'essai de traction par flexion à trois points.	48
Figure II.14 : Matériels utilisé pour l'essai de compression	49
Figure II.15 : Le principe expérimental de l'absorption d'eau	50
Figure II.16 : Appareil de mesure de la perméabilité à l'eau sous pression.	50
Figure II.17 : Méthode de mesure de l'essai aux chocs	52
Figure III.1 : Résultats d'étalement des différents mortiers à l'état frais	56
Figure III.2 : Masse volumique à l'état frais des différents mortiers	57
Figure III.3 : Résistance à la flexion des différents mortiers à 28 jours	58
Figure III.4 : Résistance à compression des différents mortiers à 28 jours	60
Figure III.5 : itesse d'impulsion des ultrasons (UPV) des différents mortiers à 28 jours	61
Figure III.6 : Absorption d'eau par immersion totale des différents mortiers à 28 jours	62
Figure III.7: Retrait des différents mortiers à 28 jours.....	63
Figure III.8 : Profondeur de pénétration d'eau des différents mortiers à 28 jours.....	64
Figure III.9 : oefficient de perméabilité des différents mortiers à 28 jours	65
Figure III.10 : Résistance aux chocs des différents mortiers à 28 jours.....	66

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Méthodologie de l'analyse granulométrique et classification des sables [12]	8
Tableau I-2 : Caractéristiques et types des granulats	18
Tableau I-3 : Types des granulats de béton recyclés.....	20
Tableau I-4 : Analyse granulométrique des composants du mortier (Sable de dune, FBD et GP).	34
Tableau I-5 : Module de finesse des composants du mortier (Sable de dune, FBD et GP).	35
Tableau I-6 : Les classifications des sables.	35
Tableau I-7 : Masses volumiques des granulats utilisés.....	37
Tableau I-8 : Résultats de l'équivalent sable des matériaux utilisés.....	39
Tableau I-9 : Les différentes formulations des mortiers plastiques étudiées.....	39
Tableau I-10 : Classification d'étalement NF EN 1015-6 [61].....	43
Tableau I-11 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [63].	45

Sommaire

Remercîments	1
Abstract :	1
Liste des Figures	1
Liste des tableaux	1
Sommaire.....	1
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèse Bibliographique Sur Les Mortiers Renforcés Par Des Déchets Plastiques	
I.1.introduction :	3
I.2. Définition des Matériaux cimentaires :	3
I.2.1. Définition :	3
I.2.2. Ciment Portland :	4
I.3.Sable de dune :	4
I.3.1. Introduction :	4
I.3.2. Définition :	4
I.3.3. Morphologie et analyse EDX :	7
I.3.4. Classification granulaires des sables :	7
I.3.4.1. Remarques Techniques (Observations) :	8
I.3.5. FTIR et répartition granulométrique du sable d'El-Oued :	9
I.3.6. Étude de l'influence des constituants sur les propriétés physico-mécaniques d'un mortier à base de sable de dune :	9
I.3.6.1.Sable de dune une ressource sous-exploitée :	11
I.4.Plastiques Polyéthylène Téréphtalate :	12
I.4.1. Définition :	12
I.4.2. Propriétés mécaniques des composites cimentaires contenant des déchets plastiques :	12
I.4.3. Modes d'incorporation de plastique :	14
I.4.4. Modalités d'incorporation des plastiques :	15
I.4.5. Caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de plastique :	15
I.4.5.1. Performance en compression :	15
I.4.5.2. Comportement en traction et flexion :	15
I.4.5.3. Masse volumique (Densité) :	15
I.4.5.4. Isolation thermique :	15

I.4.5.5. Durabilité et comportement environnemental :	16
I.4.6. Effet du PET sur l'absorption d'eau :	16
I.5. Granulats :	18
I.5.1. Filler de sable recyclé :	18
I.5.2. Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats :	19
I.5.3. Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés :	19
I.5.3.1. Résistance à la compression :	20
I.5.3.2. Résistance à la traction :	20
I.6. Déchet :	21
I.6.1. Impact environnemental des déchets :	21
I.6.1.1. Contamination des ressources hydriques :	21
I.6.1.2. Dégradation de la qualité de l'air :	21
I.6.1.3. Détérioration des propriétés du sol :	21
I.6.1.4. Émission de gaz à effet de serre (GES) :	21
I.6.1.5. Atteinte à la biodiversité :	21
I.6.1.6. Défaillances des systèmes de gestion :	22
I.6.1.7. Épuisement des ressources naturelles :	22
I.6.2. Différents types de déchets :	22
I.6.2.1. Déchets ultimes :	22
I.6.2.2. Déchets inertes :	22
I.6.2.3. Les déchets ménagers :	23
I.6.2.4. Déchets assimilés :	23
I.6.2.5. Déchets verts :	23
I.6.2.6. Déchets organiques (Bio-déchets) :	23
I.6.2.7. Déchets Industriels Banals (DIB) :	23
I.6.2.8. Déchets dangereux :	23
I.6.2.9. Déchets Industriels Spéciaux (DIS) :	24
I.6.2.10. Professionnelle et Synthétique :	24
I.6.2.11. Déchet de béton :	24
I.6.2.12. Déchet plastiques :	25
I.6.2.13. Consommation des plastiques en Algérie :	25
I.7. Collecte des déchets :	26
I.8. Impacts du recyclage sur l'environnement et l'industrie :	26
I.9. Conclusion :	27

Chapitre II : Caracterisation Des Materiaux Utilises Et Methodes Experimentales

II.1. Introduction :	29
II.2. Matériaux utilisés :	31
II.3. Analyse préliminaire des matériaux granulaires :	32
II.3.1. Caractérisation granulométrique des matériaux (NF EN 933-2) :	32
II.3.2. Protocole de l'essai :	32
II.3.2.1. Matériel utilisé :	33
II.3.2.2. Préparation des échantillons :	33
II.3.2.3. Présentation de l'essai :	33
II.3.3. Module de finesse (Norme NA 2607) :	34
II.3.4. Masses volumiques :	36
II.3.4.1. Masse volumique apparente :	36
II.3.4.2. Masse volumique absolue :	36
II.3.5. Mesure de la propreté des granulats :	37
II.3.5.1. Objectif de l'essai :	37
II.3.5.2. Essai d'équivalent de sable :	38
II.4. Protocole d'essai :	39
II.4.1. Conception et réalisation des éprouvettes d'essai :	39
II.4.2. Préparation des échantillons d'essai :	40
II.5. Méthodologie expérimentale :	41
II.5.1. Caractéristiques à l'état frais :	43
II.5.1.1. Ouvrabilité :	43
II.5.1.2. Masse volumique :	44
II.5.2. Caractéristiques à l'état durci :	44
II.5.2.1. Essais d'auscultation dynamique (UPV) :	44
II.5.2.2. Essai du retrait et gonflement :	46
II.5.2.3. Essai de traction par flexion :	47
II.5.2.4. Essai de compression :	48
II.5.2.5. Absorption d'eau par immersion totale :	49
II.5.2.6. Perméabilité à l'eau BS. EN 12390/8 :	50
II.5.2.7. Resistance aux chocs :	51
II.6. Conclusion :	53

Chapitre III : Analyse et discussions des resultats

III.1. Introduction :	55
III.2. Propriétés à l'état frais :	55
III.2.1. Ouvrabilité :	55
III.2.2. Densité à l'état frais :	56
III.3. Propriétés à l'état durci :	57
III.3.1. Résistance à la flexion :	57
III.3.2. Résistance à la compression :	59
III.3.3. Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV) :	60
III.3.4. Absorption d'eau par immersion totale :	61
III.3.5. Retrait/ gonflement :	62
III.3.6. Permeabilite à l'eau :	63
III.3.7. Résistance aux chocs :	65
III.4. CONCLUSION :	67
Conclusions generales & Recommandations	
I. CONCLUSIONS GÉNÉRALES :	69
II. RECOMMANDATIONS :	71
Références bibliographiques.....	73

Introduction générale

La région d'El-Oued est entourée de sable dunaire, et pourtant les chantiers locaux continuent d'importer du sable alluvionnaire depuis des dizaines de kilomètres. En parallèle, les bouteilles PET et les déchets de béton s'accumulent faute de filière de recyclage organisée. Ces deux réalités sont le point de départ de ce travail.

L'objectif est d'évaluer la faisabilité de formuler un mortier à base de sable de dune (SD), partiellement substitué par du filler de béton démolé (FBD) et des granulés plastiques recyclés (GP). Ces matériaux sont abondants localement, peu coûteux, et leur valorisation en construction représente une réponse concrète aux problèmes de rareté des granulats conventionnels et d'accumulation des déchets.

Pour cela, six formulations ont été préparées : deux mortiers de référence — MCSA à base de sable alluvionnaire et MTSD à base de sable de dune — et quatre mortiers plastiques MP combinant du SD (50 %), du FBD (MP50/50/0, MP50/45/5, MP50/40/10, MP50/35/15) et du GP (0-5-10-15 %). Tous ont été soumis à des essais à l'état frais et après 28 jours de cure : étalement, masse volumique, résistance à la compression et à la flexion, UPV, absorption d'eau, perméabilité, retrait et résistance aux chocs.

Les résultats montrent des effets contrastés : si l'ajout de GP dégrade la résistance mécanique classique, il améliore nettement la résistance aux chocs — un résultat qui oriente ce mortier vers des applications spécifiques plutôt que vers un usage structurel général.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres : une synthèse bibliographique sur les matériaux étudiés, la description des méthodes expérimentales, puis l'analyse et la discussion des résultats, suivies des conclusions et recommandations.

***Chapitre I: Synthèse Bibliographique
Sur Les Mortiers Renforcés Par Des
Déchets Plastiques***

I.1.introduction :

La gestion des déchets plastiques et des débris de construction constitue aujourd'hui un défi environnemental majeur, imposant une transition urgente vers une économie circulaire. Dans cette optique, la valorisation de ces sous-produits comme substituts dans les matériaux cimentaires représente une alternative innovante et durable. Cette étude s'inscrit dans cette dynamique en explorant l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sable de dune, particulièrement abondant dans la région d'Oued Souf, par l'incorporation de déchets plastiques recyclés et de granulats de béton recyclé.

Face à l'épuisement des ressources naturelles en agrégats conventionnels et à l'essor croissant du secteur du bâtiment, l'exploitation des ressources locales marginales devient une nécessité technique et économique. Ce chapitre dresse un état de l'art sur les matériaux cimentaires, en examinant l'influence des additifs de récupération sur les performances du mortier. Il analyse également les travaux de recherche antérieurs tout en mettant en lumière le contexte spécifique de l'industrie du béton en Algérie.

I.2. Définition des Matériaux cimentaires :

I.2.1. Définition :

Les matériaux cimentaires sont des liants capables de transformer, par le biais de réactions physiques et chimiques complexes, des éléments en vrac (tels que le sable, les pierres et la maçonnerie) en une structure solide et résistante. Ils se distinguent par leur capacité à durcir en fonction de leur composition chimique et des conditions environnementales (air ou eau), assurant ainsi la cohésion et la stabilité durable des ouvrages de construction [1]

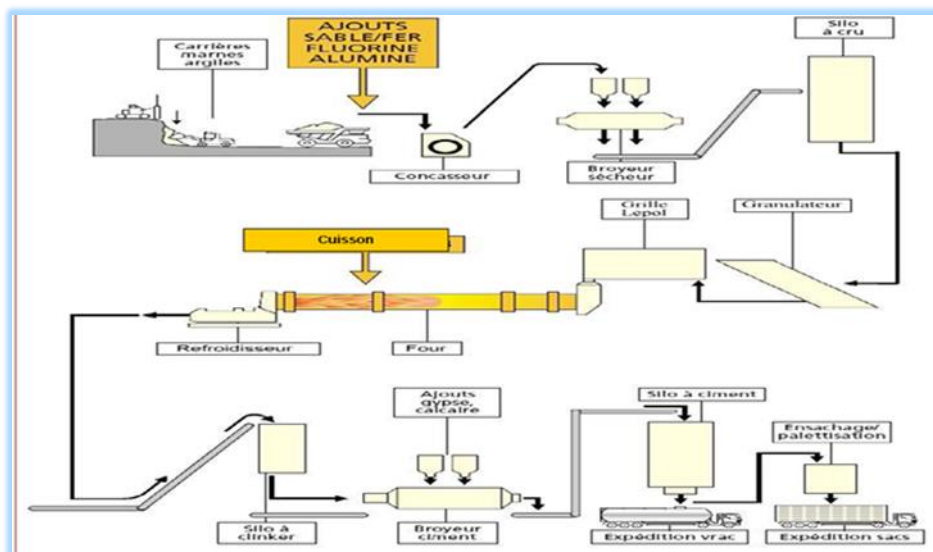
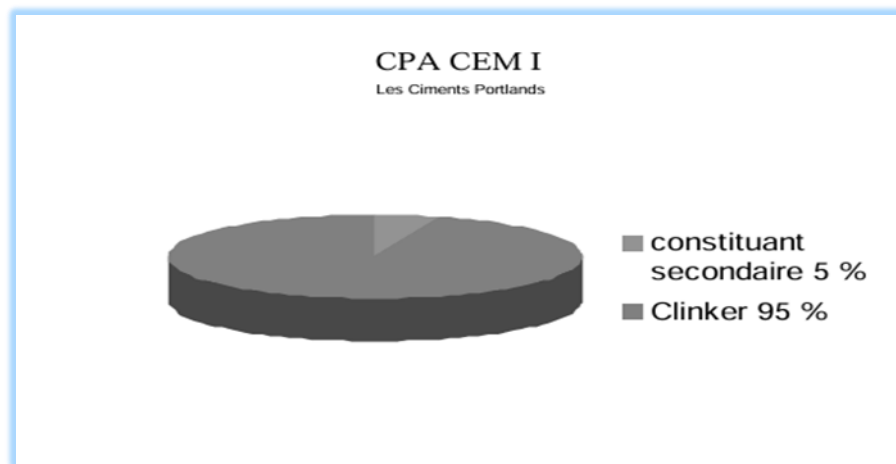


Figure I.1 : Étapes de la fabrication du ciment.[2]**I.2.2. Ciment Portland :**

Le Ciment Portland Artificiel (CPA-CEM I) se définit par sa haute teneur en clinker, laquelle représente au moins 95 % de sa masse totale. Sa fabrication repose sur le broyage conjoint du clinker et d'un agent régulateur de prise, généralement le sulfate de calcium sous forme de gypse ou d'anhydrite. Cette composition peut éventuellement inclure des constituants secondaires (fillers) dans une proportion ne dépassant pas 5 %, conformément aux normes de classification des ciments [3] .

**Figure I.2 : Composition du ciment Portland (CPA – CEM I)[3]****I.3.Sable de dune :****I.3.1. Introduction :**

Les sables dunaires sahariens constituent, depuis plusieurs décennies, un sujet d'étude privilégié dans les domaines géologique et géotechnique. Dès le milieu du XXe siècle, les campagnes de caractérisation menées au sein du Sahara algérien ont mis en évidence une homogénéité minéralogique remarquable à travers les différentes provinces désertiques. Cette constance, tant au niveau de la nature des constituants que de la distribution granulaire, a suscité un intérêt scientifique croissant. Par conséquent, de nombreuses recherches ont été entreprises, tant en Algérie qu'à l'échelle africaine, afin d'explorer le potentiel de ce gisement quasi inépuisable comme matériau de substitution dans le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) [4]

I.3.2. Définition :

Le sable de dune est une ressource naturelle abondante, particulièrement dans les régions sahariennes algériennes, se distinguant par une distribution granulométrique serrée et

une finesse caractéristique. Longtemps sous-exploité, ce matériau représente aujourd'hui une alternative écologique et économique majeure face à l'épuisement des sables d'oued conventionnels. Sur le plan structurel, son intégration judicieuse permet d'améliorer la compacité de la matrice cimentaire en affinant la porosité capillaire et en densifiant l'interface pâte/granulats, ce qui influe positivement sur la durabilité et les performances mécaniques des mortiers et bétons. [5]



Figure I.3 : Les sables des dunes mouvants [6] .

Les dunes bordières ou littorales se forment à la limite supérieure de l'estran, agissant comme un rempart naturel entre la mer et la terre. Leur morphologie est intimement liée à la dynamique marine : la base de ces cordons sableux est directement exposée aux marées hautes et subit une érosion brutale lors des tempêtes. Dans ce milieu, l'équilibre de la dune dépend de l'apport sédimentaire marin et de la résistance aux agressions salines et hydrauliques [4]

L'action du vent exerce une influence prépondérante sur la pédologie des zones arides, où l'accumulation des particules quartzeuses donne naissance à des formations dunaires aux morphologies et dimensions variées [7]

Dans un contexte marqué par l'expansion fulgurante du secteur du bâtiment en zones désertiques, il devient impératif d'approfondir l'étude des processus de genèse de ces sols éoliens. Une analyse rigoureuse des mécanismes d'érosion, de transport et de classification granulaire est, en effet, indispensable pour évaluer l'aptitude de ces matériaux à l'usage constructif. La Figure I.4

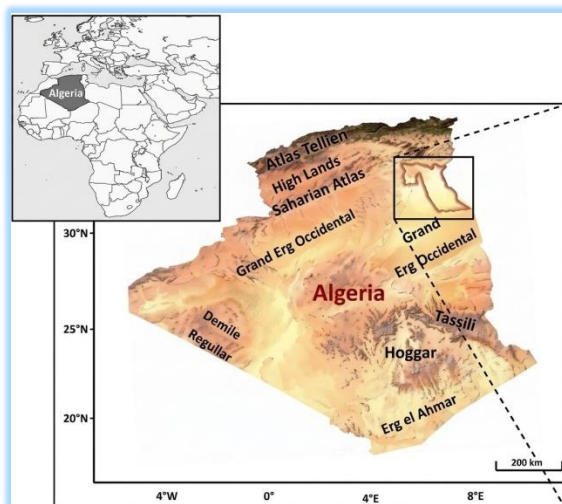


Figure I.4 : : Carte de l'Algérie montrant la localisation des SD d'El-Oued [8]

Présente une cartographie précise de la répartition spatiale de ces massifs sableux au sein de la région d'Oued Souf, illustrant la densité de ces caractéristiques naturelles locales. À l'échelle nationale, le sable dunaire constitue une ressource colossale, couvrant plus de 60 % de la superficie de l'Algérie. Cette disponibilité massive suscite aujourd'hui un intérêt scientifique et technique majeur, positionnant le sable de dune comme une alternative prometteuse et durable aux granulats conventionnels dans les travaux de construction [9-10]

La caractérisation minéralogique par XRD (Figure I.5) révèle la nature cristalline des sables d'El-Oued (S1 à S5). Grâce à l'ajustement de Rietveld basé sur les bases de données JCPDS, une analyse quantitative rigoureuse a été effectuée. Le **quartz α** s'impose comme la phase minérale majeure dans tous les échantillons, avec une concentration maximale de 93,5 % enregistrée dans le sable S1. Cette analyse a également permis d'appréhender les caractéristiques microstructurales essentielles à la compréhension du comportement physico-chimique de ces matériaux. [11]

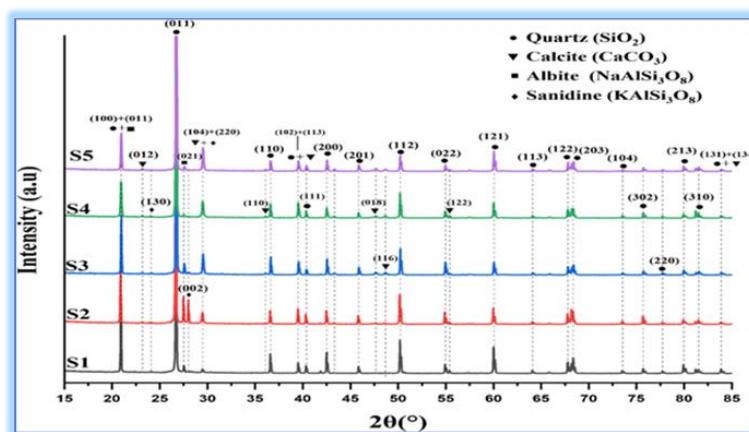


Figure I.5 : Modèles XRD des échantillons de sable d'El-Oued [8].

I.3.3. Morphologie et analyse EDX :

Les spectres de microanalyse élémentaire par énergie dispersive (EDX), illustrés dans la Figure 6, confirment la prédominance de l'oxygène (O) et du silicium (Si) au sein des différents types de grains. Cette signature élémentaire corrobore la forte teneur en silice précédemment révélée par DRX. Par ailleurs, la faible intensité des pics d'aluminium (Al), ne dépassant pas 8,7 %, suggère son incorporation sous forme de traces ou d'impuretés minéralogiques dans la matrice quartzeuse. On note également la présence de pics secondaires tels que le calcium (Ca) et le fer (Fe), reflétant la diversité minérale accessoire des sables d'El-Oued.[8]

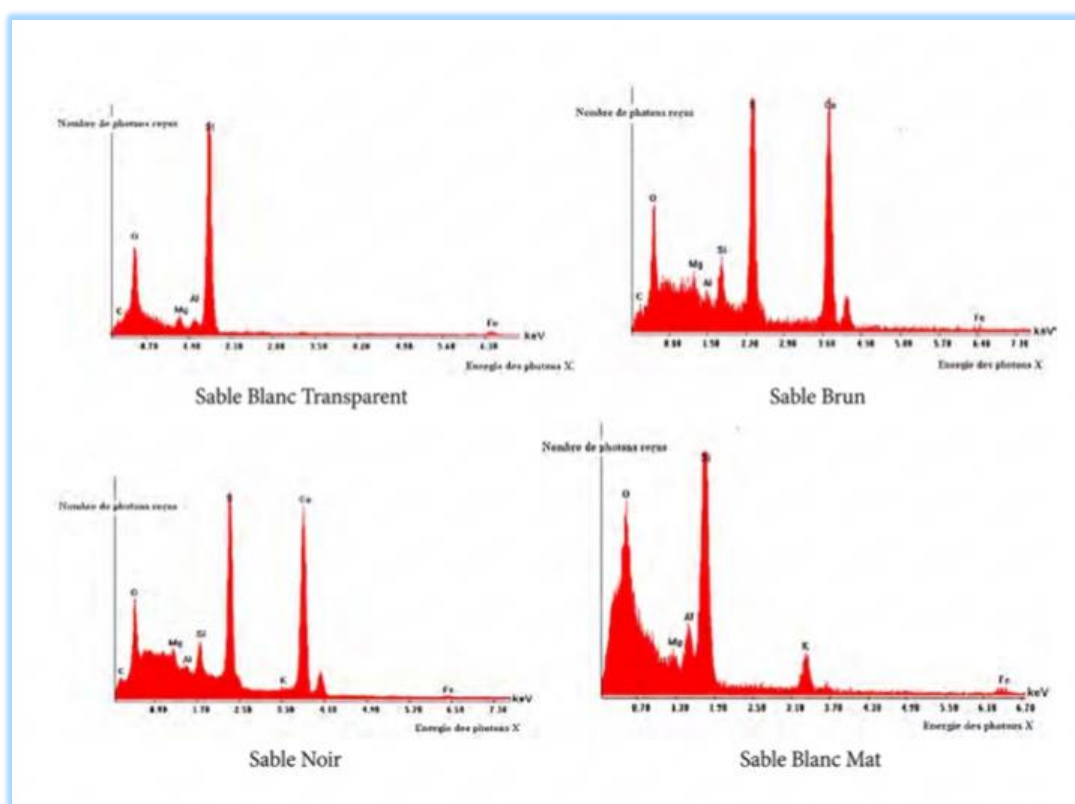


Figure I.6 : Caractérisation chimique par EDX des constituants du sable de dune [12]

I.3.4. Classification granulaires des sables[13] :

L'étude de la distribution dimensionnelle des grains, ou analyse granulométrique, constitue une étape fondamentale pour la caractérisation physique du sable de dune d'El-Oued. Cette opération permet non seulement de définir la classe granulaire du matériau naturel, mais aussi d'évaluer l'homogénéité du mélange après l'incorporation des granulats recyclés issus des déchets de béton. Le passage à travers une série de tamis normalisés, allant de 0,08 mm à 5,00 mm, offre une vision précise de la structure interne du mortier et de sa compacité potentielle à l'état durci

Tableau I-1 : Méthodologie de l'analyse granulométrique et classification des sables [12]

Étape	Opération Technique	Description Procédurale
1	Préparation de l'échantillon	Prélèvement d'une masse précise (P) de sable de dune, suivie d'un séchage complet à l'étuve.
2	Tamissage mécanique	Disposition de l'échantillon sur une colonne de tamis (ouverture de 0,08 à 5,00 mm) soumise à des vibrations.
3	Pesage des refus	Mesure de la masse de matériau retenue sur chaque tamis (refus partiels).
4	Calcul des refus cumulés	Détermination du pourcentage de refus cumulé par rapport à la masse totale initiale (P).
5	Calcul du tamisat	Déduction du pourcentage de passants (Tamisat % = 100% - Refus cumulé %).
6	Classification	Tracé de la courbe granulométrique sur un diagramme semi-logarithmique pour identifier la catégorie du sable.

I.3.4.1. Remarques Techniques (Observations) :**I.3.4.1.1. Classe Granulaire (d/D) :**

Conformément aux normes citées dans le document, le sable de dune d'El-Oued s'inscrit dans la classe 0/5, ce qui confirme son éligibilité en tant que granulat fin pour les mortiers de construction.

I.3.4.1.2. Origine et Valorisation :

L'étude combine deux types de ressources : des granulats naturels (sable de dune) et des granulats recyclés (déchets de béton), favorisant ainsi une approche de construction durable et économique.

I.3.4.1.3. Continuité de la courbe :

La forme de la courbe granulométrique obtenue est un indicateur direct de la porosité ; une courbe continue et bien étalée traduit une meilleure compacité, réduisant ainsi les vides interstitiels dans le mélange final.

I.3.5. FTIR et répartition granulométrique du sable d'El-Oued :

La caractérisation par FTIR (Figure 7) met en évidence l'homogénéité chimique des sables étudiés (S1 à S5). Les spectres obtenus affichent des signatures spectrales quasi identiques, dominées par les vibrations fondamentales de la silice. Plus précisément, les bandes d'absorption situées entre 450 et 1900 cm^{-1} correspondent aux déformations et aux élongations des liaisons silicates (Si-O-Si). Ces résultats corroborent les observations issues de la diffraction des rayons X (DRX) concernant la prédominance du quartz dans les sables d'El-Oued[14-15].

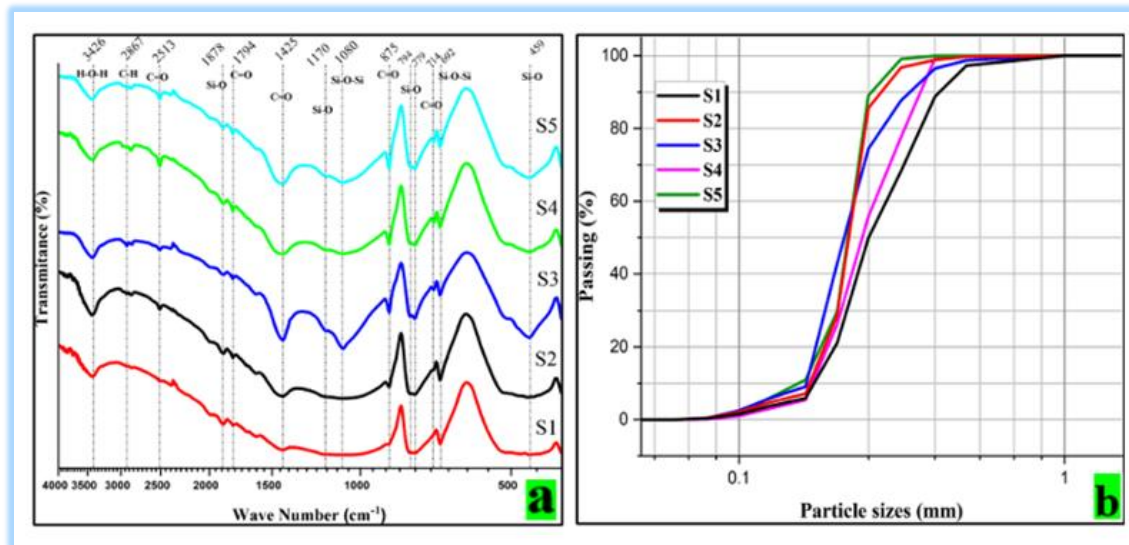


Figure I.7 : courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued [8]

Les résultats du tamisage (Figure 7) confirment la finesse élevée du sable d'El-Oued, avec plus de 93 % des grains concentrés dans l'intervalle [0,16 - 0,315] mm. Cette distribution granulométrique, à la fois étroite et uniforme, est caractéristique des sables éoliens de la région. La quasi-absence de particules fines (inférieures à 0,08 mm) témoigne d'une propreté physique optimale.

Cette configuration granulaire favorise une meilleure compacité du mélange, permettant au sable de combler efficacement les vides entre les granulats plus grossiers, tels que les déchets de béton ou les particules de plastique incorporé dans le mortier [8]

I.3.6. Étude de l'influence des constituants sur les propriétés physico-mécaniques d'un mortier à base de sable de dune :

L'amélioration des performances mécaniques des mortiers repose souvent sur la correction granulaire, une technique consistant à combiner un sable grossier avec un sable fin. Ce processus permet aux particules fines de combler les interstices créés par l'arrangement

des grains plus volumineux, optimisant ainsi la compacité du squelette granulaire. Cette approche a été validée par Bédérina (2005) lors d'une étude sur les ressources locales de Laghouat, démontrant le potentiel du mélange entre sable de dune et sable alluvionnaire [16]

Selon l'étude menée par Benchaa B. et al. (2012), la correction granulaire du sable de dune (DS) par l'ajout d'un sable alluvionnaire (RS) de classe 0,4/5 mm s'avère particulièrement efficace. L'analyse démontre qu'un ratio de mélange RS/DS égal à 1,7 constitue le dosage optimal pour maximiser la compacité du mélange final (RDS), favorisant une meilleure structuration de la matrice [17]

L'évaluation des performances des mortiers autoplaçants formulés à partir de diverses natures de sables révèle une supériorité mécanique des mélanges MSAD vis-à-vis des variantes MSDP et MSD (Figure I.8). Outre les capacités structurales, l'utilisation d'un sable de mélange renforce significativement la durabilité face aux agressions sulfatiques. À l'inverse, la structure intrinsèquement plus poreuse des mortiers de sable de dune (MSD) agit comme un vecteur facilitant la pénétration des agents agressifs. Ce phénomène engendre une dégradation de la matrice liante et une chute des résistances mécaniques, particulièrement lorsque le rapport RS/SD est fixé à 2.

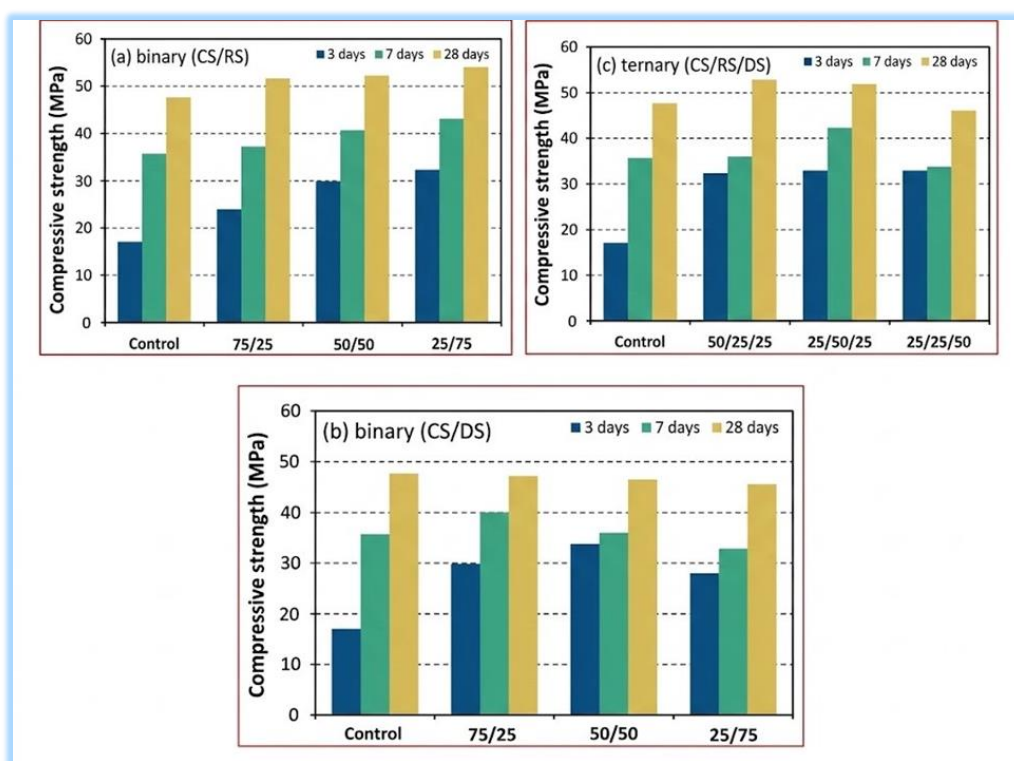


Figure I.8 : Résultats des essais de résistance à la compression (MPa) à 3, 7 et 28 jours pour différentes formulations (Contrôle, CS/RS, CS/DS, CS/RS/DS).[2]

La recherche scientifique s'est largement penchée sur la valorisation des déchets plastiques dans le béton jusqu'en 2020. Cependant, la majorité des études publiées ont privilégié l'analyse des caractéristiques physiques et mécaniques au détriment des aspects de durabilité [17].

L'augmentation de la porosité et la perte de résistance mécanique demeurent des défis majeurs qui nécessitent une investigation plus rigoureuse pour garantir la viabilité de ces éco-matériaux.

Le contrôle de la fissuration dans les composites cimentaires est assuré par la présence de fibres distribuées de façon multidirectionnelle. En agissant comme des ponts de transfert de contraintes sur les surfaces de fracture, elles limitent l'élargissement des fissures et ralentissent le développement initial [18–19]. Cette action synergique entre les fibres et la matrice améliore la ténacité globale du mortier.

L'élaboration de composites de mortier à haute durabilité repose de plus en plus sur la valorisation de fibres de récupération. La littérature scientifique [20–21] rapporte des études probantes sur l'incorporation de fibres métalliques recyclées, de déchets de polypropylène et de nylon, ou encore de mousses transformées. Ces matériaux de seconde vie, substitués aux fibres vierges, permettent d'optimiser les propriétés mécaniques de la matrice cimentaire tout en favorisant la gestion durable des déchets solides.

Parallèlement aux renforts synthétiques, l'intégration de fibres végétales s'impose comme une alternative prometteuse et écologiquement viable. Cette approche, inscrite dans une démarche de construction durable, permet de concevoir des composites cimentaires à faible empreinte carbone tout en valorisant des ressources naturelles renouvelables [22,23].

I.3.6.1. Sable de dune une ressource sous-exploitée :

Malgré son abondance exceptionnelle, le sable des dunes en Algérie demeure une ressource sous-exploitée, alors même qu'il menace les oasis et les palmeraies par l'ensablement. Dans un contexte marqué par la hausse des coûts des matériaux et la raréfaction du sable de rivière, sa valorisation dans le secteur du BTP devient une priorité tant économique qu'environnementale. Ce matériau, caractérisé par sa pureté et sa forte teneur en silice, offre un potentiel majeur pour remplacer les sables conventionnels, dont l'extraction marine est désormais limitée pour des raisons écologiques. De nombreux travaux scientifiques confirment que l'intégration brute du sable dunaire dans les mortiers permet de concevoir des matériaux de construction, tels que les briques, alliant une résistance mécanique optimale à une isolation thermique performante. Face aux défis climatiques des régions arides et à la

nécessité de réduire les prix de revient, le développement de ces composites durables s'impose comme une solution innovante pour une construction à moindre coût. [24]

I.4. Plastiques Polyéthylène Téréphtalate :

I.4.1. Définition :

Le Polyéthylène Téréphtalate (PET) est un polymère thermoplastique appartenant à la famille des polyesters linéaires. Il est obtenu par la réaction de polycondensation entre l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol.

Sur le plan technique et scientifique, le PET se distingue par les caractéristiques suivantes :

- **Propriétés Thermiques :** Il possède une température de fusion élevée de l'ordre de 245°C et une température de transition vitreuse (T_g) située entre 61°C et 77°C.
- **Performance Mécanique :** Initialement utilisé pour les fibres textiles et les films, il est aujourd'hui classé parmi les matières plastiques techniques grâce à sa rigidité et sa résistance, souvent renforcées par des charges comme les fibres de verre.
- **Stabilité Chimique :** Il présente une excellente résistance aux solvants organiques et aux hydrocarbures. Toutefois, il reste sensible à l'hydrolyse (eau chaude) et aux bases concentrées.

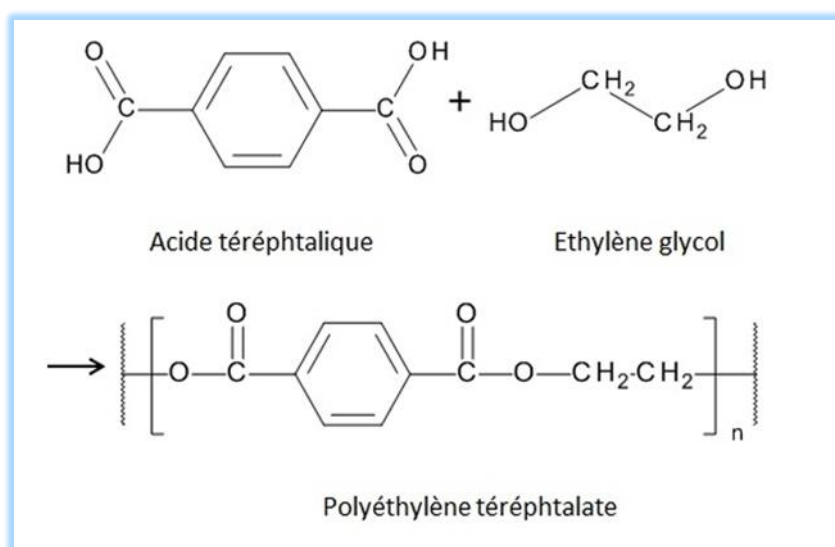


Figure I.9 : Équation de la réaction de polycondensation du PET[25]

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

L'intégration des déchets plastiques (PW) comme substitut partiel aux agrégats, notamment le sable de dune (granulats fins), constitue une approche prometteuse pour les matériaux cimentaires. Toutefois, de nombreux travaux de recherche confirment que les performances mécaniques et physico-chimiques du mélange sont étroitement liées aux

propriétés intrinsèques des granulats plastiques (PWA). Étant des matériaux inertes et non réactifs, leur morphologie, leur rugosité de surface ainsi que leur distribution granulométrique jouent un rôle déterminant dans la qualité de l'adhérence avec la matrice cimentaire, influençant ainsi la durabilité finale du composite [26].



Figure I.10 : Déchets de plastique[27]

Bien que les mécanismes d'interaction interne au sein de la matrice cimentaire présentent des similitudes d'une étude à l'autre, les performances globales du composite affichent une certaine variabilité [28]. Cette divergence des résultats s'explique principalement par la diversité des paramètres expérimentaux, tels que la nature du polymère utilisé, le taux de substitution des granulats, ou encore les caractéristiques intrinsèques du sable de dune employé comme squelette granulaire.

La valorisation des matières plastiques dans les mortiers s'appuie sur les codes d'identification (1 à 7) qui déterminent leur recyclabilité. Dans le cadre des matériaux cimentaires au sable de dune, les types les plus couramment utilisés sont le PEBD (Polyéthylène Basse Densité) et le PET, en raison de leur disponibilité massive comme déchets non biodégradables.[29]

N° de recyclage	Abréviations	Nom du polymère	Utilisation
	PETE ou PET	Polyéthylène téréphthalate	Recyclable pour produire des bouteilles de limonade, des plateaux de traiteur et de boulangerie, des vêtements, des tapis, des pinceaux, etc.
	HDPE ou PEHD	Polyéthylène haute densité	Recyclable pour produire des bouteilles, sacs à provisions, poubelles, tuyaux agricoles, sous-tasses, barrières, équipement de terrains de jeu, bûches plastiques, Conteneur d'acide (le PEHD est un plastique qui résiste aux acides)
	PVC	Polychlorure de vinyle	Recyclable pour produire des tuyaux, des profilés pour la construction (fenêtres, lames de terrasses, portails...) des grillages et des bouteilles non-alimentaires.
	LDPE ou PEBD	Polyéthylène basse densité	Recyclable pour fabriquer des sacs et films plastiques.
	PP	Polypropylène	Recyclable en pièces de voiture, cabarets, tapis et fibres géo-textiles et industrielles.
	PS	Polystyrène	Recyclable dans une grande variété de produits incluant accessoires de bureau, cabarets, jouets, cassettes vidéos et boîtiers, et panneaux isolants.
	OTHER	Autres plastiques, incluant le polycarbonate, l'acrylique et le nylon	

Figure I.11 : Classification des plastiques [29]

I.4.3. Modes d'incorporation de plastique:

L'incorporation des déchets plastiques dans les mortiers cimentaires peut se faire selon deux approches méthodologiques principales. Le choix de la méthode dépend des objectifs de l'étude, qu'il s'agisse d'alléger la structure ou d'améliorer certaines propriétés mécaniques et de durabilité du composite

- **La méthode de Substitution** : Cette méthode consiste à remplacer un pourcentage défini du volume ou de la masse des granulats naturels (généralement le sable) par une quantité équivalente de déchets plastiques. Dans ce cas, le plastique joue le rôle de substitut granulaire, ce qui permet de réduire la consommation de ressources naturelles tout en modifiant la densité du mélange

- **La méthode d'Addition:** L'approche par addition consiste à intégrer les déchets plastiques (souvent sous forme de fibres ou de particules déchiquetées) comme un constituant supplémentaire à la formulation de base du mortier, sans diminuer la quantité des autres composants. Cette technique est principalement utilisée pour renforcer la matrice cimentaire et améliorer son comportement ductile. [29]

I.4.4. Modalités d'incorporation des plastiques:

L'intégration des déchets plastiques dans la matrice cimentaire peut s'effectuer selon plusieurs approches méthodologiques, comme le schématise la Figure I.9 :

- **Substitution granulaire :** Le plastique broyé ou granulé remplace partiellement ou totalement le sable (granulats naturels) .
- **Renforcement fibreux :** L'utilisation de fibres plastiques vise à accroître la ténacité et à limiter la propagation des microfissures.
- **Modification chimique :** Bien que moins fréquente, l'incorporation peut se faire sous forme d'adjuvants pour altérer les propriétés rhéologiques du mélange à l'état frais. [30]

I.4.5. Caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de plastique:

I.4.5.1. Performance en compression :

On observe généralement une corrélation négative entre le taux d'incorporation de plastique et la résistance à la compression. Ce phénomène s'explique par la faible rigidité des particules plastiques par rapport aux granulats minéraux, ce qui affaiblit la structure porteuse du mortier.

I.4.5.2. Comportement en traction et flexion :

Contrairement à la compression, la résistance à la flexion peut être optimisée, notamment lors de l'usage de fibres (polyéthylène téréphtalate - PET ou polypropylène - PP). Ces fibres agissent comme des ponts de transfert de charges, freinant ainsi l'ouverture des fissures.

I.4.5.3. Masse volumique (Densité) :

L'utilisation de polymères légers (tels que l'EPS ou le PET broyé) induit une diminution notable de la densité du matériau final. Cette propriété est particulièrement recherchée pour la confection de mortiers allégés.

I.4.5.4. Isolation thermique :

L'un des avantages majeurs de cette incorporation réside dans la réduction de la conductivité thermique. Le plastique agissant comme un isolant naturel, son intégration améliore considérablement les performances thermiques du mortier, le rendant idéal pour des applications d'économie d'énergie. [30]

I.4.5.5. Durabilité et comportement environnemental :

- **Sur le plan de la durabilité**, le caractère hydrophobe et la stabilité chimique des polymères confèrent aux mortiers une protection accrue contre l'humidité et les agents agressifs.
- **Néanmoins**, la littérature scientifique met en évidence une interface fragile entre les agrégats plastiques et la pâte de ciment. Cette faible adhérence interfaciale, due à la nature non réactive du plastique, peut compromettre la cohésion interne et, par conséquent, les performances mécaniques globales.
- **D'un point de vue écologique**, l'intégration de ces matériaux dans les matrices cimentaires constitue une stratégie de valorisation durable, offrant une alternative concrète pour désengager les décharges et limiter l'empreinte environnementale des déchets polymériques. [30]

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

L'absorption d'eau est l'un des indicateurs essentiels de la durabilité du béton durci. C'est un critère qui mesure l'étendue de la porosité du matériau dans des conditions spécifiques [26]. Les caractéristiques de rétention d'eau et de porosité du béton ont un impact significatif sur sa performance à long terme. Une absorption d'eau plus élevée est synonyme d'une porosité accrue, ce qui augmente la vulnérabilité à la pénétration d'agents agressifs. Ainsi, il est essentiel de déterminer les propriétés d'absorption d'eau des composites cimentaires contenant des déchets plastiques pour assurer leur durabilité à long terme.

L'absorption d'eau des mélanges de béton intégrant des déchets PET a été évaluée par divers chercheurs en utilisant la méthode d'immersion [30, 31, 32, 33, 34, 35]. La plupart des études ont montré une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation des agrégats de déchets plastiques à l'intérieur du béton. Albano et al. [36] ont déclaré que les particules de PET étant planes et allongées par rapport aux granules sphériques de granulats naturels (NA), le mélange hétérogène entraîne une porosité plus élevée, donc une absorption plus élevée. De plus, il y avait une augmentation de l'absorption avec une augmentation de la taille du PET et du rapport eau/ciment. Cela a été attribué aux vides provoqués par une réduction du volume de la pâte due à une teneur en eau plus élevée [31].

L'effet de la forme et de la taille du PET sur le comportement d'absorption du béton, pour des niveaux de remplacement identiques, a été étudié par différents chercheurs [30, 32, 33]. Tous les auteurs consultés semblent s'accorder sur l'existence d'une proportionnalité directe entre les volumes de substitution de gros flocons de PET et les valeurs d'absorption du béton. À la majorité, il a été déclaré que le PET sous forme de palette ne modifiait pas les caractéristiques d'absorption du mélange témoin jusqu'à des taux de remplacement de 15 %. Cependant, des flocons de PET plus fins ont entraîné une augmentation de l'absorption au-delà d'un dosage de 10 % [31, 36].

Silva et al. [31] ont étudié l'influence des conditions de cure sur l'immersion et l'absorption d'eau capillaire du béton mélangé en PET. L'étude préconise que l'absorption d'eau d'un tel béton puisse être réduite en durcissant les échantillons dans un environnement avec des niveaux d'humidité relativement plus élevés. Ce comportement a été attribué à l'amélioration de la microstructure du béton due à une hydratation accrue du ciment par la disponibilité continue d'eau dans les pores de la matrice [31]. Marzouk et al. [37] ont suggéré que les particules de PET peuvent offrir une meilleure durabilité aux mortiers contre la migration de solutions agressives. De plus, l'utilisation d'ajouts pouzzolaniques comme la fumée de silice (SF) et les cendres volantes (FLA) comme substitut partiel du ciment normal (NC) pourrait réduire l'absorption du béton en raison de l'amélioration de la microstructure du mélange par action pouzzolanique [34].

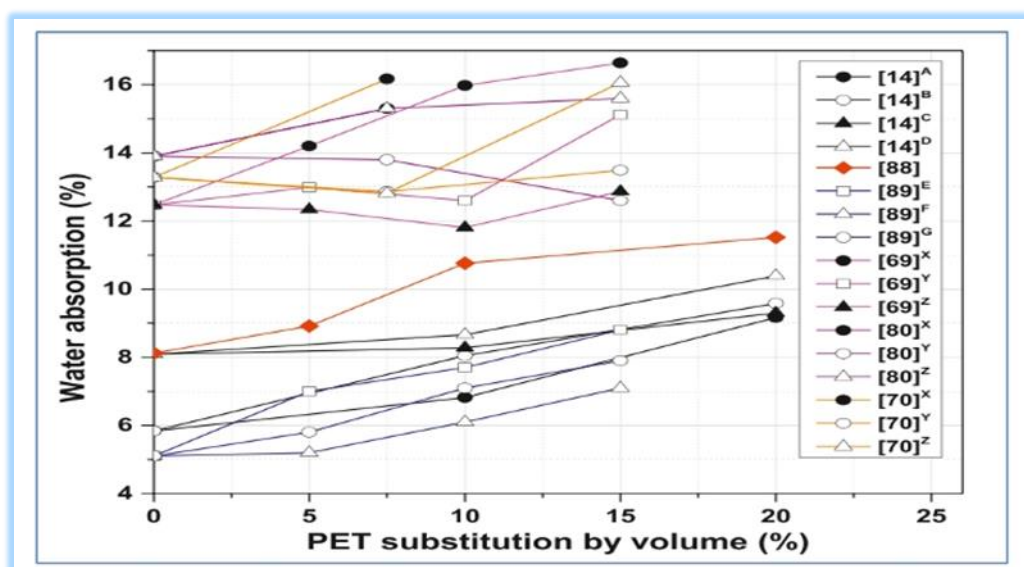


Figure I.12 : Évaluation du comportement d'absorption d'eau des composites cimentaires intégrant des fines de PET. [30,32 ,33,34,36]

I.5.Granulats :

Un granulat est un matériau utilisé en construction, composé de grains de différentes dimensions. Il s'agit de matériaux granulaires dont les dimensions n'excèdent généralement pas 125 mm. Ils sont désignés par leur classe granulaire d/D , où d est la plus petite dimension et D la plus grande. [38]

TableauI-2 : Caractéristiques et types des granulats

Type de Granulat	Origine et Mode de Production	Caractéristiques principales
Granulats Naturels	Proviennent de roches massives ou meubles n'ayant subi qu'une transformation mécanique.	Alluvionnaires : Formes arrondies (roulés) dues à l'érosion, exploités dans les cours d'eau. De roches massives : Formes angulaires obtenues par concassage.
Granulats Artificiels	Résultent d'un procédé industriel incluant des transformations thermiques.	Proviennent de sous-produits industriels (laitiers d'aciérie). Ils servent à endurcir les dallages industriels.
Granulats Recyclés	Obtenus par traitement de matières inorganiques déjà utilisées dans la construction	Issus de la déconstruction d'ouvrages ou de chantiers routiers.

❖ Classification par dimensions :

La segmentation des granulats s'organise en plusieurs catégories distinctes selon la taille de leurs grains :

- Les sables : où $d=0$ et $2 < D < 6,3\text{mm}$
- Les gravillons : où $d \geq 1\text{mm}$ et $2 \leq D \leq 6,3\text{mm}$
- Les graves : où $d=0$ et $2 \leq D \leq 90\text{mm}$
- Les fines : fraction granulaire passant au travers du tamis de 0,063 mm.

I.5.1. Filler de sable recyclé :

Le filler de sable recyclé se définit comme une fraction minérale ultrafine, issue du processus de traitement et de concassage des déchets de construction et de démolition. Intégré comme addition minérale dans les matrices cimentaires (bétons et mortiers), ce matériau joue un rôle crucial dans l'optimisation de la compacité par un effet de remplissage microstructural. Son utilisation permet non seulement d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité

des ouvrages, mais s'inscrit également dans une démarche d'économie circulaire visant à valoriser les ressources locales et à réduire l'empreinte environnementale du secteur du bâtiment. [38]

I.5.2. Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats :

Les investigations menées selon la norme NBR NM 53 mettent en évidence l'efficacité du nettoyage autogène dans la réduction de la capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés, un effet particulièrement marqué après 15 minutes de traitement. Ce phénomène s'explique par l'élimination du mortier résiduel, principal responsable de la porosité. En effet, les résultats montrent une chute de l'absorption de l'ordre de 50 % pour le 'Brita 0' et de 20 % pour le 'Brita 1' (Figure 13), corrélée à une amélioration de la masse volumique apparente (Figure 13)

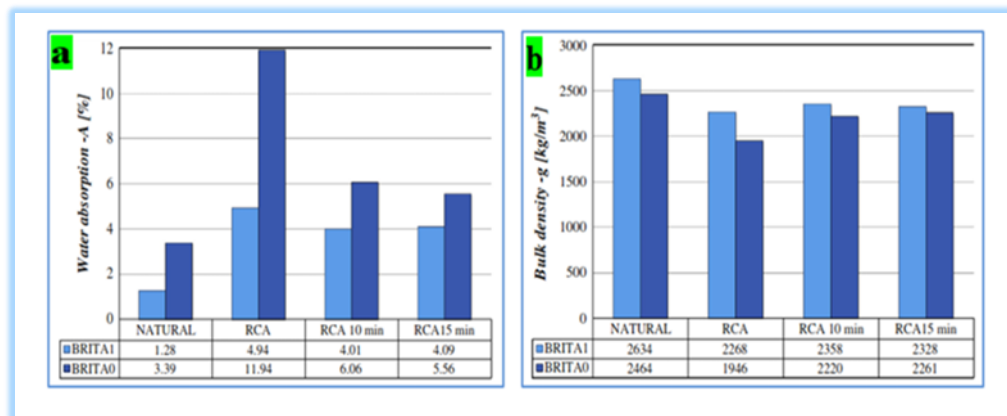


Figure I.13 : Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats [39]

Bien que le contrôle de l'absorption et de la microstructure soit déterminant pour prédire les performances des bétons recyclés [39,40], l'usage du sable recyclé demeure limité. Sa forte teneur en mortier concassé et sa rugosité de surface complexe rendent l'évaluation précise de son absorption difficile via les méthodes normatives conventionnelles [41-42].

I.5.3. Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés :

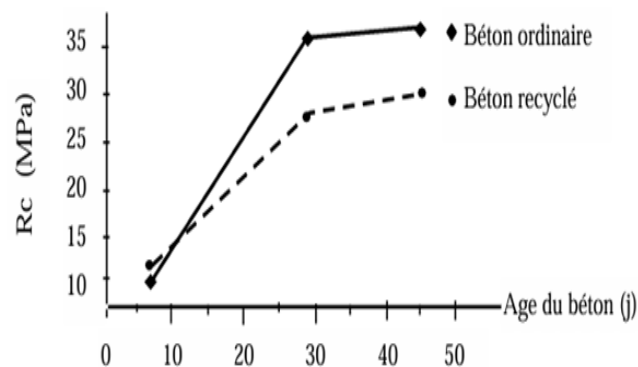
Les propriétés fondamentales des granulats recyclés sont synthétisées dans le Tableau 1. L'analyse de ces résultats révèle que les granulats de recyclage présentent des masses volumiques inférieures à celles des granulats conventionnels, corrélées à une capacité d'absorption d'eau nettement plus élevée. Il convient de souligner qu'un protocole de préparation rigoureux a été appliqué, incluant un lavage préalable des matériaux et une immersion prolongée des granulats recyclés dans l'eau pendant plus de 24 heures afin d'atteindre leur seuil de saturation.[43]

Tableau I-3 : Tybes des granulats de béton recyclés

Caractéristique	Granulats naturels		Granulats recyclés		Sable
	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Concassé
Mva (Kg/m3)	1.56	1.60	1.12	1.20	1.36
Mvs (Kg/m3)	2.65	2.67	2.39	2.52	2.63
Absorption %	2.45	4.90	6.05	4.75	/

I.5.3.1. Résistance à la compression :

Cette section est consacrée à l'étude de l'évolution des performances mécaniques sous sollicitation de compression. L'examen de la Figure 14 révèle que les deux types de bétons (naturel et recyclé) suivent une cinétique de durcissement quasi identique au fil du temps. Néanmoins, il est observé que le béton à granulats naturels maintient systématiquement une résistance supérieure à celle de son homologue recyclé. L'écart de performance, initialement de 16 % à l'échéance de 28 jours, s'accroît légèrement pour atteindre 18 % à 45 jours. Cette chute de résistance est principalement imputable à la porosité intrinsèque plus élevée des granulats recyclés, à la qualité moindre de la zone d'interface entre les granulats et le liant, ainsi qu'aux propriétés mécaniques intrinsèques des débris de béton d'origine.[44]

**Figure I.14 : Variation des résistances à la compression des bétons [44]**

I.5.3.2. Résistance à la traction :

Conformément aux objectifs de l'étude présentés dans le résumé, les résistances à la traction des bétons élaborés ont été évaluées. Bien que l'analyse détaillée se focalise sur la compression, les résultats globaux indiquent que le béton à base de graviers recyclés présente des performances en traction acceptables pour une valorisation dans le domaine de la construction. À l'instar de la résistance à la compression, la diminution de la résistance à la traction par rapport au béton témoin est étroitement liée à la porosité accrue et à la qualité de l'interface granulats/liant. Ces observations confirment l'importance de normaliser l'usage de

ces granulats tout en tenant compte de la légère baisse de leurs propriétés mécaniques globales [45]

I.6.Déchet :

Un déchet se définit comme tout matériau ou produit rejeté après avoir rempli sa fonction initiale, devenant ainsi inutile et dépourvu de valeur économique pour son détenteur qui cherche alors à s'en débarrasser, soit par l'élimination définitive via l'enfouissement, soit par le recyclage en vue d'un nouvel usage. Cette notion est encadrée en Algérie par l'article 03 de la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, qui stipule qu'un déchet est tout résidu issu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou bien meuble dont le propriétaire se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.[46]

I.6.1. Impact environnemental des déchets:

L'incidence des déchets sur l'environnement se manifeste à travers plusieurs dimensions affectant directement les écosystèmes, les ressources naturelles et la santé publique. Ces impacts peuvent être synthétisés comme suit :

I.6.1.1. Contamination des ressources hydriques :

Le rejet ou le lixiviat des déchets peuvent infiltrer les nappes phréatiques et polluer les cours d'eau. Cette altération chimique dégrade la qualité de l'eau potable et perturbe gravement les équilibres biologiques aquatiques.

I.6.1.2 Dégradation de la qualité de l'air :

L'incinération à ciel ouvert, notamment des polymères (plastiques), libère des polluants atmosphériques toxiques. Ces émissions nuisent à la pureté de l'air et engendrent des pathologies respiratoires chroniques.

I.6.1.3. Détérioration des propriétés du sol :

Les décharges sauvages provoquent une pollution chimique qui altère la structure des sols, réduisant ainsi leur fertilité et leur capacité de régénération végétale.

I.6.1.4. Émission de gaz à effet de serre (GES) :

La décomposition anaérobie des matières organiques génère du méthane et du CO_2 des gaz qui participent activement au réchauffement climatique mondial.

I.6.1.5. Atteinte à la biodiversité :

L'accumulation de résidus dans la nature fragmente les habitats naturels, menaçant la faune et la flore par ingestion accidentelle ou par intoxication chimique.

I.6.1.6. Défaillances des systèmes de gestion :

L'absence de tri à la source et de filières de traitement adaptées entraîne la saturation des centres d'enfouissement et favorise des pratiques d'élimination anarchiques.

I.6.1.7. Épuisement des ressources naturelles :

Une gestion linéaire des déchets néglige le potentiel de récupération des matériaux, accentuant ainsi la pression sur les matières premières vierges au détriment d'une économie circulaire. [47-48]

I.6.2. Différents types de déchets:

I.6.2.1. Déchets ultimes :

Il s'agit des résidus qui ont atteint la fin de leur cycle de valorisation. Ces déchets ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, que ce soit par recyclage matière ou par récupération énergétique.

I.6.2.2. Déchets inertes :

Les déchets inertes sont des substances qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique significative. Ils présentent des caractéristiques de stabilité élevée : ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction nocive au contact d'autres matières. De par leur nature non biodégradable, ils ne présentent pas de risques de pollution environnementale ni de menaces pour la santé humaine. Issus principalement des activités de construction, de démolition et des industries de matériaux de construction, ces déchets sont admissibles dans les centres de stockage spécialisés. Cette catégorie regroupe notamment :

- Les débris de béton
- Les tuiles, les briques et les produits céramiques ;
- Les déchets de verre ;
- Les terres d'excavation et les enrobés bitumineux[49]

I.6.2.3. Les déchets ménagers :

Cette catégorie regroupe l'ensemble des résidus issus des activités domestiques quotidiennes. Ils comprennent les déchets de cuisine et d'hygiène collectés de manière classique, ainsi que les flux destinés au tri sélectif (emballages en verre, plastique ou carton). Cette définition s'étend également aux déchets verts de jardinage, aux rémanents et aux objets encombrants. Les ordures ménagères se caractérisent par une forte présence de matières biodégradables constituant la Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères (FFOM), laquelle englobe les restes alimentaires, les emballages mixtes (métalliques, cartonnés) et les refus non valorisables.

I.6.2.4. Déchets assimilés :

Ils désignent les déchets produits par les secteurs économique, artisanal ou commercial, dont la nature et la composition permettent une gestion identique à celle des déchets ménagers par les collectivités locales.

I.6.2.5. Déchets verts :

Il s'agit des débris végétaux provenant de l'entretien des espaces verts, des parcs et des jardins, tels que les tontes de gazon et les branchages.

I.6.2.6. Déchets organiques (Bio-déchets) :

Également qualifiés de déchets fermentescibles ou FFOM, ils regroupent les matières biodégradables d'origine végétale ou animale. Cette catégorie inclut les déchets verts, les résidus de cuisine (épluchures, restes de repas, marc de café), certains produits celluloseux (papier journal, essuie-tout) ainsi que les boues de traitement.

I.6.2.7. Déchets Industriels Banals (DIB) :

Les DIB constituent les résidus non dangereux générés par les activités industrielles, commerciales, artisanales ou administratives. Ils proviennent de divers secteurs (métallurgie, chimie, services) et se composent principalement de déchets d'emballage, de résidus d'entretien et d'équipements en fin de vie.

I.6.2.8. Déchets dangereux :

Cette catégorie regroupe les flux nécessitant un traitement spécifique en raison de leur toxicité ou de leur dangerosité.

I.6.2.9. Déchets Industriels Spéciaux (DIS) :

Ces déchets présentent des risques majeurs pour l'environnement et la santé (toxicité, corrosivité). Ils incluent les résidus contenant des métaux lourds (plomb, arsenic), les boues de peinture, les hydrocarbures et les sous-produits de l'industrie pétrolière. [50]

I.6.2.10. Professionnelle et Synthétique :

Les débris de construction et de démolition constituent environ 30 % de la masse annuelle totale des déchets de la Région. Ce gisement, majoritairement généré lors des phases de chantier, inclut également une faible proportion de matériaux neufs inutilisés. Bien que la composition de ces déchets fluctue selon la nature du bâti, elle reste essentiellement inerte. Actuellement, le taux de recyclage atteint 75 à 80 %, principalement par une valorisation sous forme de remblais [51].

Le gisement des déchets de construction et de démolition en Algérie relevant de la catégorie des déchets industriels est estimé à plusieurs millions de tonnes chaque année [48]. Une étude ciblée de Bedjou évalue la production annuelle de déchets issus du bâtiment à 2,2 millions de tonnes

I.6.2.11. Déchet de béton :

Les déchets de béton, souvent désignés sous les termes de gravats ou débris, constituent les résidus issus des phases de déconstruction, de réhabilitation ou de construction d'ouvrages de génie civil (bâtiments, ponts, infrastructures routières). Ce processus génère des fragments de béton par fragmentation ou concassage. Actuellement, la valorisation de ces déchets s'inscrit dans une démarche de développement durable visant à minimiser l'empreinte écologique du secteur de la construction. En effet, leur transformation en agrégats recyclés permet de substituer les ressources naturelles dans la confection de nouveaux bétons [52–53].

Malgré l'abondance des granulats issus de la déconstruction, la valorisation des bétons de ciment recyclés demeure marginale. Par ailleurs, les travaux de recherche consacrés aux performances des bétons intégrant ces matériaux restent insuffisants. Pourtant, l'obtention d'un béton recyclé aux propriétés mécaniques et à la durabilité optimales repose sur des critères de formulation rigoureux : la sélection de granulats de haute qualité, la maîtrise du volume d'air occlus pour la résistance au gel/dégel, ainsi qu'un ajustement précis du rapport eau/ciment E/C. Ce défi technique est d'autant plus crucial que le volume de déchets de démolition généré annuellement est massif [54-55].



Figure I.15 : Recyclage des déchets[56]

I.6.2.12. Déchet plastiques :

Durant les dernières décennies, la prolifération des matières plastiques est devenue un défi environnemental mondial majeur. Selon la Banque Mondiale, la production globale dépasse désormais 300 millions de tonnes par an, dont près de la moitié est absorbée par le secteur des emballages à usage unique. Cette dynamique haussière se vérifie également en Algérie, où la consommation de plastique a plus que doublé en dix ans pour atteindre environ 25 kg par habitant. Face à l'accumulation de ces déchets non biodégradables, se pose la question de leur devenir. Si les solutions occidentales comme la valorisation énergétique ou chimique s'avèrent souvent inadaptées au contexte des pays en voie de développement en raison de leur coût et de leur haute technicité, la valorisation matière, à travers le recyclage mécanique en granulés ou en poudre, s'impose comme la méthode la plus accessible. Dès lors, l'analyse des orientations stratégiques de la gestion des déchets en Algérie devient indispensable pour envisager une intégration efficace de ces matériaux de récupération à l'échelle locale.[57]

I.6.2.13. Consommation des plastiques en Algérie :

En Algérie, la consommation individuelle de plastique tourne autour de 15 kg par an. Ce niveau, qui reste bien en deçà des chiffres enregistrés dans les pays développés, ne doit pas masquer une réalité plus complexe sur le terrain. Le véritable problème réside dans la prolifération des emballages souples : près de cinq milliards de sacs en plastique finissent chaque année directement dans la nature, faute d'un système de collecte efficace. Face à ce désastre écologique, les pouvoirs publics ont réagi en lançant des plans d'action comme le PROGDEM. En parallèle, on assiste à l'émergence, certes encore timide, de petites entreprises et de micro-startups soutenues par l'ANADE (ex-ANSEJ). Ces structures locales tentent de

populariser le concept de "déplastiquage" en ouvrant des centres de récupération, ce qui marque le début d'une prise de conscience environnementale dans le pays.[58]

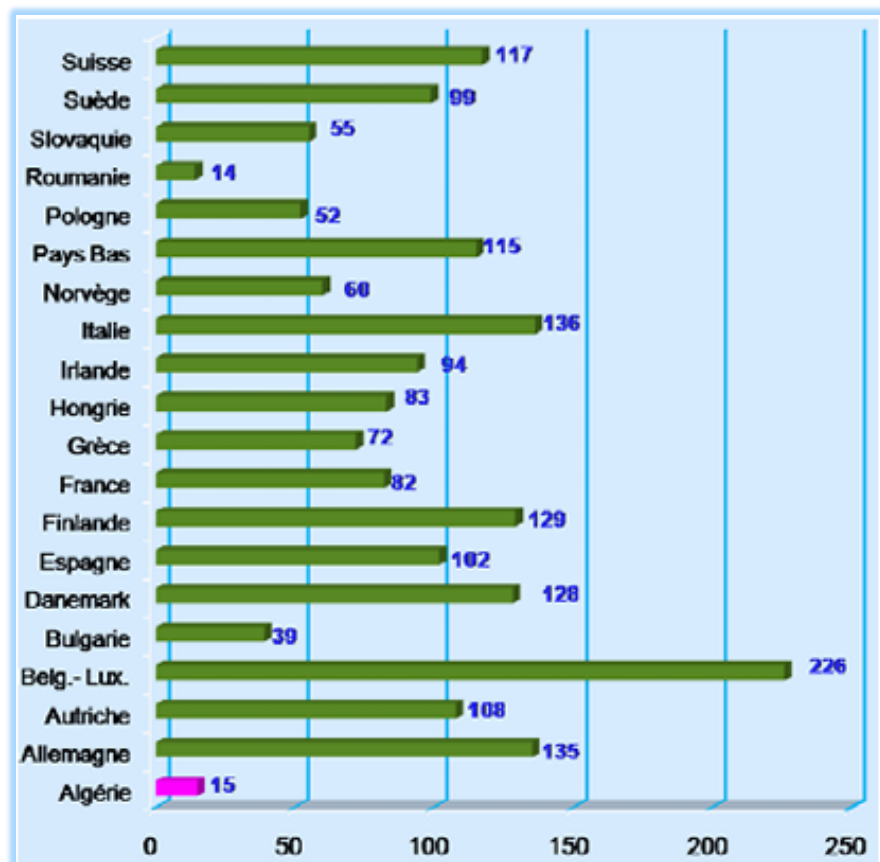


Figure I.16 : Comparaison de la consommation annuelle de plastique par habitant en Algérie et dans le monde (en kg) [58]

I.7.Collecte des déchets :

La gestion des déchets dans les villes suit trois étapes successives. Elle commence par la collecte des déchets directement auprès des ménages, soit par des associations de quartier qui passent de porte en porte, soit par les habitants eux-mêmes qui acheminent leurs déchets vers les points de regroupement les plus proches. Ensuite, des entreprises privées liées aux autorités locales compétentes prennent le relais, en transportant les déchets depuis les centres de collecte vers la décharge finale à l'aide de camions et d'engins lourds, avec une facturation basée sur les quantités transportées. La dernière étape consiste en l'enfouissement final ou le traitement, où les déchets sont dirigés vers des sites spécialement aménagés à cet effet, gérés par les autorités concernées selon les moyens disponibles.[59]

I.8.Impacts du recyclage sur l'environnement et l'industrie :

Le recyclage joue un rôle important dans la réduction des déchets solides et la préservation des ressources naturelles, dans la mesure où il nécessite moins d'énergie que la fabrication de nouveaux matériaux, ce qui contribue à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, il s'inscrit dans une logique d'économie circulaire en favorisant la création d'emplois et en orientant les pratiques industrielles vers plus de durabilité. À ce titre, il représente un outil efficace pour allier protection de l'environnement et développement économique responsable.

I.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents concepts fondamentaux liés au sujet de notre étude. Nous avons abordé la nature des matériaux cimentaires et leurs propriétés, puis le sable de dune qui représente l'une des ressources naturelles les plus disponibles dans la région d'Oued Souf. Nous avons également traité les déchets plastiques de type PET et leur influence sur les propriétés du mortier, ainsi que les granulats recyclés et leur intérêt dans le cadre de la construction durable. Nous avons conclu que l'utilisation combinée de ces matériaux ouvre des perspectives prometteuses pour limiter l'épuisement des ressources naturelles et répondre à la problématique de l'accumulation des déchets solides. C'est à partir de ces données théoriques que s'articule la partie expérimentale de notre étude, qui se chargera de mettre à l'épreuve ces hypothèses et de mesurer leur effet réel sur les performances du mortier cimentaire.

***Chapitre II : Caracterisation Des
Materiaux Utilises Et Methodes
Experimentales***

II.1. Introduction :

L'exploitation rationnelle des matériaux de récupération en vue de leur réemploi dans le secteur du bâtiment constitue un pilier fondamental, exigeant une compréhension rigoureuse de leurs propriétés intrinsèques — qu'elles soient mécaniques, physiques, chimiques ou minéralogiques afin de garantir leur performance dans de nouvelles applications constructives.

Cette étude s'articule autour de la valorisation du potentiel naturel considérable des sables de dunes de la région d'Oued Souf, en les intégrant comme alternative efficace aux sables conventionnels (tels que les sables alluvionnaires). Parallèlement, cette recherche vise à apporter des solutions environnementales et techniques pour la transformation des déchets de béton en fillers fins, ainsi que le recyclage des déchets plastiques en granulés à haute valeur ajoutée.

L'ensemble de ces efforts converge vers le développement d'un mortier plastique destiné à des ouvrages aux caractéristiques spécifiques. Pour concrétiser cette vision scientifique, un programme expérimental intégré a été élaboré, dont nous présentons, dans ce chapitre, les caractéristiques physiques et chimiques des composants de base : le ciment, le sable de dune, le filler issu du béton recyclé, l'eau de gâchage, ainsi que les granulés plastiques récupérés.

Dans la deuxième partie, nous abordons les méthodologies d'évaluation des performances du mortier élaboré. L'étude se focalise sur le suivi de son comportement rhéologique à l'état fluide et de ses caractéristiques physico-mécaniques après durcissement, tout en mettant en relief les paramètres clés de sa durabilité.

L'évaluation technique du mortier s'articule comme suit :

- **Caractérisation rhéologique (état frais)** : détermination de la fluidité par l'essai d'étalement et contrôle de la densité.
- **Caractérisation physico-mécanique (état durci)** : analyse de la robustesse (compression, flexion, célérité ultrasonore), de la stabilité dimensionnelle (retrait) et de la porosité (absorption d'eau et perméabilité), complétée par un essai de résistance aux chocs .

Les campagnes expérimentales et les essais de caractérisation ont été conduits au sein des structures de recherche suivantes :

- Le Laboratoire Pédagogique du Département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université Hamma Lakhdar d'El Oued (Algérie) .

- Le Laboratoire des Travaux Publics (LTP) d'El Chott, El Oued.

II.2. Matériaux utilisés :

L'élaboration du mortier dans le cadre de cette recherche repose sur l'exploitation des ressources locales abondantes et sous-utilisées de la wilaya d'El-Oued, sélectionnées pour leur grande accessibilité. Cette approche vise à renforcer la valeur économique des matériaux régionaux et à promouvoir les principes du développement durable dans le secteur de la construction, tout en garantissant la reproductibilité de l'étude dans des conditions similaires. Afin de vérifier l'efficacité de ces matériaux, une caractérisation physique et mécanique rigoureuse a été menée à travers des essais expérimentaux intensifs, visant à définir les propriétés structurelles des constituants et à les corrélérer aux performances techniques requises. La Figure II.1 présente les éléments fondamentaux constituant ce mortier, à savoir :

- **Sable de dune (0/2 mm) :** Un sable siliceux de nature roulée, extrait de la commune de Bayadha (wilaya d'El-Oued), et présentant une classe granulaire fine.
- **Filler de béton recyclé (0/0,08 mm) :** Une poudre ultra-fine obtenue par le concassage et le broyage mécanique de déchets de béton de démolition.
- **Ciment CEM I 42,5 N-SR3 :** Un ciment Portland haute performance, résistant aux sulfates (SR3), fourni par l'usine LAFARGE d'Alger.
- **Eau de gâchage :** Eau potable issue du réseau de distribution de la région d'El-Oued, utilisée pour garantir une hydratation optimale du liant
- **Granulats plastiques :** récupérés à partir du recyclage des bouteilles d'eau minérale (en PET).



Figure II.17 : Constituants de la formulation expérimentale

II.3. Analyse préliminaire des matériaux granulaires :

La qualité globale du mortier dépend intrinsèquement des propriétés des granulats incorporés. Pour cette raison, le sable de dune et le filler de béton recyclé ont été soumis à une série d'essais d'identification rigoureux. Ces tests préliminaires visent à vérifier la conformité de ces matériaux aux exigences normatives en vigueur, permettant ainsi d'ajuster les paramètres de formulation en fonction des performances visées dans ce travail.

Cette étape de caractérisation physique a pour but de définir les propriétés de base des granulats (granulométrie, densités, propreté et teneur en eau). La maîtrise de ces paramètres est indispensable pour vérifier la conformité des matériaux aux standards normatifs. De plus, les résultats obtenus jouent un rôle prépondérant dans l'orientation de la formulation, permettant une meilleure prédiction du comportement du mortier durci.

II.3.1. Caractérisation granulométrique des matériaux (NF EN 933-2)[60] :

Le tracé de la courbe granulométrique des granulats représente une phase cruciale dans l'étude de la formulation du mortier. Cette analyse permet d'optimiser le squelette granulaire afin d'améliorer la maniabilité, de réduire la perméabilité, et de renforcer les résistances mécaniques tout en limitant le retrait et en garantissant une meilleure durabilité.

II.3.2. Protocole de l'essai :



Figure II.18 : Tamiseuse utilisée pour l'essai d'analyse granulométrique.

II.3.2.1. Matériel utilisé :

Pour réaliser cet essai, on a utilisé le matériel disponible au laboratoire :

Une colonne de tamis normalisés à mailles carrées, d'ouvertures : 16 — 12,5 — 10 — 8 — 6,3 — 5 — 2,5 — 1,25 — 0,63 — 0,315 — 0,16 — 0,08 mm.

- Un plateau collecteur (fond) placé en bas de la colonne.
- Un agitateur mécanique (tamiseur vibrant).
- Une balance de précision au 0,01 g.
- Une étuve réglée à 105°C.
- Des brosses sèches pour le nettoyage des tamis entre les essais.

II.3.2.2. Préparation des échantillons :

Avant le tamisage, le sable de dune et le filler de béton démolé ont été lavés sur le tamis de 0,08 mm pour éliminer les poussières fines et les traces argileuses, puis placés à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Pour les granulés plastiques, l'étuvage n'a pas été effectué.

Étant donné que le PET se déforme sous l'effet de la chaleur. Les granulés ont donc simplement été séchés à l'air ambiant jusqu'à disparition de toute humidité visible en surface avant d'être pesés et tamisés.

II.3.2.3. Présentation de l'essai :

Les tamis ont été emboîtés par ordre décroissant d'ouverture, de 16 mm en haut jusqu'à 0,08 mm en bas, avec le fond placé sous le dernier tamis. L'échantillon séché a été versé sur le tamis supérieur, le couvercle mis en place, puis la colonne fixée sur le tamiseur vibrant.

La durée de tamisage choisie est de 3 minutes. Ce temps s'est montré suffisant pour bien séparer les différentes fractions. À la fin de l'opération, le refus de chaque tamis a été récupéré séparément et pesé.

L'essai a été répété pour chacun des trois matériaux. Entre chaque essai, les tamis ont été soigneusement brossés pour éviter toute contamination d'un matériau à l'autre, ce qui est important surtout entre le FBD et le sable de dune puisque les deux contiennent des fractions fines similaires.

Pour les granulés plastiques, on a remarqué que les fragments légers avaient tendance à ne pas se répartir uniformément sur la surface du tamis à cause de leur légèreté. On les a donc étalés manuellement avant de lancer la vibration.

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différents granulats sont présentés dans les tableaux Tableau-4.

Tableau I-4 : Analyse granulométrique des composants du mortier (Sable de dune, FBD et GP).

Tamis (mm)	SD — Passant cumulé (%)	FBD — Passant cumulé (%)	GP — Passant cumulé (%)
16	100	100	100
12,5	100	100	100
10	100	100	99,72
8	100	100	68,27
6,3	100	100	24,35
5	100	100	7,54
2,5	100	100	0,44
1,25	100	99,15	0,14
0,63	100	86,60	0
0,315	85,80	57,85	0
0,16	36,65	33,10	0
0,08	3,25	18,15	0

Les courbes granulométriques des trois matériaux sont regroupées dans la Figure 3. D'après cette Figure, on constate que le sable de dune est le plus fin des trois, avec une courbe très resserrée entre 0,08 et 0,315 mm, tandis que le FBD présente une distribution plus étalée s'étendant jusqu'à 1,25 mm avec un passant de 18,15 % à 0,08 mm. Les granulés plastiques, quant à eux, se distinguent nettement des deux autres matériaux : leur courbe se situe dans la zone grossière entre 5 et 10 mm, et leur passant est pratiquement nul à partir de 2,5 mm. Il est à noter que les trois courbes ne se chevauchent presque pas, ce qui montre que chaque matériau occupe une plage granulaire bien distincte.

II.3.3. Module de finesse (Norme NA 2607) :

Le module de finesse (Mf) est calculé à partir des refus cumulés en pourcentage sur les six tamis normalisés : 0,16 — 0,315 — 0,63 — 1,25 — 2,5 — 5 mm. Il est obtenu en divisant la somme de ces refus cumulés par 100.

$$Mf = \frac{\sum Rc}{100} \quad (1)$$

Tableau I-5 : Module de finesse des composants du mortier (Sable de dune, FBD et GP).

Tamis(mm)	Rc SD (%)	Rc GP (%)
5	0	92,46
2.5	0	99,56
1.25	0	99,86
0.63	0	100
0.315	14,2	100
0.16	63,35	100
Σ	77,55	591,88
$Mf = \Sigma/100$	0,78	5,92

Tableau I-6 : Les classifications des sables.

Mf	Classification
$Mf < 1,8$	Sable très fin
$1,8 \leq Mf < 2,2$	Sable fin2
$\geq 2,2 Mf < 2,8$	Sable moyen(préférentiel)
$\geq 2,8 Mf < 3,2$	Sable grossier
$Mf > 3,2$	Sable très grossier

Dans notre recherche le module de finesse sont :

1-Mf Sable de dune = 0,78 on est en présence d'un sable Très fin.

2- Mf Fille de béton démoli = 1,23 on est en présence d'un Sable très fin.

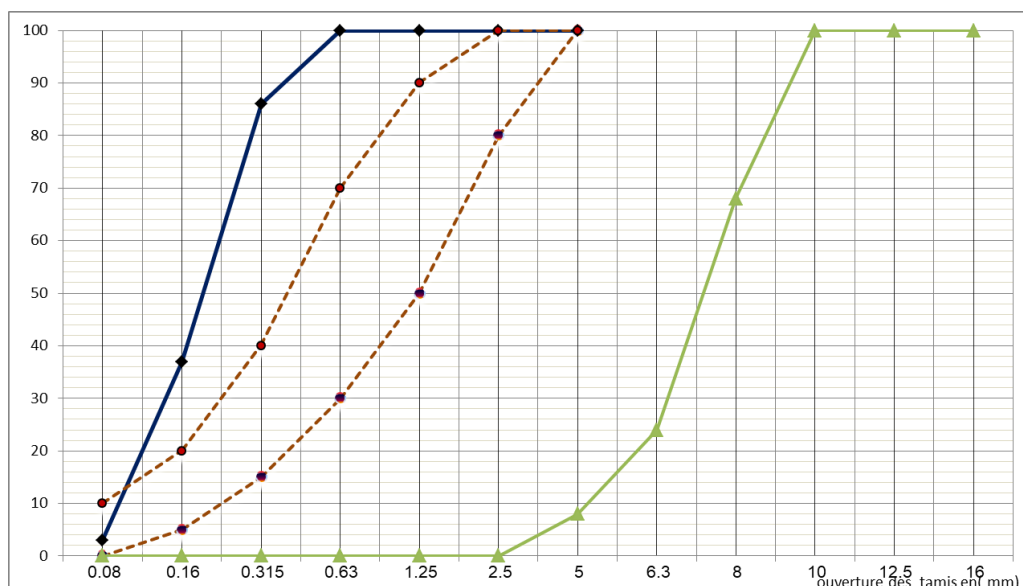


Figure II.3 : Courbes granulométriques du SD, FBD et GP.

II.3.4. Masses volumiques :

II.3.4.1. Masse volumique apparente :

Cette expérience vise à déterminer la masse volumique apparente d'un échantillon de matière. Dans un premier temps, un récipient de volume connu V a été sélectionné et pesé à vide, sa masse étant notée P . Ensuite, le récipient a été rempli avec la matière à étudier et la pesée a été effectuée quatre fois consécutives, les masses relevées étant successivement : $P_1 + T, P_2 + T, P_3 + T, P_4 + T$. La masse de l'échantillon pour chaque mesure a ensuite été obtenue en soustrayant la masse du récipient vide, selon la relation $T_i = (P_i + T) - P$. Afin de minimiser les erreurs aléatoires et d'assurer une meilleure précision, la masse moyenne de l'échantillon a été calculée selon la relation :

$$M = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

Enfin, la masse volumique apparente a été déterminée en divisant cette moyenne par le volume du récipient V , selon la relation :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

La répétition de la mesure quatre fois et l'utilisation de la moyenne arithmétique renforcent la fiabilité du résultat obtenu, ce qui rend la valeur de ρ_{app} plus précise et scientifiquement exploitable.

II.3.4.2. Masse volumique absolue :

Cette expérience vise à déterminer la masse volumique absolue d'un échantillon solide. Dans un premier temps, l'échantillon a été pesé à l'état sec, sa masse étant notée P_1 . Parallèlement, un tube à essai rempli d'eau jusqu'au trait de jauge 1000 ml a été pesé, sa masse étant notée P_2 . La somme de ces deux masses a été calculée comme suit :

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Dans un second temps, le tube à essai a été partiellement vidé de son eau, puis l'échantillon de masse P_1 y a été introduit. Le tube a ensuite été complété avec de l'eau jusqu'au trait de jauge 1000 ml, et l'ensemble a été pesé, sa masse étant notée P_4 , telle que :

$$P_4 = m_{tube} + m_{chantillon} + m_{eau}$$

Le volume de l'échantillon a alors été déterminé en exploitant le principe du déplacement d'eau. En effet, l'eau déplacée par l'échantillon correspond à la différence entre P_4 et P_3 , selon la relation :

$$V = P_3 - P_4$$

Enfin, la masse volumique absolue de l'échantillon a été calculée en divisant sa masse par son volume :

$$\rho = \frac{P_1}{V} \quad (2)$$

Cette méthode repose sur le principe d'Archimède et permet de déterminer le volume réel de l'échantillon indépendamment de sa forme, ce qui confère à la valeur obtenue de ρ_{abs} une précision et une fiabilité scientifiques élevées.

Tableau I-7 : Masses volumiques des granulats utilisés

Granulats	Masse volumique apparent	Masse volumique absolue
Sable de dune	1,55	2,61
Fille de béton démolie	1,47	2,63
Grains plastique	/	1,23

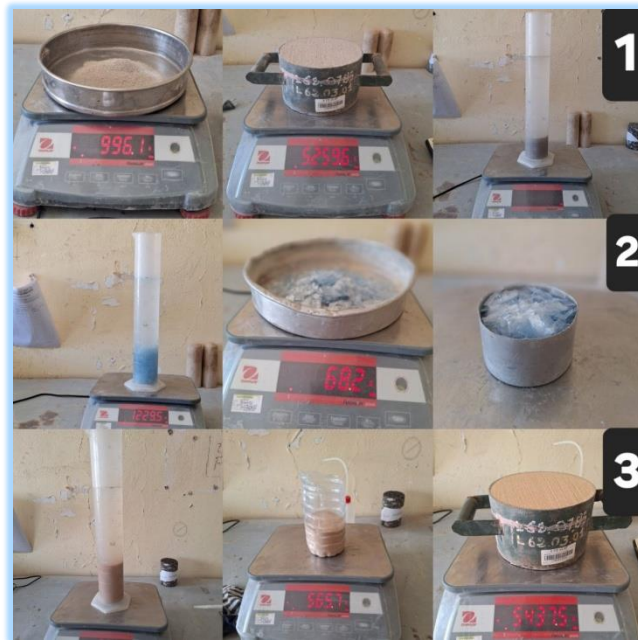


Figure II.4 : Mesure de la masse volumique des granulats utilisés.

II.3.5. Mesure de la propreté des granulats :

II.3.5.1. Objectif de l'essai :

Cet essai a pour objectif de déterminer le degré de propreté du sable, en mesurant la proportion des éléments fins, argileux ou pulvérulents présents dans le granulat sableux tamisé à 4 mm. Ce degré de propreté est exprimé par un indicateur appelé l'équivalent de sable (SE), qui permet de juger de l'aptitude du sable à être utilisé dans les travaux de construction.



Figure II.5 : Essai d'équivalent de sable

II.3.5.2. Essai d'équivalent de sable :

L'essai d'équivalent de sable consiste à prélever un échantillon de sable de 120 grammes tamisé à 4 mm, puis à le plonger dans un tube gradué contenant une solution de lavage (Eau de Sil, 25 ml dans 1 litre d'eau) jusqu'au repère inférieur, en laissant reposer pendant 10 minutes afin que la solution imprègne bien le matériau. Le tube est ensuite fermé et soumis à 90 cycles d'agitation mécanique aller-retour, puis rincé intérieurement à l'aide d'un tube plongeur introduisant la solution de lavage afin de faire remonter les particules fines vers le haut. Le tube est ensuite complété avec la solution jusqu'au repère supérieur et laissé au repos pendant 20 minutes pour permettre la décantation. Après stabilisation, on mesure la hauteur totale de la colonne (h1) à l'aide d'une règle, puis la hauteur de la partie sableuse nette (h2) à l'aide d'un piston. L'équivalent de sable est alors calculé selon la formule

$$SE = (h2 / h1) \times 100 \quad (3)$$

Conformément à la norme NF EN 933-8+A1, et permet de déterminer la propreté du sable et son aptitude à être utilisé dans les travaux de construction.

Tableau I-8 : Résultats de l'équivalent sable des matériaux utilisés

	Sable de dune	Filler de béton démolé	Grain plastique
EsV (%)	96%	65,64%	/

Selon les résultats obtenus, le sable de dune analysé peut être qualifié de sable très propre avec un équivalent de sable de 96%, tandis que le filler de béton démolé correspond à un sable admissible avec un équivalent de sable de 65,64%.

II.4. Protocole d'essai :

Après avoir défini les formulations, la fabrication des éprouvettes a été réalisée selon un protocole bien établi. Dans un premier temps, les matières premières (ciment, sable de dune, filler de béton démolé et grain plastique) ont été pesées avec précision conformément aux proportions de chaque formulation. Le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur mécanique, en introduisant d'abord les constituants secs (ciment et sable) pendant quelques minutes, puis en ajoutant progressivement l'eau de gâchage tout en poursuivant le malaxage jusqu'à l'obtention d'un mortier homogène. La consistance du mortier frais a été systématiquement vérifiée par l'essai d'étalement selon la norme EN 1015-6, afin de s'assurer que la valeur reste dans la plage cible fixée entre 140 et 200 mm. Une fois la plasticité confirmée, le mortier a été coulé dans des moules prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, en deux couches compactées manuellement à l'aide d'une tige de piquage. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées puis conservées dans l'eau jusqu'à la date des essais.

II.4.1. Conception et réalisation des éprouvettes d'essai :

Dans cette étude, une formulation témoin a d'abord été établie avec un dosage en ciment de 450 g, en utilisant 100 % de sable de dune et 100 % de sable alluvionnaire, avec un rapport ciment/sable (C/S) de 1/3 et un rapport eau/ciment (E/C) de 0,57. Cette formulation de référence a servi de base pour les substitutions progressives du sable de dune par du filler de béton démolé (FBD) à des proportions volumiques allant de 0 à 40 % avec un pas de 5 %, et par du grain plastique (GP) de 0 à 15 %. Les masses volumiques des solides ont été prises en compte lors du calcul des substitutions volumiques. L'ensemble des formulations retenues est regroupé dans le tableau 9, qui présente en détail les proportions et la codification des échantillons.

Tableau I-9 : Les différentes formulations des mortiers plastiques étudiés.

N°	Code	Pourcentage			E/C	Sable	FBD	GP	Ciment	Eau	Total
		SD	FBD	GP		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
1	MP50/50/0	50	45	5	0.57	4520.215	4333.99	0	3013.48	1717.68	13585.365

2	MP50/45/5	50	40	10	0.57	4520.215	3900.59	60.75	3013.48	1717.68	13212.715
3	MP50/40/10	50	40	10	0.57	4520.215	3467..19	121.51	3013.48	1717.68	12840.075
4	MP50/35/15	50	35	15	0.57	4520.215	3033.79	182.27	3013.48	1717.68	122467.435

II.4.2. Préparation des échantillons d'essai :

La préparation des éprouvettes a été réalisée suivant une procédure identique pour toutes les formulations. Après le malaxage, les essais à l'état frais, notamment l'étalement et la masse volumique Figure .6 , ont été effectués immédiatement Figure .7. Le mortier a ensuite été coulé en deux couches dans des moules préalablement huilés. En l'absence de table vibrante, le compactage a été réalisé manuellement pendant une minute, puis la surface a été arasée à la truelle. Trois types de moules ont été utilisés selon la nature des essais : des moules prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ pour les essais d'absorption d'eau, de retrait, de vitesse d'impulsion ultrasonique, de flexion et de compression, des moules cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour l'essai de résistance au choc, et des moules cubiques de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ pour l'essai de perméabilité. Après 24 heures de conservation à température ambiante, les éprouvettes ont été démoulées puis immergées dans l'eau pendant 28 jours Figure .8 . Pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été préparées pour les essais physico-mécaniques.



Figure II.6 : Les essais à l'état frais, (1) l'étalement, (2) la masse volumique.



Figure II.7 : Coulage du mortier et arasement de la surface des éprouvettes



Figure II.8 : Conservation des éprouvettes en cure humide pendant 28 jours

II.5. Méthodologie expérimentale :

Pour évaluer les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du mortier plastique, plusieurs formulations ont été testées. Chacune d'elles résulte d'une variation des teneurs en sable de dunes (SD), en filler de béton démolé (FBD) et en grains plastiques (GP). Cette démarche poursuit un triple objectif : améliorer les performances mécaniques du matériau, réduire les coûts de production et contribuer à la valorisation des déchets plastiques dans une optique de développement durable. Les résultats obtenus ont ensuite été confrontés à ceux d'un mortier de contrôle et d'un mortier témoin, après 28 jours de cure. Il a notamment été observé que les grains plastiques ont joué un rôle favorable dans la cohésion du mélange, améliorant ainsi l'adhérence entre les composants. Cette approche a permis de mettre en évidence l'influence des substitutions sur le comportement global du matériau, en particulier sur sa résistance, sa compacité et sa durabilité.

II.5.1. Caractéristiques à l'état frais :

II.5.1.1. Ouvrabilité :

L'essai d'étalement est réalisé afin d'évaluer la maniabilité du mortier frais et de déterminer son degré de fluidité, ce qui permet de juger de l'aptitude du mélange à être mis en œuvre dans les travaux de construction. Pour ce faire, un moule tronconique métallique, ouvert en haut et en bas, est placé au centre de la table d'étalement, puis rempli de mortier frais en deux couches successives, chacune compactée par dix coups de damage, avant d'araser la surface supérieure à l'aide d'une règle. Le moule est ensuite relevé verticalement, et la table est soumise à quinze chocs à raison d'un choc par seconde. L'étalement du mortier est mesuré selon deux diamètres perpendiculaires (d_1 et d_2), et l'étalement moyen est calculé selon la relation suivante:

$$D_{\text{moy}} = (d_1 + d_2) / 2$$

Où d_1 et d_2 représentent les deux diamètres de la galette obtenue après étalement, exprimés en centimètres.

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (cm) \quad (4)$$

Tableau I-10 : Classification d'étalement NF EN 1015-6 [61].

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



Figure II.9 : Méthode de mesure de l'étalement à la table à secousses

II.5.1.2. Masse volumique :

Par la suite, la masse volumique à l'état frais a été déterminée comme illustré à la Figure (II-10). La masse volumique du mortier frais a été calculée en pesant le moule vide, puis en le pesant rempli de mortier. La masse du mortier a été obtenue par soustraction de la masse du moule vide de celle du moule rempli. Cette masse a ensuite été divisée par le volume connu du moule, permettant ainsi d'obtenir la valeur de la masse volumique du mortier frais, calculée selon la relation suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (5)$$



Figure II.10 : Mesure de la masse du moule vide et rempli de mortier pour le calcul de la masse volumique

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 constitue l'une des techniques d'essais non destructifs les plus répandues pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, notamment en ce qui concerne leur compacité et leur homogénéité interne. Cet essai est réalisé conformément à la norme ASTM C597-02 [62], sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16 cm³), préalablement conservées par immersion dans l'eau pendant 28 jours, puis séchées en étuve à 105 °C jusqu'à stabilisation de leur masse.

Le principe de cet essai repose sur l'émission d'une impulsion acoustique à travers le matériau à examiner ; la vitesse de l'onde est ensuite calculée à partir du temps de transit mesuré entre l'émetteur et le récepteur. Des valeurs élevées de cette vitesse indiquent généralement des matériaux présentant un module d'élasticité plus important et une meilleure

capacité portante. Les essais ont été effectués à l'aide d'un appareil de marque Controls (voir Figure II-10), permettant ainsi d'obtenir une évaluation qualitative de la structure interne des mortiers. Les critères d'interprétation des résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 7.



Figure II.11 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique du mortier étudié

Tableau I-11 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [63].

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.		

Cet essai requiert une surface de contact parfaitement adaptée à la forme de la tête du dispositif, ce qui impose l'application d'une fine couche de gel couplant entre la tête et

l'éprouvette. Une fois que l'onde a parcouru la distance déterminée à l'intérieur du mortier, le second transducteur (récepteur) se charge de convertir les vibrations mécaniques en un signal électrique mesurable. Des compteurs électroniques intégrés à l'appareil enregistrent ensuite le temps de transit de l'impulsion acoustique, exprimé en microsecondes (μsec). Afin de garantir la précision du calcul de la vitesse de propagation, la distance séparant les deux têtes doit être mesurée avec une précision minimale de 1 %, selon la relation mathématique (5) suivante :

$$V = \frac{L}{T} \quad (6)$$

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 et le gonflement comptent parmi les facteurs les plus influents sur le comportement à long terme du béton et du mortier, constituant une source principale d'apparition de fissures qui affaiblissent la résistance du matériau et réduisent sa durée de vie. Ces déformations volumiques résultent de deux mécanismes fondamentaux : le premier est lié aux réactions physicochimiques accompagnant le processus d'hydratation du ciment, et le second reflète la réponse du matériau au gradient hydrique entre lui-même et son environnement extérieur.

Le retrait se manifeste par une contraction du volume du mortier due à la perte d'eau capillaire ou à la dessiccation progressive, tandis que le gonflement traduit une augmentation de volume pouvant être provoquée par certaines réactions internes ou par une absorption excessive d'humidité. Dans les deux cas, des contraintes se développent à l'intérieur du matériau pouvant dépasser sa résistance en traction, engendrant ainsi un réseau de fissures qui compromet la robustesse et l'intégrité structurelle.

Pour suivre ces variations avec précision, un rétractomètre électronique à affichage numérique d'une précision de 0,001 mm a été utilisé dans cette étude (voir Figure 12), permettant un suivi rigoureux de l'évolution des déformations au cours du temps.

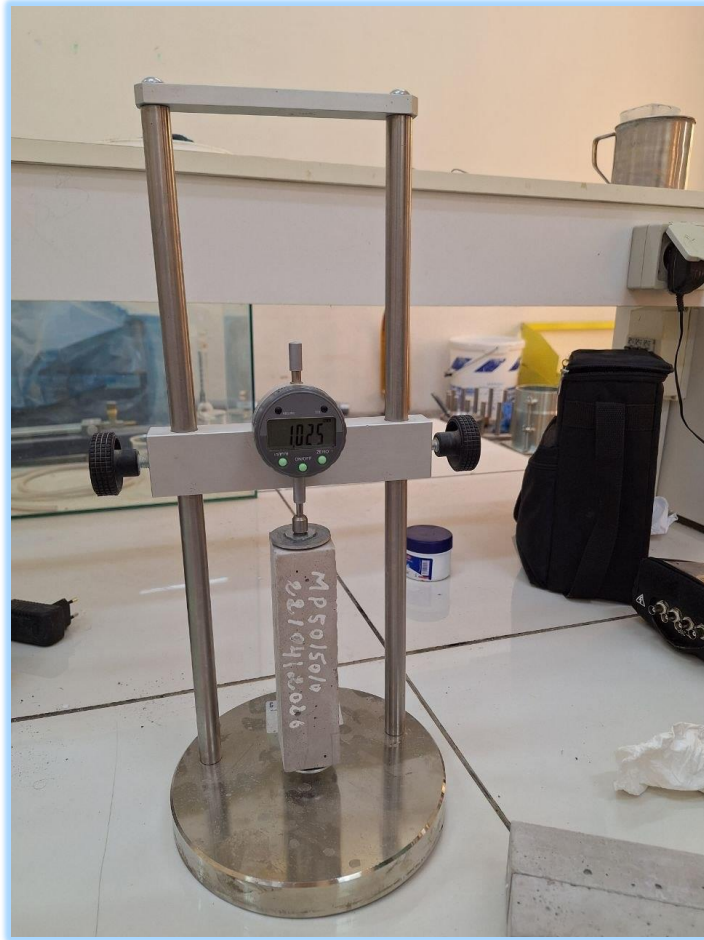


Figure II.12 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique.

Cet essai a été réalisé en référence à la norme NF P15-433, dans le but d'évaluer les variations dimensionnelles induites par le retrait du mortier durci au cours du temps. Les mesures ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$), après une période de cure de 28 jours dans l'eau. Afin d'obtenir des résultats plus représentatifs pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été soumises à l'essai, et les résultats rapportés correspondent à la moyenne des valeurs enregistrées.

II.5.2.3. Essai de traction par flexion :

L'essai de traction par flexion trois points a été effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$), conformément à la norme NA 428 et en accord avec la norme NF EN 1015-11 [64]. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une presse universelle de type UTEST UTC-4320 d'une capacité de 2000 kN, offrant une lecture de la charge de rupture et du déplacement avec une précision respective de 10^{-3} kN et 10^{-2} kN . Trois éprouvettes ont été testées pour chaque formulation ; celles-ci sont placées sur le bâti de la presse avec un entraxe

de 100 mm entre les appuis, puis soumises à un chargement progressif jusqu'à la rupture. La résistance à la flexion est déterminée selon l'équation.

$$Rf = \frac{1,5F_{fmax}.L}{b^3} \quad (7)$$

Avec :

Rf : La résistance en flexion du mortier en MPa

F_{fmax} : 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).



Figure II.13 : 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 effectué sur les demi-prismes obtenus à l'issue de l'essai de traction par flexion, en référence à la norme NF EN 12390-4 [65], au moyen d'une presse d'une capacité de 2000 kN fonctionnant à une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s. Les éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 4$ cm³ sont centrées sur le plateau de la presse de manière à assurer une surface de contact de 16 cm² (voir Figure 14). La charge de rupture est définie comme la charge maximale enregistrée au cours de l'essai, tandis que la résistance à la compression est calculée selon l'équation (8) en divisant cette charge par la section

transversale de l'éprouvette. Les résultats présentés correspondent à la moyenne de trois essais par formulation.

$$Rc = \frac{f_{cmax}}{b^2} \quad (8)$$

Avec :

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.14 : Matériels utilisés pour l'essai de compression

II.5.2.5. Absorption d'eau par immersion totale :

Pour déterminer la capacité d'absorption d'eau du mortier, les éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm sont d'abord séchées dans une étuve ventilée à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 72 heures, jusqu'à stabilisation de leur masse. Elles sont ensuite immergées dans de l'eau à $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 48 heures, afin d'atteindre la saturation complète. Avant chaque pesée, les surfaces sont essuyées à l'aide d'une éponge humide. La masse est considérée comme stable lorsque l'écart entre deux pesées successives, séparées de 24 heures, ne dépasse pas 0,1. L'essai est réalisé sur trois éprouvettes par formulation, et les résultats sont exprimés en pourcentage sous forme de la moyenne des trois valeurs mesurées. La quantité d'eau absorbée est calculée à partir de la masse sèche (M_s) et de la masse à saturation (M_a), selon l'équation (8) suivante :

$$Ab(\%) = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100 \quad (9)$$

Avec :

Ma : Masse de l'échantillon imbibé d'eau.

Ms : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.



Figure II.15 : Le principe expérimental de l'absorption d'eau

II.5.2.6. Perméabilité à l'eau BS. EN 12390/8 :

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 renseigne sur la compacité du mortier et sa capacité à s'opposer à la pénétration de l'eau. Plus la valeur de P_{moy} est faible, plus la structure du matériau est dense, ce qui traduit une meilleure tenue dans le temps. La profondeur moyenne de pénétration est calculée selon l'équation (9) suivante :

$$P_{moy} : \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (10)$$

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 , connu également sous le nom de perméabilité hydraulique, traduit l'aptitude d'un matériau poreux — tel que le mortier ou le béton — à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'une différence de pression. Sa valeur peut être déterminée quantitativement à partir de la loi de DARCY, dont l'expression est donnée par l'équation (11) suivante :

$$K = \frac{Q.L}{A.\Delta H.t} \quad (11)$$

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. Résistance aux chocs :

La résistance au choc, ou essai d'impact, ne figure pas encore parmi les essais normalisés habituellement appliqués aux mortiers, à la différence des essais de compression ou de flexion. Toutefois, dans le cadre de recherches expérimentales, plusieurs méthodes ont été mises au point pour apprécier la ténacité des mortiers et leur capacité à absorber des sollicitations mécaniques dynamiques, comme celles provoquées par la chute d'un objet.

Parmi ces méthodes, celle s'inspirant de l'ACI Committee 544 — initialement conçue pour le béton fibré — s'est montrée appropriée pour évaluer les mortiers modifiés. Il s'agit

d'un essai simplifié par chute de masse, réalisé sur des éprouvettes cubiques de 100×100×100 mm ou 150×150×150 mm, conservées 28 jours en cure humide pour garantir un durcissement satisfaisant.

Le dispositif utilisé comprend une masse standard de 4,5 kg, un guide vertical d'une hauteur allant de 450 mm à 1 m, une surface rigide de réception, un compteur de chocs, ainsi qu'un système de protection — grille ou cage — destiné à prévenir toute projection [66].



Figure II.17 : Méthode de mesure de l'essai aux chocs

Le déroulement de l'essai consiste à poser l'éprouvette sur une plaque rigide, puis à lâcher la masse depuis la hauteur préalablement fixée, en ciblant le centre de la face supérieure. Deux paramètres sont enregistrés au cours de l'essai : le nombre de coups nécessaires à l'apparition de la première fissure visible, et le nombre total de coups conduisant à la rupture complète de l'éprouvette. À partir de ces données, il est possible d'estimer l'énergie absorbée par le matériau et, par extension, sa résistance dynamique exprimée en Joules, selon l'équation (12) suivante :

$$E = m . g . h . N$$

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 poser les bases expérimentales de cette étude, en présentant les matériaux retenus et les méthodes d'essai adoptées pour évaluer les performances du mortier plastique élaboré. Une attention particulière a été accordée aux granulés plastiques recyclés issus de bouteilles en PET, dont l'incorporation dans la matrice cimentaire constitue l'un des axes centraux de cette recherche. L'utilisation du filler de béton démolé en substitution partielle du sable de dune s'est révélée pertinente, dans la mesure où elle agit simultanément sur la granulométrie du mélange, la cohésion de la matrice et le comportement rhéologique du mortier à l'état frais, avec des répercussions directes sur ses propriétés physico-mécaniques et sa durabilité.

La seconde partie de ce chapitre a été consacrée à la description des protocoles expérimentaux mis en œuvre, lesquels sont conformes aux normes en vigueur, tout en ayant été adaptés, pour certains, aux spécificités des matériaux locaux étudiés. Les procédures de préparation des éprouvettes ainsi que les conditions de conservation ont été détaillées pour chaque type d'essai. Ce chapitre s'achève par la présentation des différentes formulations de mortiers retenus — témoins et expérimentaux — qui serviront de base à l'analyse comparative des résultats exposés dans le chapitre suivant.

Chapitre III :
Analyse et discussions des resultats

III.1. Introduction :

Ce chapitre aborde la discussion et l'interprétation des résultats obtenus à partir des expériences menées dans le cadre de ce travail de recherche. Si le domaine des mortiers renforcés par différentes catégories de granulats et de matériaux fibreux a suscité un intérêt considérable de la part des chercheurs, le domaine portant spécifiquement sur les mortiers fabriqués à partir de sable des régions désertiques — avec une substitution partielle par une poudre de sable issue de procédés de valorisation, accompagnée de l'ajout de particules de polyéthylène téréphtalate récupérées — demeure insuffisamment couvert sur le plan scientifique, les références et études spécialisées y étant encore rares [67]. Cette partie concentre son attention sur le comportement de ces mélanges à l'état frais, en termes de maniabilité et d'écoulement, avant d'examiner les propriétés physiques et les capacités de résistance qu'ils acquièrent une fois le processus de durcissement achevé.

III.2. Propriétés à l'état frais :

III.2.1. Ouvrabilité :

L'ouvrabilité des mortiers a été mesurée par l'essai d'étalement sur table à chocs. Les résultats sont présentés dans la Figure III-1.

On remarque d'abord que le MCSA donne un étalement d'environ 15 cm, ce qui correspond à une consistance normale pour un mortier classique. Le MTSD par contre présente l'étalement le plus élevé avec presque 24 cm. Cela s'explique probablement par la forme arrondie des grains de sable de dune qui diminue les frottements entre les particules et rend le mélange plus fluide.

Pour les mortiers MP, on constate que le MP50/50/0 sans grains PET donne un étalement d'environ 17,5 cm, proche du MCSA. Quand on commence à introduire les grains PET, le MP50/45/5 montre une légère diminution à environ 15 cm. Ensuite les formulations MP50/40/10 et MP50/35/15 remontent progressivement jusqu'à 18,5 cm et 19,5 cm respectivement.

Cette augmentation de l'étalement avec l'augmentation de la teneur en PET peut être liée au fait que ces grains n'absorbent pas l'eau, ce qui laisse plus d'eau libre dans le mélange. De plus leur surface lisse réduit les frottements internes entre les constituants du mortier. Malgré les variations observées, tous les mortiers restent dans la classe des mortiers plastiques, ce qui montre que ces mélanges sont praticables et peuvent être utilisés sans difficultés particulières lors de la mise en œuvre.

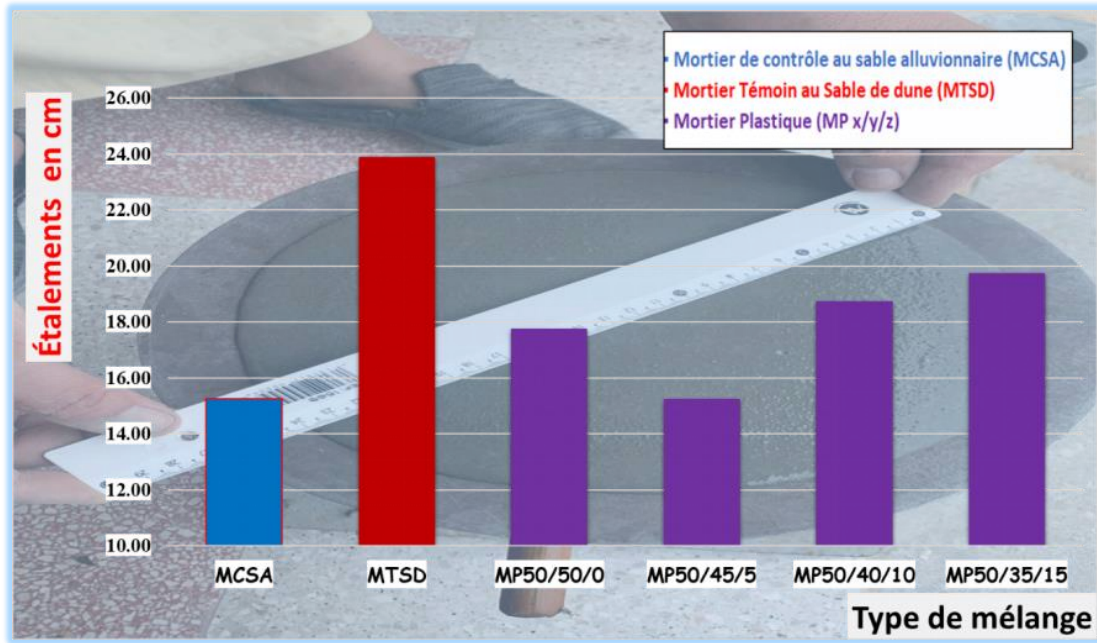


Figure III.1 : Résultats d'étalement des différents mortiers à l'état frais

Par ailleurs, bien que les granulats recyclés présentent une capacité d'absorption importante, le sable alluvionnaire a absorbé une quantité d'eau plus grande que le sable de dune, ce qui s'explique par sa teneur plus élevée en particules fines [68,69]. La ligne horizontale en pointillés représente la moyenne des valeurs expérimentales obtenues pour l'ensemble des mélanges testés.

III.2.2. Densité à l'état frais :

Les valeurs de masse volumique à l'état frais obtenues pour les différents mortiers se situent entre 2036 et 2139 kg/m³. Le mortier MTSD ressort avec la densité la plus élevée de tous les mélanges testés, devant le MCSA. Pour ce qui est des mortiers MP, c'est la formulation MP50/40/10 qui donne la valeur la plus haute de la série, alors que MP50/50/0 se retrouve en bas du classement. On note aussi que l'ajout des grains PET fait monter progressivement la masse volumique jusqu'à un certain point, puis MP50/35/15 accuse une légère baisse, un constat qui rejoint les conclusions de plusieurs travaux antérieurs [70]. La masse volumique du mortier reste avant tout tributaire de la densité des matériaux qui le composent et de la quantité d'air piégé durant le malaxage.

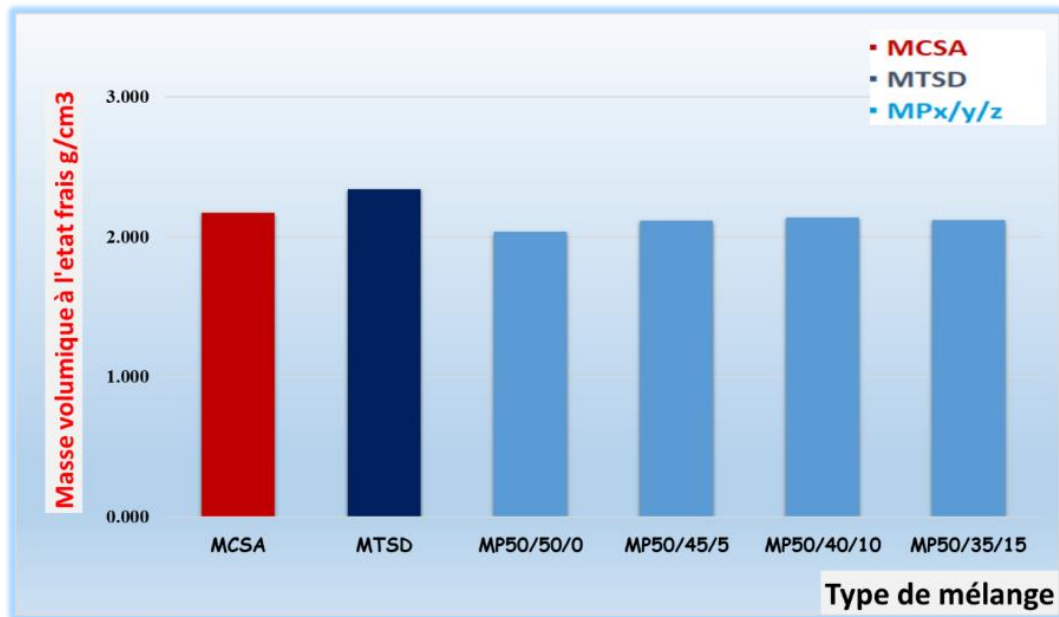


Figure III.2 : Masse volumique à l'état frais des différents mortiers

Parmi les différentes formulations testées, le mortier MCSA présente la masse volumique la plus faible, que ce soit par rapport au mortier entièrement constitué de sable de dune MTSD ou aux formulations intégrant un remplacement partiel du sable de dune par du filler de sable recyclé FSR avec ajout de grains PET. En revanche, une tendance à l'augmentation de la masse volumique a été observée avec l'introduction progressive des grains PET, notamment pour les formulations MP50/45/5 et MP50/40/10. Il convient de souligner que la formulation MP50/40/10, combinant 40% de filler de sable recyclé et 10% de grains PET, a enregistré la densité la plus élevée parmi les mortiers MP, surpassant ainsi le mortier MCSA. Par ailleurs, le mortier MTSD, dans lequel le sable alluvionnaire est entièrement remplacé par du sable de dune, a permis d'obtenir la densité à l'état frais la plus importante de l'ensemble des mélanges étudiés. Ce comportement est principalement attribué à un agencement plus compact des particules solides au sein de la matrice cimentaire.

III.3. Propriétés à l'état durci :

III.3.1. Résistance à la flexion :

Parmi les différentes formulations testées, le mortier MTSD présente la résistance à la flexion la plus élevée, dépassant ainsi le mortier MCSA. Cette différence peut être attribuée à la nature des grains de sable de dune qui favorisent une meilleure liaison au sein de la matrice cimentaire.

Concernant les mortiers MP, la formulation MP50/50/0 sans grains PET enregistre la valeur la plus élevée de la série, se rapprochant davantage des mortiers de référence par

rapport aux autres formulations. On remarque ensuite une diminution progressive de la résistance à la flexion avec l'augmentation du taux de substitution par les grains PET, les formulations MP50/45/5 et MP50/40/10 affichant des valeurs intermédiaires, tandis que MP50/35/15 enregistre la résistance la plus faible de l'ensemble des mélanges MP.

Cette tendance à la baisse avec l'augmentation de la teneur en PET s'explique par le fait que les grains plastiques, de par leur nature hydrophobe et leur faible adhérence avec la pâte cimentaire, créent des zones de faiblesse au sein de la matrice, réduisant ainsi sa capacité à résister aux efforts de flexion.

Il convient toutefois de noter que toutes les formulations MP restent inférieures aux deux mortiers de référence MCSA et MTSD, ce qui confirme l'influence négative des grains PET sur la résistance mécanique à la flexion.

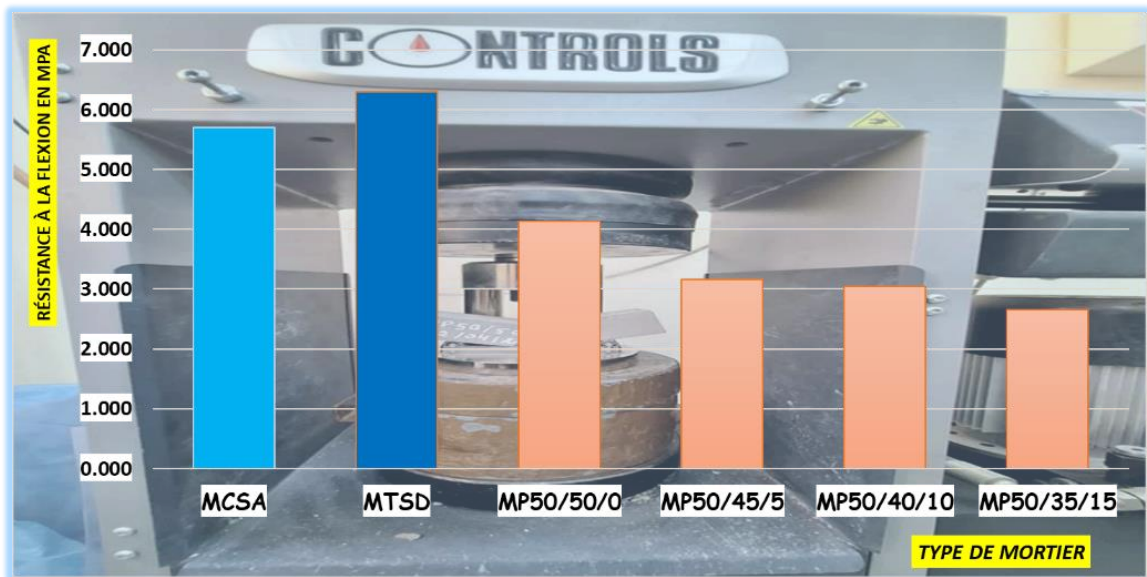


Figure III.3 : Résistance à la flexion des différents mortiers à 28 jours

Dans le cadre de cette étude, il a été constaté que la résistance à la flexion des mortiers diminue progressivement avec l'introduction des grains PET en substitution partielle du filler de sable recyclé. La formulation MP50/50/0, sans ajout de plastique, enregistre la résistance la plus élevée parmi les mortiers MP, se rapprochant ainsi des valeurs obtenues pour les mortiers de référence MCSA et MTSD. Cette performance peut être attribuée à la texture et à la forme des particules du filler de sable recyclé, 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 progressif des grains PET dans les formulations MP50/45/5, MP50/40/10 et MP50/35/15 a entraîné une diminution notable de la résistance à la flexion, la valeur la plus faible étant enregistrée pour la formulation à teneur maximale en plastique. Ce

comportement s'explique 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 différents 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 les différents mortiers étudiés : le mortier de contrôle MCSA, le mortier témoin MTSD, ainsi que les mortiers formulés avec un remplacement partiel du sable de dune par du filler de sable recyclé FSR et l'ajout de grains PET. La résistance à la compression a été évaluée en calculant la moyenne de six échantillons prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

L'analyse de cette Figure montre que le mortier MTSD présente une résistance à la compression supérieure à celle du mortier MCSA, ce qui indique que la substitution totale du sable alluvionnaire par le sable de dune améliore les performances mécaniques en compression. Concernant les mortiers MP, la formulation MP50/50/0 sans grains PET enregistre la valeur la plus élevée de la série, dépassant légèrement le mortier MCSA, ce qui suggère que le filler de sable recyclé seul contribue positivement à la résistance mécanique.

Toutefois, avec l'introduction progressive des grains PET, une diminution continue de la résistance à la compression est observée pour les formulations MP50/45/5, MP50/40/10 et MP50/35/15. Cela suggère que l'incorporation des grains PET, en raison de leur faible adhérence avec la pâte cimentaire et de leur nature non réactive, affaiblit la structure du mortier et compromet sa résistance mécanique. Cette tendance confirme l'influence négative des grains plastiques sur les performances en compression des mortiers étudiés.

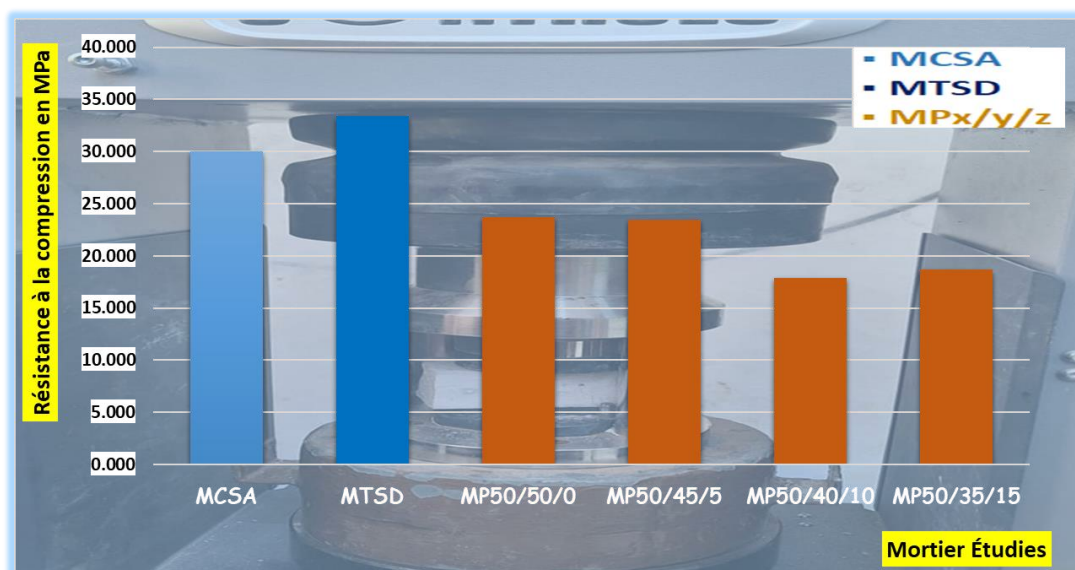


Figure III.4 : Résistance à compression des différents mortiers à 28 jours

La Figure III.4 illustre l'évolution de la résistance à la compression après 28 jours de cure à l'eau pour les différents mortiers étudiés. On remarque que le mortier MTSD enregistre la résistance la plus élevée parmi toutes les formulations testées, devançant le mortier MCSA, ce qui indique que le sable de dune contribue positivement aux performances mécaniques en compression.

Concernant les mortiers MP, la formulation MP50/50/0 sans grains PET présente la meilleure résistance de la série, affichant des performances proches de celles du mortier MCSA. Ces deux compositions montrent des valeurs similaires, ce qui suggère que le filler de sable recyclé seul ne compromet pas significativement la résistance mécanique.

Toutefois, avec l'introduction progressive des grains PET, une diminution continue est observée pour les formulations MP50/45/5, MP50/40/10 et MP50/35/15. Cette baisse peut s'expliquer principalement par la faible densité des grains PET comparée à celle des granulats minéraux. Une autre cause probable est la distribution aléatoire des grains plastiques dans la matrice, pouvant provoquer une accumulation désordonnée et accroître le volume des vides à l'interface entre les grains plastiques et la pâte cimentaire [71-72]. Par ailleurs, leur surface lisse et leur nature non réactive limitent l'adhérence avec les autres constituants du mortier, affaiblissant ainsi la cohésion globale du mélange et compromettant sa résistance mécanique [73,74].

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

La Figure III-5 regroupe les valeurs de vitesse de propagation des ondes ultrasonores obtenues pour l'ensemble des mortiers formulés. Les vitesses enregistrées se situent dans une plage qui reflète une compacité globalement acceptable pour toutes les formulations testées.

On note que le mortier MTSD affiche la vitesse la plus élevée de toutes les formulations, devançant le mortier MCSA. Cet écart s'explique par la finesse des grains du sable de dune qui comblent mieux les vides au sein de la matrice cimentaire, ce qui réduit la porosité et facilite la transmission des ondes.

Pour les mortiers MP, les formulations MP50/50/0 et MP50/45/5 donnent des vitesses qui restent dans une plage voisine de celle du MCSA, traduisant une structure interne comparable. En revanche, MP50/40/10 et MP50/35/15 accusent une baisse notable, leurs valeurs tombant dans la zone moyenne de la classification UPV. Ce recul est lié à la présence croissante des grains PET qui, du fait de leur distribution irrégulière dans la matrice, génèrent des zones de vides à l'interface avec la pâte cimentaire et perturbent le passage des ondes ultrasonores, signe d'une compacité moins bonne.

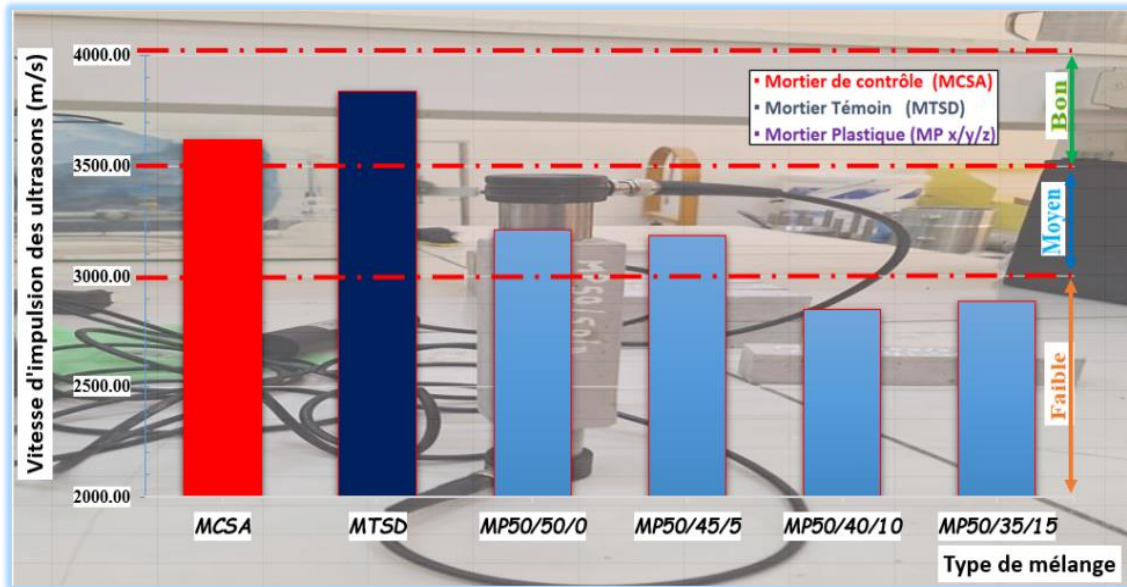


Figure III.5 : itesse d'impulsion des ultrasons (UPV) des différents mortiers à 28 jours

On remarque que les mortiers MP50/40/10 et MP50/35/15 donnent des vitesses de propagation plus faibles que celles du MCSA et du MTSD. Cette baisse est liée avant tout à la présence des grains PET qui, en se dispersant de façon irrégulière dans le mélange, créent des zones de discontinuité et augmentent le nombre de vides au sein de la matrice. Le manque d'accrochage entre ces grains et la pâte cimentaire, ajouté à leur légèreté, laisse des espaces vides à leur contact avec le reste du mélange, ce qui nuit à la compacité du mortier et freine le passage des ondes.

Ce constat rejoint ce qui a été trouvé lors des essais de compression dans la Figure III-5, puisque les mortiers qui ont donné les meilleures vitesses UPV sont les mêmes qui ont montré les résistances les plus élevées. Cela montre bien que plus le mortier est dense et compact, meilleures sont ses performances aussi bien mécaniques qu'acoustiques.

III.3.4. Absorption d'eau par immersion totale :

L'absorption d'eau désigne la capacité d'un matériau à laisser pénétrer les molécules d'eau dans sa structure interne à travers ses pores et ses sites hydrophiles, où ces molécules forment des liaisons avec les constituants du matériau. Ce phénomène est considéré comme l'un des principaux facteurs de vieillissement des matériaux, notamment les polymères.[75]

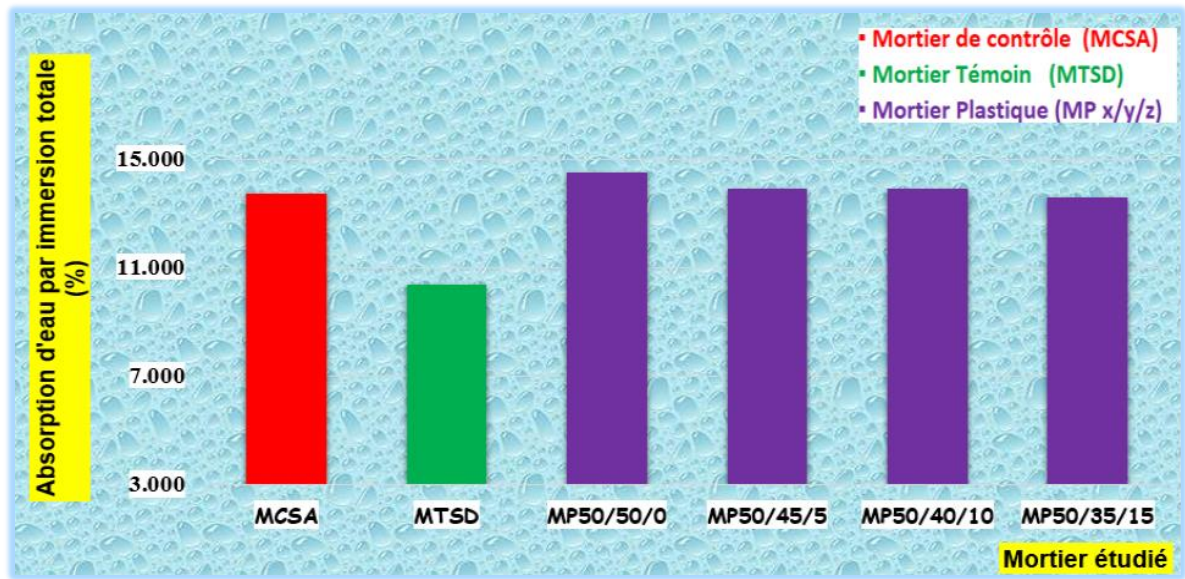


Figure III.6 : Absorption d'eau par immersion totale des différents mortiers à 28 jours

En regardant la Figure III.6, le mortier MTSD se démarque avec la valeur d'absorption la plus basse de tous les mélanges testés, loin devant le mortier MCSA. Ce résultat montre que le sable de dune seul donne au mortier une meilleure tenue face à la pénétration de l'eau.

Pour les mortiers MP, tous les mélanges dépassent les valeurs du MTSD et du MCSA en termes d'absorption. C'est la formulation MP50/50/0, sans aucun grain PET, qui enregistre le chiffre le plus élevé de la série. En ajoutant progressivement les grains PET, on note une légère baisse d'un mélange à l'autre, MP50/45/5, MP50/40/10 et MP50/35/15 affichant des valeurs qui descendent petit à petit, sans pour autant atteindre celles des deux mortiers de référence.

La hausse générale de l'absorption par rapport au MTSD et au MCSA s'explique par le fait que les grains PET, mal répartis dans le mélange, laissent des espaces vides à leur contact avec la pâte cimentaire, ce qui ouvre la voie à l'eau. La baisse légère qui suit avec l'augmentation du taux de PET vient probablement du fait que ces grains repoussent naturellement l'eau, limitant ainsi son absorption à partir d'un certain niveau.

III.3.5. Retrait/ gonflement :

En observant la Figure III.7, on remarque tout de suite un écart important entre les mortiers MP d'un côté et les mortiers MCSA et MTSD de l'autre, ces derniers affichant des valeurs de retrait bien plus faibles que toutes les formulations MP testées.

Du côté des mortiers MP, la formulation MP50/50/0 présente déjà un retrait élevé sans aucun ajout de grains PET. En introduisant progressivement les grains PET, on note que MP50/45/5 et MP50/35/15 voient leur retrait augmenter davantage, alors que MP50/40/10 se

démarque avec une valeur légèrement plus basse que les autres mélanges MP. Cette irrégularité dans la tendance peut être liée à la distribution non uniforme des grains plastiques dans la matrice, qui modifie localement la capacité du mortier à retenir l'humidité.

La forte hausse du retrait dans les mortiers MP par rapport aux deux références s'explique probablement par la finesse des matériaux utilisés qui favorise une évaporation plus rapide de l'eau, accentuant ainsi les déformations dimensionnelles. Cependant, la nature flexible des grains PET pourrait jouer un rôle dans la limitation de la fissuration en absorbant une partie des contraintes internes liées au séchage.

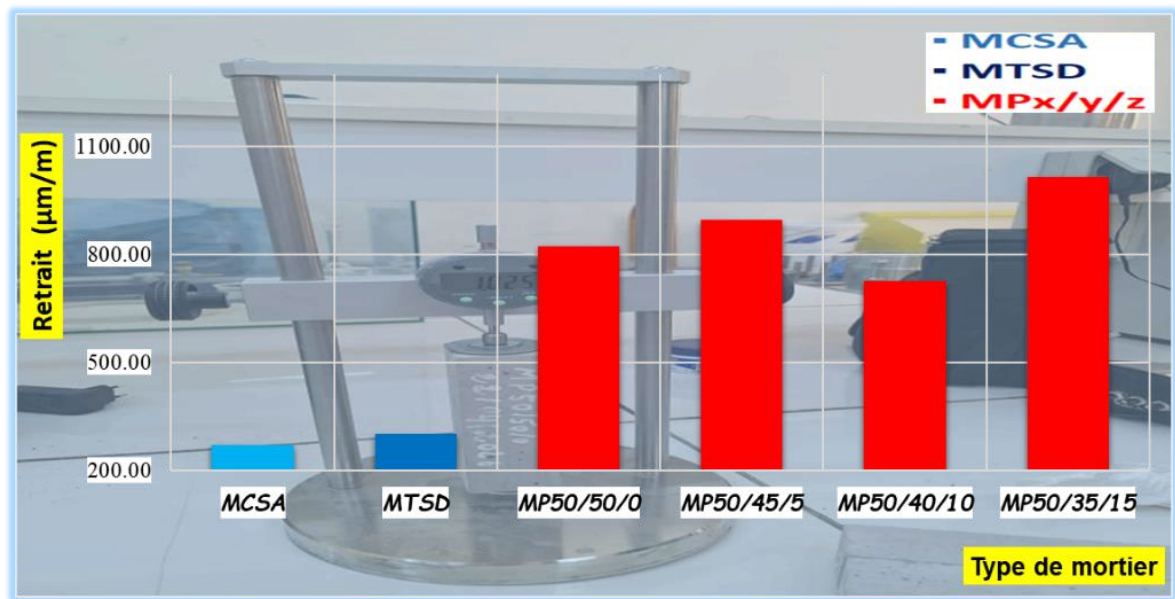


Figure III.7: Retrait des différents mortiers à 28 jours

III.3.6. Permeabilité à l'eau :

La perméabilité désigne la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous l'effet d'un gradient de pression. Elle est indépendante des propriétés du fluide saturant, contrairement à la conductivité hydraulique. Elle est fortement influencée par les caractéristiques du milieu poreux, notamment la porosité, la tortuosité et la connectivité des pores. Plus la porosité est élevée et connectée, plus la résistance au flux diminue, et moins la tortuosité est marquée, plus la perméabilité augmente. Elle dépend également de la nature des constituants du matériau, en particulier les granulats utilisés. [76,77]

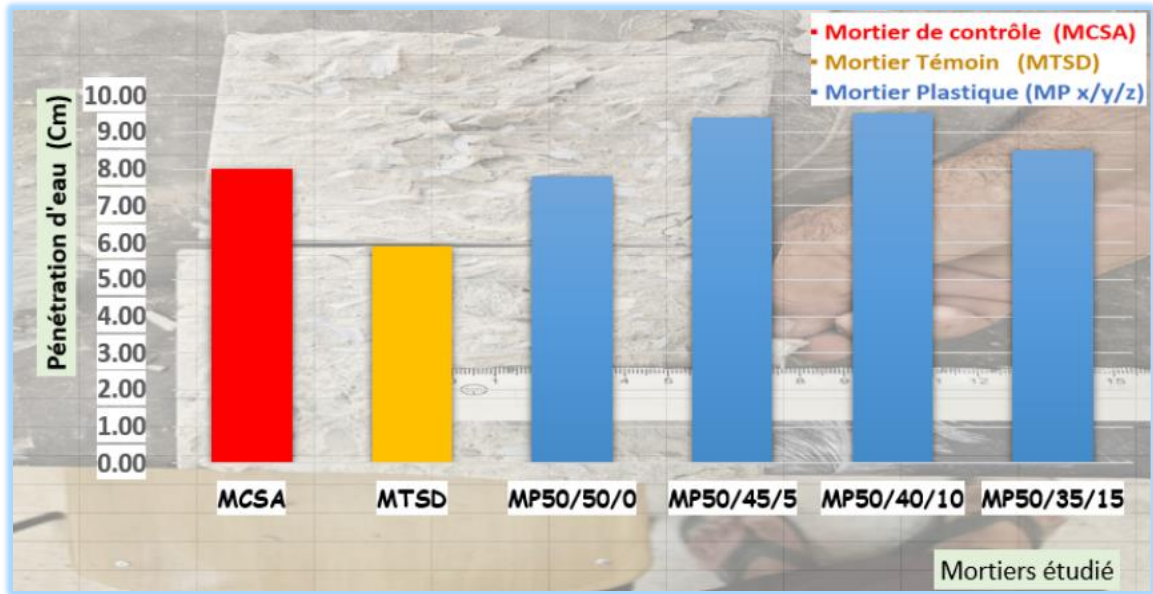


Figure III.8 : Profondeur de pénétration d'eau des différents mortiers à 28 jours

La Figure III.8 regroupe les valeurs du coefficient de perméabilité K obtenues pour l'ensemble des mortiers étudiés. On remarque que le mortier MTSD enregistre la valeur la plus faible de tous les mélanges testés, devançant le mortier MCSA. Cela montre que le sable de dune seul confère au mortier une meilleure résistance au passage de l'eau, grâce à une microstructure plus compacte et moins poreuse.

Concernant les mortiers MP, toutes les formulations affichent des coefficients de perméabilité nettement supérieurs à ceux du MCSA et du MTSD. La formulation MP50/50/0 sans grains PET enregistre la valeur la plus faible de la série. Avec l'introduction progressive des grains PET, les formulations MP50/45/5 et MP50/40/10 montrent une augmentation du coefficient de perméabilité, tandis que MP50/35/15 marque un léger recul par rapport à MP50/40/10.

Cette hausse générale de la perméabilité dans les mortiers MP peut être liée à la distribution irrégulière des grains PET dans la matrice, qui génère des vides supplémentaires à leur interface avec la pâte cimentaire, favorisant ainsi le passage de l'eau. Par ailleurs, la faible adhérence des grains plastiques avec les autres constituants du mortier contribue à augmenter la connectivité des pores et à réduire la compacité globale du mélange.

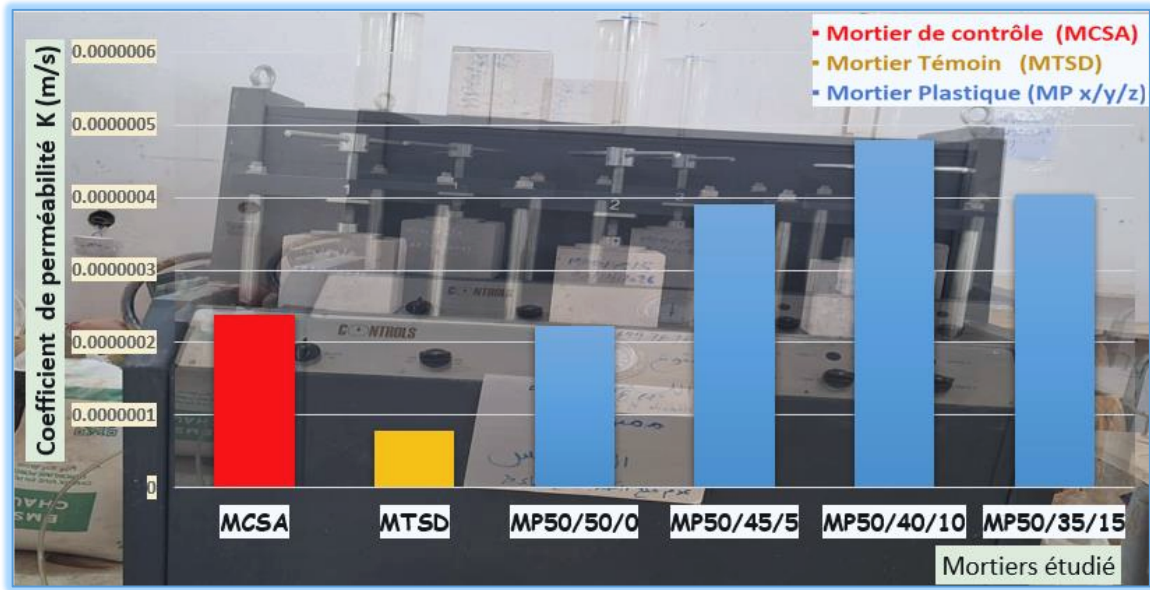


Figure III.9 : coefficient de perméabilité des différents mortiers à 28 jours

Les mortiers qui présentent de faibles valeurs de K sont ceux qui ont une structure interne dense et bien organisée. Cette compacité est généralement liée à un faible rapport eau/liant et à l'utilisation d'ajouts minéraux qui viennent combler les vides et réduire la porosité capillaire. A contrario, les mortiers dont les coefficients de perméabilité sont plus élevés ont tendance à avoir une structure plus lâche et plus poreuse, ce qui peut venir d'un excès d'eau lors du gâchage, d'une compaction insuffisante ou d'une faible réactivité des matériaux utilisés. Tout cela rejoint les principes de transport dans les matériaux cimentaires, où la perméabilité dépend avant tout de la porosité totale, de la taille des pores et de la façon dont ils sont reliés entre eux. En fin de compte, l'examen des coefficients de perméabilité permet à la fois de classer les mortiers selon leurs performances face aux fluides et d'évaluer indirectement la qualité de leur composition et de leur mise en place.

III.3.7. Résistance aux chocs :

En observant la Figure III.10, on remarque que le mortier MTSD enregistre la résistance aux chocs la plus faible de tous les mélanges testés, bien en dessous du mortier MCSA. Cela montre que le sable de dune seul confère au mortier une faible capacité à absorber les chocs mécaniques.

Concernant les mortiers MP, toutes les formulations dépassent largement les deux mortiers de référence MCSA et MTSD. On note une augmentation progressive et continue de la résistance aux chocs avec l'accroissement du taux de grains PET. La formulation MP50/50/0 sans grains PET enregistre la valeur la plus faible de la série, tandis que MP50/35/15 avec le taux le plus élevé de PET affiche la meilleure performance.

Cette amélioration notable avec l'augmentation de la teneur en PET s'explique par la nature élastique et flexible des grains plastiques, qui leur permet d'absorber et de dissiper l'énergie des chocs au lieu de la transmettre brutalement à la matrice cimentaire. Les grains PET jouent ainsi un rôle d'amortisseur au sein du mortier, retardant l'apparition des fissures et augmentant le nombre de coups nécessaires avant la rupture de l'éprouvette.

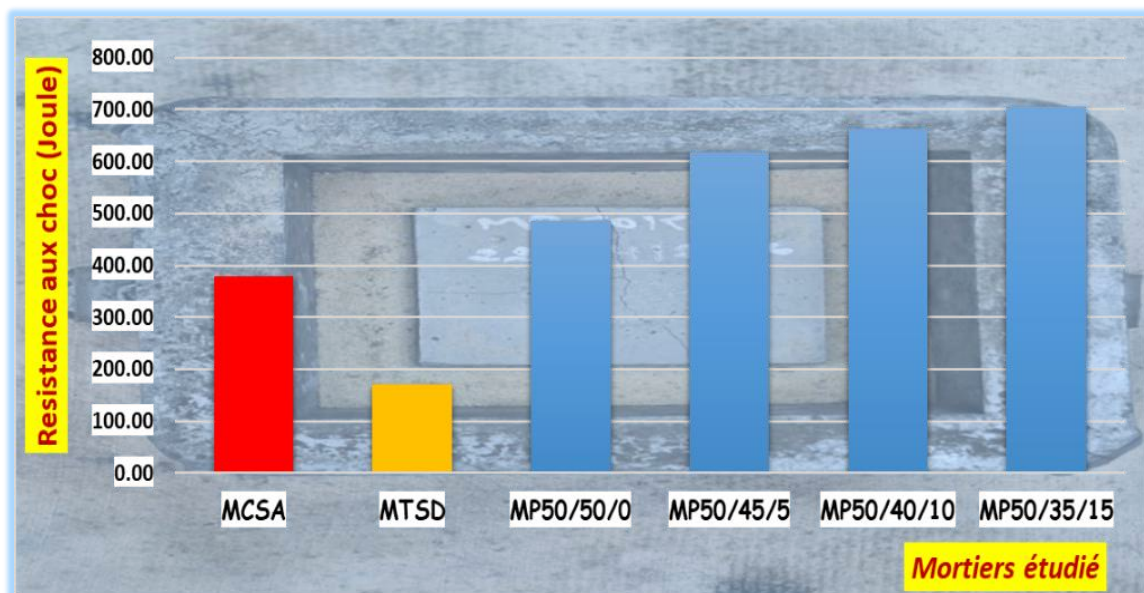


Figure III.10 : Résistance aux chocs des différents mortiers à 28 jours

III.4. CONCLUSION :

Ce chapitre a regroupé l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les différentes formulations de mortier étudiées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Les essais réalisés ont couvert plusieurs aspects, allant de l'ouvrabilité et de la densité à l'état frais, jusqu'aux propriétés mécaniques, physiques et de durabilité après 28 jours de cure.

Les résultats montrent que le mortier MTSD à base de sable de dune affiche de meilleures performances en compression, en flexion et en résistance à la pénétration de l'eau par rapport au mortier MCSA. En revanche, sa résistance aux chocs reste la plus faible de toutes les formulations testées.

Pour les mortiers MP, l'introduction progressive des grains PET entraîne une baisse des résistances mécaniques et une hausse de la perméabilité et de l'absorption d'eau, ce qui s'explique par la faible adhérence de ces grains avec la pâte cimentaire et leur distribution irrégulière dans la matrice. Toutefois, ces mêmes grains PET ont montré un apport très positif sur la résistance aux chocs, qui augmente de façon continue avec leur taux d'incorporation, confirmant leur rôle d'amortisseur au sein du mortier.

En somme, les formulations à base de sable de dune avec incorporation de filler recyclé et de grains PET présentent un comportement acceptable pour certaines applications, notamment celles exigeant une bonne résistance aux sollicitations dynamiques, tout en maintenant une ouvrabilité satisfaisante lors de la mise en œuvre.

Conclusions generales
&
Recommandations

I. CONCLUSIONS GÉNÉRALES :

Dans ce travail, nous avons cherché à savoir si les matériaux disponibles localement à El-Oued — le sable de dune, les déchets de béton et le plastique recyclé — peuvent réellement servir à fabriquer des mortiers utilisables en construction, avec incorporation de filler de béton démolé (FBD) et de granulats plastiques issus du recyclage de bouteilles PET. L'objectif était double : valoriser des matériaux locaux sous-exploités et proposer une solution concrète au problème des déchets plastiques dans le secteur du bâtiment.

Les résultats obtenus sont globalement cohérents et permettent de tirer plusieurs conclusions.

❖ Sur l'utilisation du sable de dune :

Le sable de dune d'El-Oued s'est révélé être un matériau performant. Sa finesse et sa forme arrondie lui confèrent une fluidité naturelle au mortier frais, sans recours à des adjuvants. Le mortier MTSD — dans lequel le sable alluvionnaire est totalement remplacé par du sable de dune — a affiché les meilleures performances en compression, en flexion et en résistance à la pénétration de l'eau, dépassant même le mortier de contrôle MCSA à base de sable alluvionnaire classique.

Ce qu'on n'attendait pas forcément, c'est que ce sable dépasse en résistance le sable alluvionnaire classique le sable de dune, longtemps considéré comme inutilisable en construction, peut constituer une vraie alternative aux sables conventionnels de plus en plus rares et coûteux.

❖ Sur l'incorporation du filler de béton démolé :

Le filler de béton démolé (FBD), utilisé seul sans PET (formulation MP50/50/0), n'a pas détérioré de manière significative les performances mécaniques par rapport au mortier de contrôle. Ce résultat justifie son utilisation comme matériau d'addition à condition de maîtriser le dosage. Au-delà de 50% de substitution, une étude complémentaire serait nécessaire pour vérifier la tenue à long terme.

❖ Sur l'incorporation des granulats PET :

L'ajout de granulats PET a produit des effets contradictoires selon la propriété étudiée, ce qui rend leur évaluation plus nuancée.

D'un côté, les résistances mécaniques — compression et flexion — diminuent progressivement avec l'augmentation du taux de PET. Cette baisse s'explique essentiellement par la mauvaise adhérence entre la surface lisse des grains plastiques et la pâte cimentaire. Les

mesures UPV confirment ce constat : plus le taux de PET augmente, plus la compacité interne du mortier diminue. On observe également une augmentation de l'absorption d'eau et de la perméabilité, liée aux vides créés à l'interface grain-pâte.

De l'autre côté, la résistance aux chocs s'améliore de façon nette et continue avec l'augmentation du taux de PET. La formulation MP50/35/15 a enregistré la meilleure performance dans cet essai, loin devant les mortiers de référence. Ce comportement s'explique par la nature flexible des grains plastiques qui absorbent l'énergie des chocs au lieu de la transmettre brutalement à la matrice.

En matière de retrait, les mortiers MP présentent des valeurs plus élevées que les références, mais la flexibilité des grains PET semble limiter partiellement l'apparition de fissures.

En somme, les mortiers formulés ne peuvent pas remplacer les mortiers structurels classiques, mais ils présentent un intérêt réel pour des applications spécifiques nécessitant une bonne résistance aux sollicitations dynamiques et un allègement de la structure.

II. RECOMMANDATIONS :

À partir des résultats obtenus et des lacunes identifiées au cours de cette étude, plusieurs pistes sont proposées pour améliorer et prolonger ce travail.

Traitement des granulats PET avant incorporation :

Le principal problème rencontré est la faible adhérence entre les grains PET et la pâte cimentaire. Un traitement de surface préalable — par sablage mécanique ou par l'application d'agents de couplage — pourrait considérablement améliorer cette liaison et limiter la perte de résistance. Cette piste mérite d'être explorée en priorité dans les recherches futures.

❖ Ajout d'additions minérales actives :

L'utilisation de fumée de silice ou de cendres volantes comme substitut partiel du ciment pourrait compenser la dégradation des performances mécaniques due au PET. Ces additions améliorent la microstructure de la pâte cimentaire par réaction pouzzolanique et réduisent la porosité capillaire. Leur effet sur les formulations MP n'a pas été testé dans cette étude et représente une voie prometteuse.

❖ Élargir les essais de durabilité :

Les essais réalisés dans cette étude couvrent les propriétés de base à 28 jours. Pour une évaluation plus complète, il serait utile de tester :

- La résistance aux attaques sulfatiques et aux chlorures, particulièrement importantes dans les régions désertiques où les sols peuvent être agressifs.

- Le comportement sous cycles thermiques, car les variations de température sont importantes à El-Oued.

- La caractérisation microstructurale par MEB (microscopie électronique à balayage) pour visualiser directement l'interface PET-pâte cimentaire et mieux comprendre les mécanismes de dégradation.

❖ Optimiser le dosage par plans d'expériences :

Les formulations testées ont été choisies de façon progressive mais sans optimisation mathématique. L'application d'un plan d'expériences (type Box-Behnken ou Taguchi) permettrait d'identifier les combinaisons optimales de SD, FBD et GP pour maximiser simultanément la résistance mécanique et la durabilité, tout en minimisant la quantité de ciment utilisée.

❖ **Étude technico-économique :**

Un aspect important n'a pas été abordé dans ce travail : le coût. Une comparaison économique entre les mortiers formulés et les mortiers conventionnels serait nécessaire pour évaluer la viabilité industrielle de cette approche. La disponibilité locale du sable de dune et la gratuité relative des déchets PET et de béton constituent des avantages économiques potentiellement significatifs qu'il faudrait quantifier.

Identifier des applications adaptées :

Plutôt que de chercher à concurrencer les mortiers structurels, il serait plus pertinent d'orienter ces formulations vers des applications où leurs propriétés spécifiques sont des atouts:

- Revêtements de sol industriel soumis à des chocs et des impacts répétés.
- Éléments de protection et de rembourrage dans les constructions légères.
- Cloisons non porteuses et panneaux de façade en zones désertiques.
- Matériaux d'isolation thermique pour les constructions à faible coût en régions sahariennes.

Les résultats sont prometteurs, mais ils restent limités à 28 jours et à des conditions de laboratoire. Ce qu'on peut dire avec certitude, c'est que le sable de dune d'El-Oued mérite d'être pris au sérieux comme matériau de construction — les chiffres le confirment. et de déchets recyclés avec des performances acceptables pour certaines applications. Le sable de dune de la région d'El-Oued constitue une ressource réelle que le secteur du bâtiment algérien gagnerait à exploiter davantage. Les perspectives ouvertes par cette recherche sont nombreuses, et des études complémentaires permettront sans doute d'affiner les formulations et d'élargir leur champ d'application.

Références bibliographiques

- [1] VITchem, Matériaux cimentaires, disponible sur : <https://fr.vitchem.com>
- [2] Pr D, Zerig T. Contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de sable de dune avec ajouts. 2024
- [3] GHOMARI, Fouad, Science des matériaux de construction, Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Aboubekr Belkaid, Année universitaire 2005–2006.
- [4] Exemple d'un gâchait de mortier : Balhachemi S., Berrafa F., (2017) : "La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique", Mémoire de magister en génie civil, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain T'émouchent (Consulter le 6/3/2021).
- [5] KADDAR, Zakariya; AKKAR, Belkacem , Étude de l'effet du sable de dune sur la durabilité des bétons , Université de Djelfa 2014
- [6] Sable de dune : https://fr.freepik.com/photos-gratuite/plan-vertical-motifs-belles-dunes-sable-dans-desert_11354046.htm (Consulter le 7/3/2021)..
- [7] AI Al-hadithi. "Improving Impact and Mechanical Properties of Gap-Graded Concrete by Adding Waste Plastic Fibers" 2014.
- [8] N. Meftah, 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>.
- [9] SEE. Khay, Neji J, Loulizi A. "Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements". Construction Building Materials 2010;24; 1790-5. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.008>.
- [10] B. Krobba Bouhicha M, Kenai S, Courard L. "Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and Stipa tenacissima microfibers plant". Construction Building Materials 2018;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200>.
- [11] 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>.
- [12] Slamene Hocine ; "Rapport de synthèse pour confirmation, N° 4: CRNB, 03 Octobre 2009.
- [13] Dr. Noui Abdelkader Institut des Séances de la terre et de L'univers, Université Batna 2 Batna 05078, Algérie
- [14] 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". *Journal African Earth sciences* 2017;125:18 -26
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.007>.
- [15] A. Sdiri, 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* <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0450-5>.
- [16] M. Bédérina, Khenfer MM, Dheilly RM, Quéneudec M. Reuse of local sand "Effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes". *Cement Concrete Research* 2005;35:11729
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.006>.
- [17] G.V. Bhagat, 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.jobe.2022.104565>.
- [18] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performanc"e *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2016;83:98–112 <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- [19] S. Kawashima, Shah SP. "Early age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber reinforced cementitious materials". *Cement Concrete Composite* 2011;33:201–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>.
- [20] MS. Meddah, Bencheikh M. "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials". *Construction Building Materiles* 2009;23:3196–205.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017>.
- [21] S. Spadea, Farinal, Carrafiello A, "Fraternali F. Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement". *Construction Building Materiles* 2015;80:200–9 .
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>.
- [22] G. Ramakrishna, Sundararajan T. "Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs" A comparative study. *Cement Concrete Composite* 2005;27:54753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>.
- [23] F. Pacheco-Torgal, Jalali S. "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres "A review. *Construction Building Materiles* 2011;25:57581.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.
- [24] LEGHRIEB, Youcef. (2012). Étude et valorisation des sables des dunes dans la confection des briques (Sable de la cuvette d'Ouargla). Thèse de Doctorat en Sciences, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger.

-
- [25] Fiche matériau : Le flaconnage en PET.” Au Comptoir des Flacons, https://www.aucomptoirdesflacons.com/fiche-materiau-flaconnage-en-pet-pxl-19_22.html.
- [26] H. Mohammed, 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>.
- [27] L'Algérie Aujourd'hui. (2023, 26 septembre). Collecteurs de bouteilles en plastique : Ce nouveau phénomène en vogue. Consulté le 24 mai 2026, sur <https://lalgerieaujourd'hui.dz/collecteurs-de-bouteilles-en-plastique-ce-nouveau-phenomene-en-vogue/>
- [28] I. Almeshal, Tayeh BA, Alyousef R, Alabduljabbar H, Mustafa Mohamed A, Alaskar A. "Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites" A review. Construction Building Materiles. 2020;253:119146.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146>.
- [29] Traore, B. (2018). Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés) : Amélioration de la résistance par des charges en argiles. Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté et Université Félix Houphouët-Boigny, France/Côte d'Ivoire.
- [30] 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 BuildMater 2014;52:236–44.
- [31] C Albano , 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>.
- [32] Correia JR, Lima JS, De Brito J. "Post fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates". Cement Concrete Composite 2014;53:187–99 . <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004>.
- [33] Silva R V., De Brito J, Saikia N. "Influence of curing conditions on the durabilityrelated performance of concrete made with selected plastic waste aggregates". Cement Concrete Composite 2013;35:23–31.<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>.
- [34] 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 self compacting concrete". *Journal of Cleaner Production* 2016;112:2363–73. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.
- [35] M Hossain, P Bhowmik, K Shaad. "Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent material". *Progress Agriculture* 2016;27:383–91. <https://doi.org/10.3329/pa.v27i3.30835>.
- [36] R Sharma, Kausik R ST. "Effect of P.E.T Fibres Different Aspect Ratio on Fresh and Mechanical Properties of Cement Concrete". *Young Grad Res Symp* 2014;1:3–6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2418.7609>.
- [37] Marzouk OY, Dheilily RM, Queneudec M. "Valorization of post consumer waste plastic in cementitious concrete composites". *Waste management* 2007;27:310–8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>.
- [38] Noui, A. Chapitre 2 : Granulats. Institut des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Batna 2, Algérie https://geo.univ-batna2.dz/sites/default/files/geo/files/chapitre_2_granulats.pdf.
- [39] 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>.
- [40] NBR N-53. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. ABNT-Brazilian Stand 2003:1–8.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Québaud M., Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats, Thèse de doctorat. Université d'Artois, France, 1996.
- [45] Goufi, N., Idir, R., Kerdal, D., Abidelah, A., & Kaid, N. (2019). Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques de bétons de granulats recyclés de béton pour la valorisation de ce type de granulats. *Academic Journal of Civil Engineering (AJCE)*, Special Issue, Volume 36(1), pp. 150-154.

- [46] TALEB K.« Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des Fines de mortiers de démolition sur les propriétés des mortiers » mémoire master Université deTizi-Ouzou,2016
- [47] A. Boucedra, M. Bederina, Y. Ghernouti. "Studyof the acoustical and thermomechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates". Construction Building Materiles 2020;256:119447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>.
- [48] NASSAH D.« Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales) polypropylène) sur les propriétés physico mécaniques des mortiers fibrés » mémoire master Université de M'Hamed bougara –Boumerdas,2017
- [49] SAADANI S. « Comportement des béton a base de granulats recycles»mémoire magister Université deConstantine.2006
- [50] Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, RECORD 02-0807/1A - février 2005.
- [51] SPERANDIO K : identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestiondes déchets ménagers mises en oeuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.
- [52] Salgado F. de Andrade, Silva F. de Andrade. "Recycled aggregates from construction and demolition waste to wards an application on structural concrete: A review". J Build Eng 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [53] S Kotwal, H Singh, R Kumar. "Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates". Materials Today: Proceedings 2021;48:1032–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.436>.
- [54] A Hammoudi, K Moussaceb , C Belebchouche, F Dahmoune. "Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM (prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates". Construction Building Materiles 2019;209:425–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>.
- [55] L Ferreira, J De Brito, M Barra. "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties". MagazineConcreteResearch 2011;63:617 27.<https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>.
- [56] Actu-Environnement, Recyclage des déchets du bâtiment : le béton et les granulats, [en ligne] , disponible sur : <https://www.actu-environnement.com/ae/news/recyclage-dechets-batiment-beton-granulats-14781.php4>, consulté le 25/05/2026

- [57] DORBANE, N., GUENDOUZI, B., & MEZRIG, A. (2021). Valorisation des déchets plastiques, une opportunité pour le développement local durable. Référence empirique à la wilaya de Tizi-Ouzou. *Journal of North African Economies*, 17(25), 33-50.
- [58] BELLAHCENE, M. (2009). Les matières plastiques et leur impact sur l'environnement. *Revue de l'Algerian Petroleum Institute*, 3(1), 35-41.
- [59] [ajol-file-journals_314_articles_191004_submission_proof_191004-3745-484582-1-10-20191108.pdf](#)
- [60] 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.
- [61] 1015 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6:détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre 1999. Norme Française 1999
- [62] 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>.
- [63] IS 13311 (Part 1). Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity. *Bur Indian Satandards* 1992;1:1–14.
- [64] 11-1015] NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci 2019.
- [65] EN N 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019.
- [66] 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>.
- [67] 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>.
- [68] 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>.
- [69] Meftah N, Mahboub MS. Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of ElOued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses. *Silicon* 2020;12:147–53. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00109-5>.

- [70] Pereira De Oliveira LA, Castro-Gomes JP. Physical and mechanical behaviour of recycled PET reinforced mortar. *Constr Build Mater* 2011;25:1712–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [71] 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>.
- [72] 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>.
- [73] Pereira De Oliveira LA, Castro-Gomes JP. Physical and mechanical behaviour of recycled PET reinforced mortar. *Constr Build Mater* 2011;25:17127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [74] Al-hadithi AI. Improving Impact and Mechanical Properties of Gap-Graded Concrete by Adding Waste Plastic Fibers 2014.
- [75] Chams, F. (2009). Développement de systèmes de traction pour véhicules électriques hybrides (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard). theses.fr. [<https://theses.fr/2009CHAMS011>]
- [76] Dana E., Contribution à la caractérisation des coulements biphasiques dans les matériaux poreux. Etude expérimentale sur trois grades, Thèse de Doctorat, Université Lille 1, 1999.
- [77] Dullien F.A.L., Porous media, fluid transport and pore structure, 2nd edition, Academic Press, San Diego 1992,

