

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Thème

Etude de l'effet combiné de la fumée de silice-fibres polypropylène sur les caractéristiques des mortiers à base de sable de dune et sable de béton recyclé

Réalisé par :

Mr OUBELLIL Aghiles

Mémoire soutenu publiquement le 03/ 07/ 2024 devant le jury composé de :

Dr. KAHIL Amar Examineur

Dr. BOUKAIS Said Président

Dr. KHELIL Naxim Promoteur

Promotion : 2023/2024

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, Mr KHELIL Nacim, pour son encadrement exceptionnel, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi qu'à tout le personnel du laboratoire pour leur aide. Leurs connaissances approfondies dans le domaine, leur bienveillance et leur patience ont été déterminantes pour mener à bien ce travail.

Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude aux membres du jury, Mr Boukais Said et Mr KAHIL Amar, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Leurs expertises, leurs commentaires constructifs et leurs suggestions judicieuses ont grandement contribué à l'amélioration de la qualité de ce mémoire. Je les remercie chaleureusement pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce projet et pour leur participation à sa soutenance.

Je ne saurais oublier de remercier ma famille et mon ami DAOUI Yahia et ma collègue MAKKED Randa pour leur soutien inconditionnel et leur compréhension tout au long de cette aventure. Leur présence et leurs encouragements ont été un véritable moteur pour mener à bien ce mémoire.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : Étude bibliographique	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Sable de dune et son origine	4
I.2.1. Origine	4
I.2.2. Caractéristiques du sable de dune de Touggourt	5
I.2.3. Effet du sable de dune sur les matériaux cimentaires	6
I.2.4. Résistance à la compression et à la traction des mortiers à base de sable de dune.	7
I.2.5. Écoulement des mortiers à base de sable de dune	8
I.2.6. Absorption d'eau et porosité des mortiers à base de sable de dune	8
I.3. Le sable recyclé dans les mortiers	9
I.3.1. Définition	9
I.3.2. Composition et caractéristiques du sable recyclé	10
I.3.2.1. Composition	10
I.3.2.2. Granulométrie	11
I.3.2.3. Forme et texture des grains	11
I.3.2.4. Propriétés physiques	11
I.3.3. Types de sables recyclés	12
I.3.4. Caractéristiques du sable recyclé	13
I.3.4.1. Absorption d'eau élevée	13
I.3.4.2. Porosité accrue	13
I.3.4.3. Forme angulaire et texture rugueuse des grains	14
I.3.5. Effets du sable recyclé sur les matériaux cimentaires	14
I.3.5.1. Propriétés à l'état frais	14
I.3.5.2. Propriétés à l'état durci	15
I.3.5.3. Durabilité	17
I.3.6. Sable de dune et sable recyclé dans les mortiers	18
I.4. La fumée de silice et son apport aux propriétés des mortiers	21
I.4.1. Définition de la fumée de silice	21
I.4.2. Propriétés de la fumée de silice	22
I.4.2.1. Composition et structure	22
I.4.2.2. Activité pouzzolaniques	23

I.4.2.3. Absorption d'eau	23
I.4.3. Effets de la fumée de silice sur les matériaux cimentaires	23
I.4.3.1. Propriétés à l'état frais	23
I.4.3.2. Résistances mécaniques	23
I.4.4.3. Durabilité	24
I.4.3.4. Retrait et fissuration	24
I.4.4. Dosage et mise en œuvre de la fumée de silice	24
I.4.4.1. Dosage	24
I.4.4.2. Interaction avec les adjuvants	25
I.4.4.3. Cure et mûrissement	25
I.5. Les Fibres et leur apport aux propriétés des mortiers	25
I.5. Les Fibres et leur apport aux propriétés des mortiers	25
I.5.2. Diversité des fibres dans les matériaux cimentaires	26
I.5.2.1. Fibres synthétiques	26
I.5.2.2. Fibres naturelles	27
I.5.3. Les fibres de polypropylène	28
I.5.3.1. Types de fibres de polypropylène	28
I.5.3.2. Caractéristiques des fibres de polypropylène	28
I.5.3.3. Effets des fibres de polypropylène sur les propriétés des matériaux cimentaires	29
I.6.	
Conclusion	31
Chapitre II : Matériaux et procédures	32
II.1. Introduction	32
II.2. Matériaux utilisés	32
II.2.1. Ciment	32
II.2.2. Eau de gâchage	33
II.2.3. Fumée de silice	33
II.2.4. Fibres de polypropylène.	34
II.2.5. Sable	35
II.2.5.1. Analyse granulométrique	35
II.2.5.2. Module de finesse	38
II.2.5.3. Masse volumique du sable.	38
II.3. Confection des mortiers	41
II.3.1. Formulation des éprouvettes	41
II.3.2. Préparation des éprouvettes	45

II.3.3. Essai de caractérisation du mortier	45
II.3.3.1. Tests non destructifs	45
II.3.3.2. Tests destructifs	45
II.3.4. Mesure de vitesse ultrason	46
II.3.4.1. Principe de mesure	48
II.3.4.2. Classement de la qualité du béton	48
II.3.5. Absorption	48
II.3.6. Résistance à la traction par flexion	50
II.3.7. Résistance à la compression	51
II.4. CONCLUSION	52
Chapitre 3 : Résultats et discussions	53
III.1. Introduction	53
III.2. Résistance à la traction	53
III.2.1. Mortier témoin	52
III.2.2. Mortier avec de la FS	54
III.2.3. Mortier avec les fibres polypropylène	55
III.2.4. Mortier avec les fibres polypropylène et la fumée de silice (FFS)	56
III.3. Résistance à la compression	57
III.3.1. Mortier témoin	57
III.3.2. Mortier avec de la FS.	58
III.3.3. Mortier avec les fibres polypropylène.	59
III.3.4. Mortier avec fumée de silice et fibre polypropylène.	60
III.4. Observation.	61
III.4.1. Ultrason	61
III.4.2. Absorption	61
III.5. Conclusion	63
CONCLUSION GENERALE	64
BIBLIOGRAPHIE	66

Liste des Figures

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Figure I.1 : Sable de dune Touggourt.....	4
Figure I.2 : Grain de sable de dune sous microscope.....	5
Figure I.3 : Analyse granulométrique du sable de la région de Touggourt	6
Figure I.4 : Résistance à la compression et à la traction des mortiers à base de sable de dune	7
Figure I.5 : Exemple du processus de recyclage des déchets de béton	10
Figure I.6 : Courbe granulométrique d'un sable recyclé.....	11
Figure I.7 : Granulat recyclé sous microscope.....	13
Figure I.8 : Sable recyclé au MEB	14
Figure I.9 : Résistance à la compression d'un béton à base de sable recyclé	15
Figure I.10 : Résistance à la compression et à la traction	16
Figure I.11 : Sable recyclé.	18
Figure I.12 : Résistance à la compression et à la traction	20
Figure I.13 : Fumée de silice sous microscope	21
Figure I.14 : Fumée de silice.....	22
Figure I.15 : Fibre de polyéthylène, nylon, polypropylène.	26
Figure I.16 : Fibres de carbone, verre, jutes.....	27

Chapitre II : Matériaux et procédures

Figure II.1 : Caractéristiques techniques du ciment utilisé.	33
Figure II.2 : Fumée de silice utilisée.	33
Figure II.3 : Fibre polypropylène.....	34
Figure II.4 : Sable de dune et sable recyclé utilisés.	35
Figure II.5 : Tamiseuse électrique.	36
Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable recyclé.	37
Figure II.7 : Courbe granulométrique du sable dune Touggourt.	37
Figure II.8 : Essai de détermination de la masse volumique apparente.....	38
Figure II.9 : illustration de la mesure de la masse volumique absolue.	40

Figure II.10 : Principe de la confection des mortiers.	42
Figure II.11 : Mesure de la vitesse ultrasonore.	47
Figure II.12 : Éprouvettes cubiques utilisées pour l'absorption.	49
Figure II.13 : Test de résistance à la flexion	50
Figure II.14 : Principe de l'essai de flexion 3 points.	51
Figure II.15 : Test de résistance à la compression.	52

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Figure III.1 : Résultats de la résistance à la traction du mortier témoin	53
Figure III.2 : Résistance à la traction des mortiers FS vs mortier témoin.	54
Figure III.3 : Résistance à la traction des mortiers fibrés vs mortier témoin.	55
Figure III.4 : Résistance à la traction des mortiers FFS vs mortier témoin.	56
Figure III.5 : Courbe de résistance à la compression du mortier témoin	57
Figure III.6 : Résistance à la compression ⁵ des mortiers fibrés vs mortier témoin.	58
Figure III.7 : Résistance à la compression des mortiers fibrés vs mortier témoin.	59
Figure III.8 : Résistance à la traction des mortiers FFS vs mortier témoin	60
Figure III.9 : Résultats du test ultrason pour les mortiers testés.	61
Figure III.10 : Courbe d'absorption des mortiers	62

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Propriétés physiques et mécaniques de fibre polypropylène	34
Tableau II.2 : masses volumiques apparentes des sables de dune et recyclé	39
Tableau II.3 : masses volumiques absolues des sables de dune et recyclé	41
Tableau II.4 : pourcentages de sables de dune et recyclé.	42
Tableau II.5 : Formulation des éprouvettes prismatiques.	43
Tableau II.6 : Formulation des éprouvettes cubiques.	44
Tableau II.7 : Classification de la qualité des bétons selon la vitesse ultrasonore	48

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du bâtiment connaît actuellement un développement significatif à l'échelle mondiale. La croissance démographique et l'urbanisation rapide dans de nombreux pays ont entraîné une demande accrue de logements, de bâtiments commerciaux et d'infrastructures. Cette expansion soulève des préoccupations quant à l'utilisation excessive des ressources naturelles, notamment les granulats pour la confection du béton.

L'exploitation intensive des granulats de carrière et de rivière conduit à un épuisement des ressources, poussant le secteur à rechercher des alternatives durables. Dans ce contexte, la valorisation du sable de dune, abondant dans les régions désertiques comme le Sahara, apparaît comme une solution prometteuse. Bien que présentant une résistance moindre par rapport au sable de carrière, le sable de dune offre des caractéristiques physiques favorables pour une utilisation dans les mortiers et bétons.

Parallèlement, l'industrie du bâtiment s'oriente vers la valorisation des déchets industriels pour améliorer l'écosystème. Le béton recyclé, issu de la démolition de structures existantes, représente une source importante de granulats alternatifs. Son utilisation contribue à réduire l'exploitation des ressources naturelles et à minimiser les déchets de construction.

Dans cette optique de développement durable, l'incorporation des granulats susmentionnés dans la confection de matériaux cimentaire de type mortiers seraient d'un intérêt certain. L'objectif de ce travail de recherche, effectivement, est d'explorer les potentialités de valorisation du sable de dune et du sable de béton recyclé dans les mortiers, en combinaison avec de la fumée de silice et des fibres de polypropylène. La fumée de silice étant un sous-produit de l'industrie du silicium connue pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires tandis que les fibres de polypropylène, quant à elles, contribuent à réduire la fissuration et à améliorer la ténacité des mortiers et bétons. Cette étude vise par ailleurs à évaluer l'effet combiné de ces différents composants sur les caractéristiques, physiques, acoustiques et mécaniques des mortiers ainsi élaborés.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux. Le premier chapitre présentera une recherche bibliographique approfondie sur les mortiers à base de sable de dune et de sable recyclé, en explorant les différents types de sable et leur influence sur le comportement du mortier. Il abordera également l'utilisation des fibres de polypropylène et de la fumée de silice dans les matériaux

cimentaires. Le deuxième chapitre se concentrera sur la caractérisation des matériaux utilisés lors de cette étude, définira la méthode de formulation des mortiers, ainsi que les protocoles de conservation et d'essais menés sur les corps d'épreuve. Enfin, le troisième chapitre sera consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus, examinant l'effet de l'ajout de la fumée de silice ainsi que des fibres de polypropylène, et leur effet combiné sur les propriétés des mortiers à base de sable de dune et de sable de béton recyclé.

Cette étude s'inscrit dans une démarche de développement durable, visant à réduire l'utilisation des ressources naturelles actuellement sous-tension vis-à-vis de leur approvisionnement et à valoriser les matériaux alternatifs dans l'industrie de la construction.

Chapitre 1 : Étude bibliographique

I.1. Introduction

L'industrie de la construction fait face à des défis croissants en matière de durabilité et de gestion des ressources. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux alternatifs dans la fabrication de mortiers et de bétons suscite un intérêt grandissant. Parmi ces alternatives, le sable de dune et le sable recyclé émergent comme des solutions prometteuses pour réduire l'exploitation intensive des ressources naturelles tout en valorisant des matériaux locaux ou issus de la démolition.

Cette étude bibliographique se concentre sur deux types de sables non conventionnels : le sable de dune de Touggourt, issu de l'Erg Oriental dans le Sahara algérien, et le sable recyclé, provenant du concassage et du traitement des déchets de construction et de démolition. L'objectif est d'explorer les caractéristiques spécifiques de ces matériaux, leur impact sur les propriétés des mortiers, ainsi que les défis et les opportunités liés à leur utilisation dans l'industrie de la construction.

L'utilisation de la fumée de silice, un sous-produit pouzzolanique, peut contribuer à améliorer la résistance mécanique et la durabilité des mortiers à base de sable de dune ou de sable recyclé. De plus, l'ajout de fibres polypropylène peut également permettre d'augmenter la résistance à la traction et la ductilité de ces mortiers.

À travers une analyse approfondie de la littérature scientifique, nous examinerons l'origine et les propriétés physico-chimiques du sable de dune de Touggourt, ainsi que les différents types et caractéristiques du sable recyclé. Nous nous pencherons également sur les effets de ces sables alternatifs sur les performances mécaniques, l'ouvrabilité, la porosité et la durabilité des mortiers. Cette étude vise à fournir une base de connaissances solide pour favoriser l'utilisation responsable et efficace de ces matériaux dans la construction durable.

I.2. Sable de dune et son origine

I.2.1. Origine

Le sable de dune est formé par l'érosion éolienne des roches sédimentaires dans les régions désertiques, les calcaires et les argiles du Sahara, Le vent transporte et dépose ces particules de sable créant des dunes caractéristiques pouvant atteindre jusqu'à 300 mètres de hauteur. En Algérie, les vastes étendues du Sahara abritent d'immenses zones de dunes, appelées ergs, qui constituent une source abondante de sable de dune.

Le sable de dune de Touggourt provient spécifiquement de l'Erg Oriental, couvrant environ 192 000 km² dans le nord-est du Sahara algérien. Cet erg, l'un des plus grands au monde, s'étend également jusqu'en Tunisie et en Libye voisines., créant des dunes caractéristiques pouvant atteindre jusqu'à 300 mètres de hauteur.

D'autres régions connues pour leurs sables de dune en Algérie incluent Ouargla, Ghardaïa, Béchar et Adrar. La composition minéralogique et les propriétés de ces sables peuvent varier en fonction de leur origine géologique spécifique et de leur histoire de transport éolien. Par exemple, les sables de dune de Béchar contiennent une proportion plus élevée de minéraux ferrugineux, leur conférant une couleur rougeâtre caractéristique. [1]



Figure I.1 : Sable de dune Touggourt [2].

I.2.2. Caractéristiques du sable de dune de Touggourt

Le sable de dune de Touggourt est principalement composé de quartz (environ 96%), avec des quantités mineures de feldspaths (environ 2%), de calcite (environ 1%) et de minéraux argileux comme l'illite et la kaolinite. Sa composition minéralogique précise peut varier localement en fonction de la localisation spécifique des dunes dans l'Erg Oriental. Les propriétés physiques du sable de dune de Touggourt ont été étudiées par plusieurs chercheurs. Selon Bederina et al. [3], ce sable présente les caractéristiques suivantes :

- Granulométrie étalée, avec environ 80% des particules comprises entre 0.16 et 0.63 mm
- Forme arrondie des grains, avec un coefficient d'aplatissement moyen de 0.72.
- Masse volumique absolue de 2.65 g/cm^3 et apparente de 1.52 g/cm^3 .
- Absorption d'eau faible

La forme arrondie et lisse des grains de sable de dune est une caractéristique clé résultant de l'usure par le transport éolien sur de longues distances. Cette forme arrondie peut affecter l'adhérence avec la pâte de ciment dans les mortiers et bétons, influençant ainsi leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

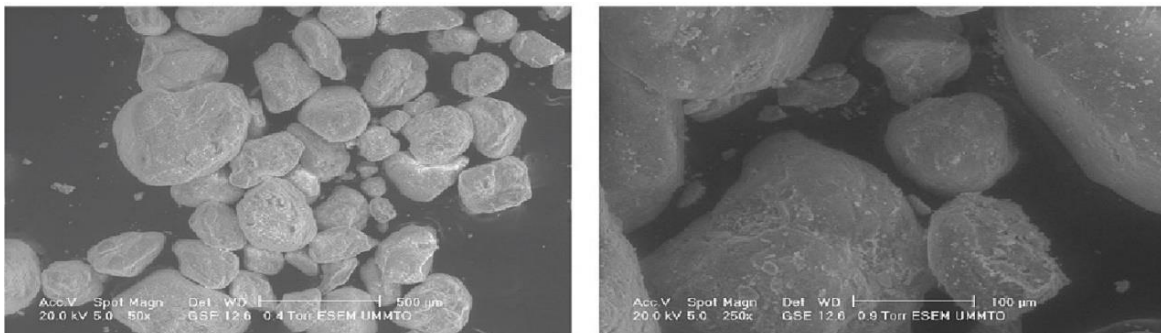


Figure I.2 : Grain de sable de dune sous microscope [2].

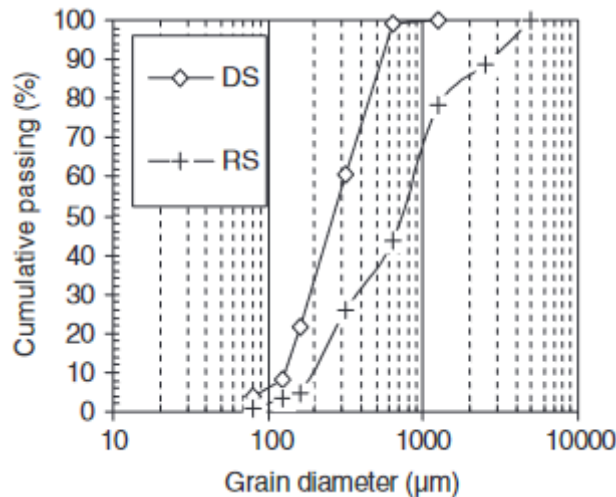


Figure I.3 : Analyse granulométrique du sable de la région de Touggourt [3].

I.2.3. Effet du sable de dune sur les matériaux cimentaires

L'utilisation du sable de dune dans les matériaux cimentaires, tels que les mortiers et les bétons, peut avoir un impact significatif sur leurs propriétés en raison de ses caractéristiques spécifiques. Plusieurs études ont montré que les mortiers et bétons à base de sable de dune présentent généralement une résistance à la compression et à la traction inférieure à ceux confectionnés avec des sables naturels traditionnels.

Cela peut être attribué principalement à la forme arrondie et lisse des grains de sable de dune, qui affecte l'adhérence avec la pâte de ciment. Cette faible adhérence crée des zones de transition de plus faibles résistances entre les grains de sable et la pâte de ciment, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau. De plus, la présence de minéraux argileux ou d'autres impuretés dans le sable de dune peut également avoir un impact négatif sur les propriétés des mortiers et bétons en affectant l'hydratation du ciment et la microstructure de la pâte [4].

Cependant, certaines études ont montré que l'utilisation de sable de dune peut améliorer certaines propriétés des matériaux cimentaires, comme l'ouvrabilité et la résistance à l'usure. La forme arrondie des grains facilite l'écoulement et le compactage des mélanges, réduisant ainsi la demande en eau et les risques de ségrégation. De plus, la dureté des grains de sable de dune peut augmenter la résistance à l'usure et à l'abrasion des mortiers et bétons [5].

L'impact du sable de dune sur les propriétés des matériaux cimentaires peut varier en fonction de sa composition minéralogique, de sa granulométrie, du rapport eau/ciment, de l'utilisation d'adjuvants et d'autres facteurs de formulation.

I.2.4. Résistance à la compression et à la traction des mortiers à base de sable de dune

De nombreuses études se sont penchées sur l'impact de l'incorporation de sable de dune sur la résistance à la compression et à la traction des mortiers. Les résultats montrent généralement une diminution de ces résistances par rapport aux mortiers conventionnels à base de sable de rivière, mais l'ampleur de cette diminution varie en fonction des proportions de sable de dune utilisées.

Cependant, des études ont montré qu'il est possible d'atténuer ces baisses de résistance en ajustant le pourcentage de sable de dune et en optimisant la formulation des mortiers. Par exemple, Bederina et al. [6] ont constaté que les mortiers incorporant un rapport sable de dune/sable naturel de 50/50 présentaient les meilleures performances mécaniques, avec une résistance à la compression et à la traction similaire aux mortiers de référence.

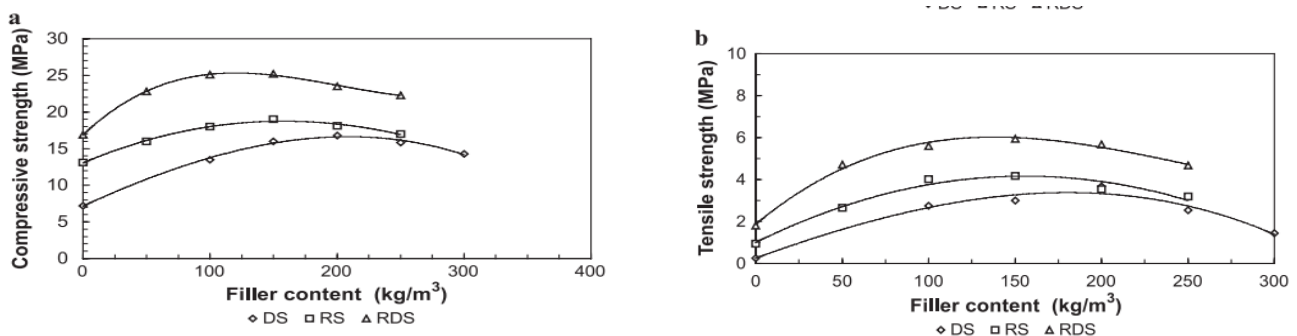


Figure I.4 : Résistance à la compression et à la traction des mortiers à base de sable de dune [6].

Les auteurs suggèrent qu'un mélange optimal de sable de dune et de sable naturel permet de compenser les déficits en résistance liés à l'utilisation exclusive de sable de dune, tout en bénéficiant des avantages de ce dernier, comme l'amélioration de l'ouvrabilité.

De plus, l'utilisation d'additions minérales telles que la fumée de silice, les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau peut également contribuer à améliorer les performances mécaniques des mortiers à base de sable de dune. Ces ajouts pouzzolaniques réagissent avec la chaux libre du ciment et la portlandite issue de l'hydratation pour former des composés cimentaires supplémentaires, renforçant ainsi la microstructure du mortier.

Les performances mécaniques des mortiers à base de sable de dune dépendent non seulement du pourcentage de sable de dune utilisé, mais aussi d'autres facteurs tels que le rapport eau/ciment, le type de ciment, la présence d'adjuvants et les conditions de cure.

I.2.5. Écoulement des mortiers à base de sable de dune

L'écoulement, ou l'ouvrabilité, des mortiers à base de sable de dune peut être affecté par la forme arrondie et lisse des grains de sable. Certaines études ont montré que ces mortiers nécessitent généralement une quantité d'eau plus élevée pour atteindre la même ouvrabilité que les mortiers conventionnels.

Cette demande en eau plus élevée est liée à la surface spécifique importante des grains du sable de dune. Cependant, l'augmentation de la teneur en eau peut avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers, en augmentant la porosité et en réduisant la résistance à long terme.

Des essais d'affaissement ou d'étalement, tels que le test d'étalement à la table à chocs, peut être utilisés pour évaluer l'ouvrabilité des mortiers à base de sable de dune et ajuster les formulations en conséquence. L'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau ou de super plastifiants peut également être envisagée pour améliorer l'ouvrabilité sans augmenter excessivement la teneur en eau [7].

Il est important de trouver un équilibre entre l'ouvrabilité désirée et les performances mécaniques et la durabilité requises pour les mortiers à base de sable de dune. Une ouvrabilité excessive peut compromettre les propriétés du matériau durci, tandis qu'une ouvrabilité insuffisante peut entraîner des problèmes de compactage et de mise en œuvre.

I.2.6. Absorption d'eau et porosité des mortiers à base de sable de dune

La porosité et l'absorption d'eau des mortiers à base de sable de dune sont des propriétés importantes pour leur durabilité et leur résistance aux environnements agressifs. Plusieurs études ont montré que ces mortiers présentent généralement une porosité et une absorption d'eau plus élevées que les mortiers conventionnels.

Cela peut être attribué à la forme arrondie des grains de sable de dune, qui crée une structure plus poreuse dans le mortier durci. Cette porosité élevée peut faciliter la pénétration d'agents agressifs, tels que les chlorures ou les sulfates, et compromettre la durabilité du matériau. De plus, la présence

de certains minéraux argileux dans le sable de dune peut également contribuer à augmenter la porosité des mortiers.

Des essais d'absorption d'eau par capillarité et de porosité accessible à l'eau peuvent être réalisés pour caractériser ces propriétés dans les mortiers à base de sable de dune. Par exemple, Bedrina et al. [9] ont rapporté une absorption d'eau par capillarité allant jusqu'à 30% supérieure pour les mortiers à base de sable de dune par rapport aux mortiers conventionnels.

Des stratégies de formulation, telles que l'utilisation d'adjuvants réducteurs de porosité, de fumée de silice ou de cendres volantes, peuvent être envisagées pour améliorer la durabilité de ces mortiers. Ces ajouts pouzzolaniques contribuent à la densification de la matrice cimentaire, réduisant ainsi la porosité et l'absorption d'eau.

I.3. Le sable recyclé dans les mortiers

I.3.1. Définition

Le sable recyclé est un agrégat de granulométrie fine (particules inférieures à 4.75 mm) obtenu par concassage et criblage de déchets solides inertes issus des activités de construction, rénovation et démolition. Sa composition principale est le béton car provenant du concassage de celui-ci, mais il peut également contenir des fractions de briques, tuiles, verre ou enrobés bitumineux résiduels. Le sable recyclé est considéré comme une alternative durable au sable naturel dont l'extraction excessive engendre des impacts environnementaux négatifs tels que l'épuisement des ressources, la dégradation des paysages et la perturbation des écosystèmes.

Le processus de production du sable recyclé comprend généralement les étapes suivantes [9]:

- Concassage primaire : Les déchets de construction et de démolition sont d'abord concassés pour réduire leur taille en éléments plus petits.
- Criblage : Les particules concassées sont ensuite criblées, c'est-à-dire tamisées, pour séparer les différentes fractions granulaires. La fraction fine inférieure à 4.75 mm constitue le sable recyclé.
- Dé ferrailage : Un processus de séparation magnétique permet d'extraire les armatures métalliques résiduelles, provenant notamment des gravats de béton armé.
- Dépoussiérage : Les particules fines indésirables, telles que les poussières, sont éliminées par dépoussiérage, généralement par voie pneumatique.

Une étape supplémentaire de tri, manuelle ou automatisée, peut être mise en œuvre, en particulier pour les déchets hétérogènes. Cela permet de retirer les éventuelles impuretés telles que le bois, les plastiques ou le plâtre présentes dans les déchets de construction.

Ce processus permet ainsi de recycler les déchets de construction et de démolition en un granulats fin, le sable recyclé, pouvant être réutilisé comme alternative partielle ou totale au sable naturel dans divers matériaux de construction.



Figure I.5 : Exemple du processus de recyclage des déchets de béton.

I.3.2. Composition et caractéristiques du sable recyclé

Le sable recyclé provient du traitement et du broyage de déchets de construction et de démolition, tels que les bétons, les mortiers, les briques et les tuiles. Sa composition et ses propriétés physiques diffèrent généralement de celles du sable naturel.

I.3.2.1. Composition

Le sable recyclé est principalement composé de particules de mortier et de béton, mais peut également contenir des impuretés telles que du verre, du plastique, du bois ou des métaux. La proportion de ces différents éléments varie selon la source et le procédé de recyclage utilisé. Une caractérisation détaillée de la composition du sable recyclé est essentielle pour évaluer sa qualité et son adéquation avec les applications cimentaires.

I.3.2.2. Granulométrie

La granulométrie du sable recyclé dépend étroitement du procédé de concassage et de criblage mis en œuvre. Généralement, elle est plus étalée et présente une proportion plus importante de fines particules par rapport au sable naturel [10]. Cette caractéristique peut avoir des conséquences sur la demande en eau et la maniabilité des mélanges cimentaires.

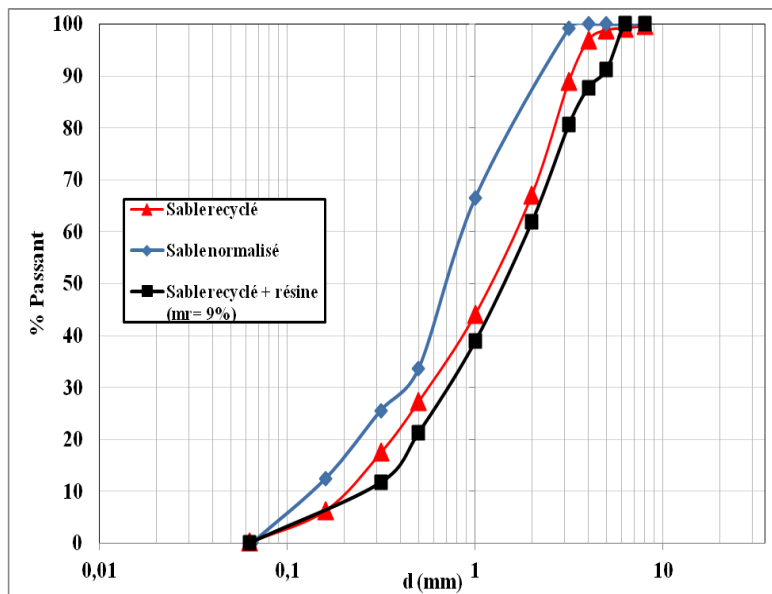


Figure I.6 : Courbe granulométrique d'un sable recyclé [11].

I.3.2.3. Forme et texture des grains

Les particules de sable recyclé ont souvent une forme plus anguleuse et une surface plus rugueuse que le sable naturel, en raison du processus de concassage [10]. Cette morphologie particulière peut influencer la rhéologie du mélange frais ainsi que les performances mécaniques du matériau durci.

I.3.2.4. Propriétés physiques

Le sable recyclé présente généralement une masse volumique plus faible et une absorption d'eau plus élevée que le sable naturel, en raison de la porosité des particules de mortier et de béton [10]. Ces différences de propriétés physiques nécessitent une adaptation du dosage en eau lors de la formulation des mélanges cimentaires.

I.3.3. Types de sables recyclés

On distingue plusieurs types de sables recyclés selon leur origine et composition :

- **Sable de béton recyclé** : C'est la source principale de sable recyclé, représentant environ 70% des granulats recyclés produits. Il est issu du concassage et du traitement de déchets de béton de démolition (dalles, poutres, blocs, etc.). Sa composition dépend de celle du béton d'origine, mais il contient généralement des particules de ciment, de granulats naturels et d'éventuelles impuretés. Le sable de béton recyclé fait l'objet de nombreuses études et est largement utilisé dans la fabrication de nouveaux bétons et mortiers.
- **Sable de brique recyclé** : Provenant du concassage de briques d'argile cuite issues principalement de la démolition de bâtiments anciens. Ce sable contient une forte proportion d'alumine et de silice, ce qui peut influencer les propriétés des matériaux cimentaires dans lesquels il est incorporé. Son utilisation reste généralement limitée en raison de sa composition spécifique.
- **Sable de verre recyclé** : Produit à partir du broyage de verre plat (vitres) ou creux (bouteilles, etc.) récupéré. Il présente l'avantage d'être inerte chimiquement et non poreux, mais son utilisation dans le génie civil reste limitée en raison des faibles volumes disponibles comparés aux autres sources de sable recyclé.
- **Sable d'asphalte recyclé** : Issu du concassage d'enrobés bitumineux de chaussées. Il nécessite un traitement spécifique pour éliminer les résidus de goudron et de bitume présents, qui peuvent altérer les propriétés des matériaux cimentaires. Son utilisation reste donc généralement limitée à des applications non structurelles.
- **Sable mélangé recyclé** : Il s'agit d'un mélange non trié des différentes sources mentionnées ci-dessus. Sa composition hétérogène peut entraîner des variations importantes de ses propriétés et de ses performances dans les matériaux cimentaires. Un tri et un contrôle de la qualité sont donc nécessaires avant son utilisation.

Parmi ces différents types, le sable de béton recyclé reste la source la plus abondante et la plus étudiée pour une incorporation dans les nouveaux bétons et mortiers, grâce à sa composition relativement proche de celle du sable naturel.

I.3.4. Caractéristiques du sable recyclé

Le sable recyclé présente des caractéristiques sensiblement différentes du sable naturel en raison de la présence de mortier résiduel adhérent aux particules :

I.3.4.1. Absorption d'eau élevée

L'absorption d'eau du sable recyclé est nettement supérieure à celle du sable naturel, en raison de la porosité accrue induite par le mortier résiduel poreux entourant les grains. Selon les études, l'absorption d'eau du sable recyclé varie typiquement de 3 à 12%, contre seulement 1 à 2% pour un sable naturel [12]. Cette large plage de valeurs s'explique par la variabilité de la teneur en mortier résiduel selon l'origine et le procédé de production du sable recyclé. La cinétique d'absorption est également beaucoup plus rapide pour le sable recyclé.

I.3.4.2. Porosité accrue

La présence de mortier résiduel induit également une augmentation significative de la porosité du sable recyclé par rapport au sable naturel. Selon les études, la porosité accessible à l'eau du sable recyclé atteint généralement 8 à 13%, contre seulement 2 à 3% pour un sable naturel. Cette porosité accrue est clairement visible sur les images ci-dessous de microscopie électronique issues de l'étude de Etxeberria et al [13] :

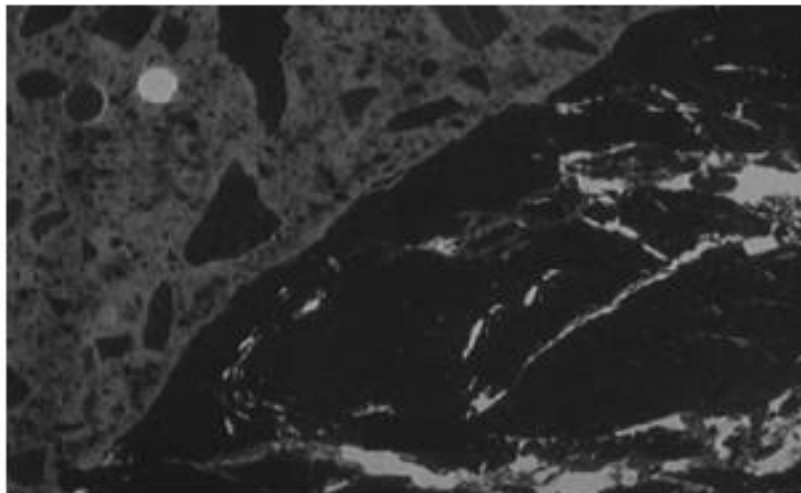


Figure I.7 : Granulat recyclé sous microscope [13].

I.3.4.3. Forme angulaire et texture rugueuse des grains

Contrairement aux grains plutôt arrondis et polis des sables naturels d'origine alluvionnaire ou glaciaire, les grains de sable recyclé ont une forme angulaire et une texture de surface rugueuse, héritées du processus de concassage des déchets de construction. Cette morphologie angulaire est particulièrement marquée pour les grains issus de béton concassé, comme en témoignent les clichés ci-dessous de microscopie électronique à balayage extraits de l'étude de Yuan feng et al. [14] :

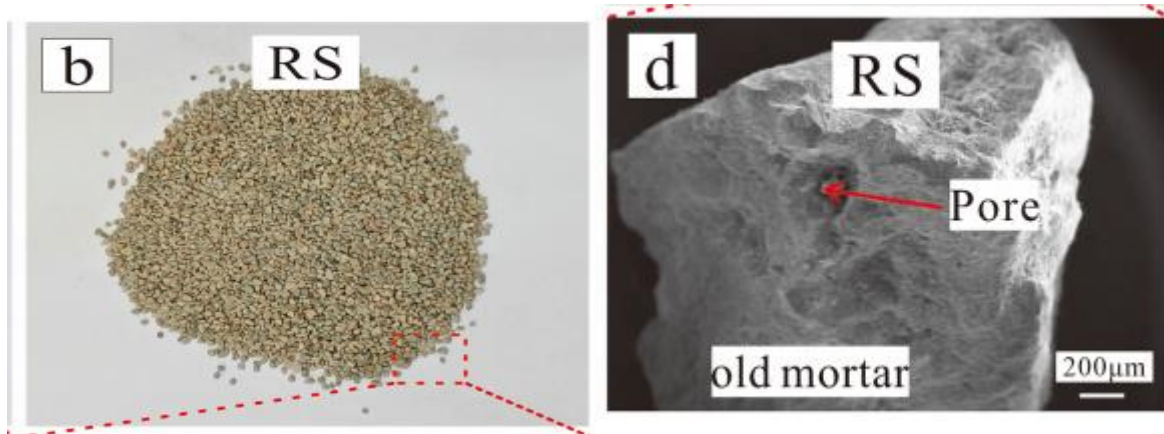


Figure I.8 : Sable recyclé au MEB [14].

I.3.5. Effets du sable recyclé sur les matériaux cimentaires

L'incorporation de sable recyclé dans la confection de bétons et mortiers engendre divers impacts sur leurs propriétés à l'état frais et durci :

I.3.5.1. Propriétés à l'état frais

L'utilisation de sable recyclé tend à augmenter la demande en eau des mélanges cimentaires, en raison de la forte absorption d'eau des particules poreuses. Cela se traduit généralement par une réduction de la maniabilité, qui peut être compensée par l'ajout d'adjuvants plastifiants ou superplastifiants. Des méthodes de compensation, comme le pré-mouillage du sable recyclé, peuvent également être envisagées [15].

I.3.5.2. Propriétés à l'état durci

a. Résistance à la compression

De nombreuses études ont mis en évidence une diminution significative de la résistance à la compression des bétons formulés avec du sable recyclé par rapport à un béton conventionnel à base de sable naturel. Cette baisse de résistance, de l'ordre de 10 à 30% selon les formulations, est principalement attribuée à l'absorption d'eau plus élevée, la qualité intrinsèque moindre du sable recyclé. L'étude de Kou et Poon [16] illustre bien cet effet, avec une chute de résistance à 28 jours d'environ 25% pour un béton incorporant 100% de sable recyclé, comme montré sur le graphique ci-après :

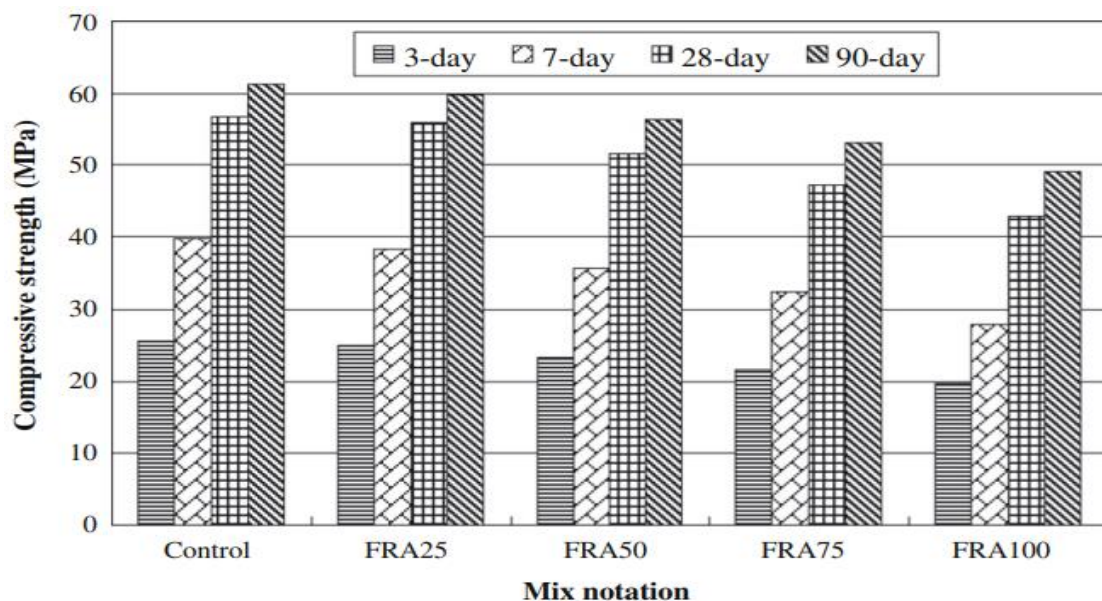


Figure I.9 : Résistance à la compression d'un béton à base de sable recyclé [16].

b. Résistance à la traction

De même que pour la résistance à la compression, l'incorporation de sable recyclé conduit généralement à une baisse des performances en traction des bétons et mortiers. Selon les études, des réductions de 10 à 30% de la résistance à la traction sont typiquement observées lors du remplacement total du sable naturel par du sable recyclé.

Seara et al. [17] ont étudié l'influence des caractéristiques des granulats recyclés sur la résistance à la traction du béton structural. Les résultats montrent que l'utilisation de granulats recyclés entraîne une diminution de la résistance à la traction par rapport aux bétons conventionnels. Cette diminution dépend à la fois du taux de remplacement et de la qualité des granulats recyclés, notamment leur absorption d'eau. Pour les bétons avec un rapport eau/ciment de 0.50, la résistance à la traction diminue de 11% à 20% de remplacement, 18% à 50% et 31% à 100%. Pour les bétons avec un rapport eau/ciment de 0.65, les diminutions sont moindres, allant de 2% à 20% de remplacement jusqu'à 22% à 100%. Lorsque les granulats recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, les diminutions peuvent atteindre 25% à 50% de remplacement et 39% à 100%. Cela montre que la qualité des granulats recyclés, et en particulier leur absorption d'eau, est un paramètre clé influençant la résistance à la traction des bétons recyclés.

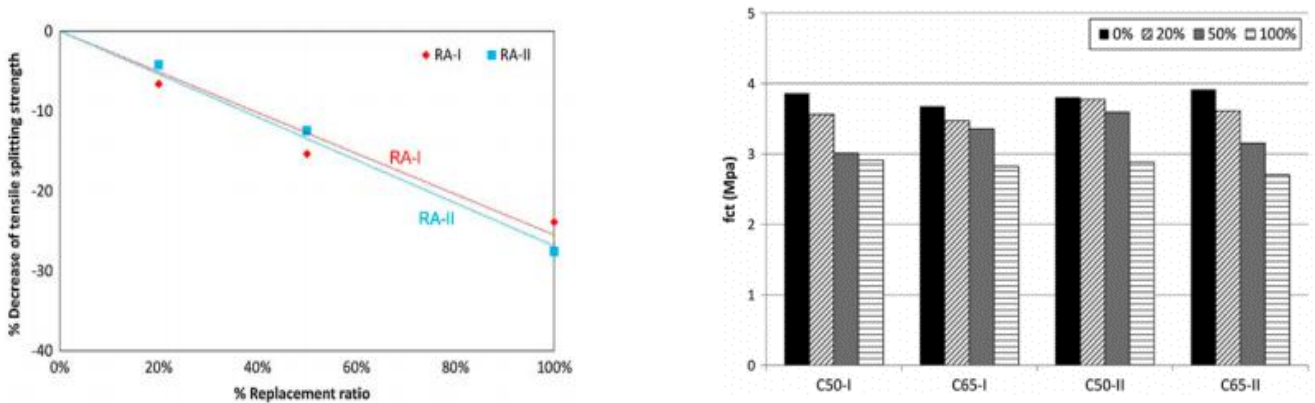


Figure I.10 : Résistance à la compression et à la traction [17].

c. Porosité et de l'absorption d'eau

La porosité et l'absorption d'eau des bétons et mortiers sont également accrues de manière significative en présence de sable recyclé. L'étude d'Omary et al. [18] a ainsi mesuré des augmentations respectives de 28% et 40% de la porosité et de l'absorption d'eau pour un mortier formulé avec 100% de sable recyclé.

Cette hausse de la porosité accessible à l'eau soulève des interrogations quant à la durabilité à long terme des ouvrages en béton incorporant du sable recyclé, en raison des risques accrus de dégradations par les cycles gel-dégel, les attaques chimiques, etc.

Ces retraits accrus peuvent favoriser l'apparition de fissurations pendant la prise et le séchage, affectant la durabilité et l'aspect esthétique des ouvrages en béton recyclé.

I.3.5.3. Durabilité

La durabilité des matériaux cimentaires contenant du sable recyclé dépend principalement de la qualité et de la propreté du sable utilisé [19] :

- La présence d'impuretés organiques ou de sulfates peut affecter la prise et le durcissement du ciment
- Une forte absorption d'eau peut favoriser le retrait et la fissuration
- Une teneur élevée en particules fines peut réduire la perméabilité et la résistance aux cycles gel-dégel

Un traitement adéquat du sable recyclé, visant à éliminer les contaminants, est donc essentiel pour assurer la durabilité à long terme des bétons et mortiers.

Essais non destructifs – Contrôle par ultrasons :

Les essais non destructifs par mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores sont couramment utilisés pour évaluer la qualité et l'homogénéité du béton. Cependant, l'interprétation des résultats se révèle plus complexe pour les bétons incorporant du sable recyclé en raison de leur structure hétérogène.

Dans une étude publiée dans *Cement and Concrete Research*, Aitcin et al (2013) [20] a analysé l'effet du remplacement partiel ou total du sable naturel par du sable recyclé sur les propriétés du béton, notamment la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Les résultats ont montré une diminution progressive de la vitesse ultrasonique lorsque le taux de remplacement du sable naturel par du sable recyclé augmente.

Plus spécifiquement, pour un remplacement total (100%) du sable naturel par du sable recyclé, la vitesse ultrasonique a diminué d'environ 10% par rapport au béton de référence sans sable recyclé. Cette réduction de la vitesse ultrasonique traduit une perte de compacité et de qualité du béton en présence de sable recyclé.

L'auteur souligne dès lors la nécessité de développer des corrélations spécifiques entre la vitesse ultrasonique et les propriétés mécaniques (résistance, module d'élasticité, etc.) pour les bétons incorporant du sable recyclé. En effet, les relations établies pour les bétons conventionnels ne sont plus valables dans ce cas.

I.3.6. Sable de dune et sable recyclé dans les mortiers

Dans une optique de construction durable, l'utilisation combinée de sable de dune et de sable recyclé provenant de déchets de construction et de démolition peut présenter un intérêt particulier.

Le sable recyclé est un sable obtenu par le concassage et le traitement des débris de béton, de briques, de tuiles et d'autres matériaux de construction. L'incorporation de ce sable recyclé dans les mortiers peut contribuer à réduire l'impact environnemental en valorisant ces déchets et en préservant les ressources naturelles de sable. Cependant, les propriétés des mortiers peuvent être affectées par la présence de contaminants tels que des particules de ciment ou de mortier adhérentes, ainsi que des impuretés comme le bois, le plastique ou le verre présents dans le sable recyclé [21].



Figure I.11 : Sable recyclé.

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation combinée de sable de dune et de sable recyclé dans les mortiers. Certains auteurs ont rapporté des résultats prometteurs en termes de résistance mécanique et de durabilité, tandis que d'autres ont souligné la nécessité d'optimiser les formulations pour compenser les effets négatifs potentiels sur les propriétés des mortiers.

Cependant, Correia et al. [22] ont observé une diminution significative de la résistance à la compression et de la durabilité des mortiers lorsque plus de 20% de sable naturel était remplacé par du sable recyclé. Ils ont attribué cette baisse de performances à la porosité élevée et à la faible adhérence des particules de mortier présentes dans le sable recyclé.

L'étude de Behara et al. [23] a souligné l'importance de l'optimisation des formulations pour compenser les effets négatifs potentiels de l'incorporation de sable recyclé. Les auteurs ont suggéré l'utilisation d'adjuvants minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau pour améliorer les performances mécaniques et la durabilité des mortiers contenant du sable recyclé.

De plus, le prétraitement du sable recyclé, comme le lavage ou le tamisage, peut être nécessaire pour éliminer les contaminants et les particules indésirables, améliorant ainsi la qualité du sable et les performances des mortiers. Il est également important de noter que les performances des mortiers contenant du sable de dune et du sable recyclé peuvent varier en fonction de la qualité et de la composition spécifique de ces matériaux, ainsi que des proportions utilisées dans les mélanges.

Une étude approfondie des interactions entre le sable de dune, le sable recyclé et les autres constituants des mortiers, ainsi qu'une optimisation des formulations, sont cruciales pour développer des mortiers performants et durables utilisant ces ressources alternatives.

Abadou, Y [24] et al ont montré que l'incorporation de déchets de béton concassés dans les mortiers à base de sable de dunes a montré des effets contrastés sur leurs propriétés mécaniques. Du côté de la résistance à la compression, les résultats sont plutôt positifs. Le mortier avec 5% de déchets (MCW5) a présenté les meilleures performances, avec des gains allant jusqu'à 19% par rapport au mortier de sable de dunes sans ajout (MDS0). Cette amélioration s'est maintenue à long terme, avec des résistances à 28 et 90 jours supérieures pour le MCW5 par rapport au MDS0, même si elles restaient inférieures au mortier témoin avec sable alluvionnaire (MAS0).

Cependant, l'ajout de déchets de béton a eu un effet défavorable sur la résistance à la traction des mortiers. Une diminution significative, pouvant atteindre 44% à 28 jours, a été observée par rapport au mortier conventionnel. Cela montre que si l'incorporation de ces granulats recyclés permet d'améliorer la compacité et la résistance en compression, elle nuit à la capacité du mortier à résister aux efforts de traction.

Ainsi, l'utilisation de déchets de béton concassés dans les mortiers de sable de dunes semble être une piste intéressante pour valoriser ces matériaux de substitution et améliorer certaines de leurs propriétés, tout en nécessitant une attention particulière sur le maintien d'un niveau satisfaisant de résistance à la traction.

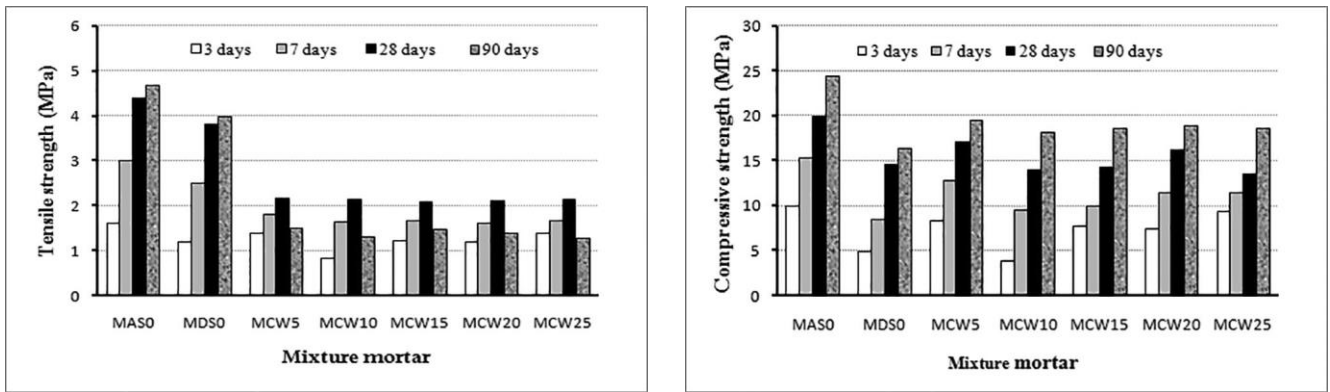


Figure I.12 : Résistance à la compression et à la traction [24].

Debieb et al. [25] pour leur part, ont exploré la durabilité des bétons à base de sable de dune et de granulats recyclés exposés à différents environnements agressifs. Les chercheurs ont évalué la résistance aux attaques par les sulfates, la pénétration des ions chlorure et la résistance à la carbonatation des bétons combinés.

Les résultats ont montré que l'incorporation de sable de dune et de granulats recyclés augmentait la porosité des bétons, ce qui les rendait plus vulnérables aux attaques chimiques et à la pénétration des agents agressifs. Cependant, l'utilisation d'additions minérales telles que la fumée de silice et les cendres volantes a permis d'améliorer la durabilité des bétons combinés.

Les auteurs ont également souligné l'importance de contrôler la qualité des granulats recyclés, en particulier leur teneur en impuretés et en particules de mortier adhérentes, pour éviter des impacts négatifs sur la durabilité.

Dans leur étude qui a porté sur l'utilisation de sable de dune et de sable recyclé à partir de déchets de briques et de tuiles dans les mortiers. Menadi et al. [26] ont évalué l'effet de différents pourcentages de remplacement du sable naturel sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers.

Ils ont montré qu'un remplacement jusqu'à 30% du sable naturel par un mélange de sable de dune et de sable recyclé permettait d'obtenir des résistances à la compression et à la traction similaires aux mortiers de référence. Cependant, au-delà de 30% de remplacement, les performances mécaniques ont diminué de manière significative.

En termes de durabilité, l'étude a révélé que les mortiers contenant du sable de dune et du sable recyclé présentaient une porosité et une absorption d'eau légèrement supérieures aux mortiers de référence, mais restaient dans des limites acceptables pour la plupart des applications.

Les auteurs ont recommandé l'utilisation d'adjuvants minéraux tels que les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau pour améliorer les performances des mortiers contenant ces sables alternatifs.

Ces études mettent en évidence les défis liés à l'utilisation combinée de sable de dune et de sable recyclé dans les matériaux cimentaires, notamment en ce qui concerne les performances mécaniques, la durabilité et la porosité. Cependant, elles soulignent également les possibilités d'optimisation des formulations et l'utilisation d'adjuvants pour améliorer ces propriétés et promouvoir une construction plus durable.

I.4. La fumée de silice et son apport aux propriétés des mortiers

I.4.1. Définition de la fumée de silice

La fumée de silice, également connue sous le nom de micro-silice, est un sous-produit non cristallin (amorphe) issu du processus de production industrielle de silicium métal ou d'alliages de ferrosilicium . Ce matériau se présente sous la forme d'une poudre extrêmement fine, composée de particules sphériques de dioxyde de silicium (SiO_2) d'une taille moyenne comprise entre 0.1 et 0.2 microns (100 à 200 nanomètres) . La composition de la fumée de silice est à plus de 90 % de SiO_2 amorphe, avec des traces résiduelles d'autres oxydes métalliques. Cette morphologie sphérique et la très haute surface spécifique (18 000 à 20 000 m^2/kg) confèrent à la fumée de silice des propriétés pouzzolaniques exceptionnelles [27].

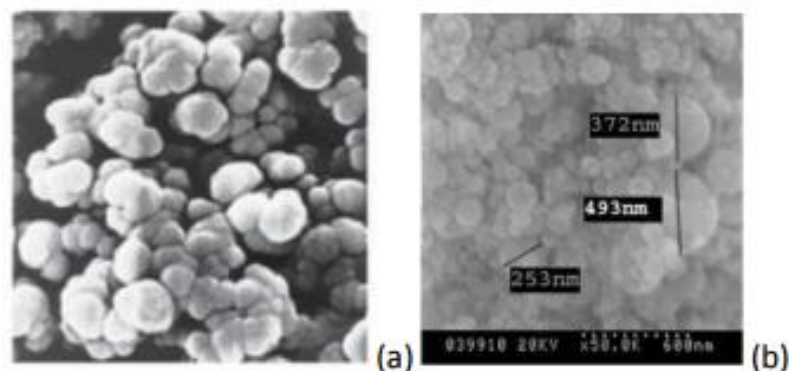


Figure I.13 : Fumée de silice sous microscope [28].

- La fumée de silice est un sous-produit industriel sous la forme d'une poudre très fine, résultant du processus de réduction du quartz (SiO_2) à des températures extrêmement élevées, de l'ordre de 2000°C , dans les fours utilisés pour la production de silicium métallique ou d'alliages de ferrosilicium.
- Elle se compose principalement (à 90-95%) de particules sphériques de dioxyde de silicium (SiO_2) sous forme amorphe, avec un diamètre moyen variant de 0.1 à 0.2 micromètre [27].
- Cette granulométrie extrêmement fine, de l'ordre du micromètre, confère à la fumée de silice une surface spécifique exceptionnellement élevée, comprise entre 15 000 et 20 000 m^2/kg [27].
- Cette grande surface spécifique, combinée à la nature amorphe du SiO_2 constitutif, sont à l'origine de la très haute réactivité chimique de la fumée de silice.
- C'est cette réactivité qui confère à la fumée de silice ses propriétés pouzzolaniques et ses effets bénéfiques lorsqu'elle est incorporée dans les bétons et mortiers.



Figure I.14 : Fumée de silice.

I.4.2. Propriétés de la fumée de silice

La fumée de silice comme dit précédemment, est un sous-produit finement divisé, composé principalement de dioxyde de silicium amorphe. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

I.4.2.1. Composition et structure

La fumée de silice contient généralement plus de 90% de SiO_2 sous forme amorphe. Ses particules, de taille micrométrique, présentent une structure sphérique creuse et une surface spécifique très élevée, pouvant atteindre 20 000 m^2/kg [29].

I.4.2.2. Activité pouzzolaniques

La forte réactivité de la fumée de silice est due à sa grande surface spécifique et à la présence de SiO_2 amorphe. Lors de son interaction avec la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par l'hydratation du ciment, elle forme des composés cimentaires supplémentaires (silicates de calcium hydratés) ou C-S-H, ce qui lui confère des propriétés pouzzolaniques [20].

I.4.2.3. Absorption d'eau

En raison de sa structure poreuse et de sa grande surface spécifique, la fumée de silice présente une forte capacité d'absorption d'eau. Cela peut avoir un impact significatif sur la rhéologie et la demande en eau des mélanges cimentaires [30].

I.4.3. Effets de la fumée de silice sur les matériaux cimentaires

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons et mortiers entraîne des modifications à la fois sur les propriétés à l'état frais et sur les performances du matériau durci.

I.4.3.1. Propriétés à l'état frais

La forte absorption d'eau de la fumée de silice augmente généralement la demande en eau des mélanges cimentaires, ce qui se traduit par une réduction de la maniabilité. Cet effet peut être compensé par l'utilisation d'adjuvants super plastifiants, qui permettent de maintenir une bonne ouvrabilité.

De plus, la morphologie sphérique et la grande surface spécifique des particules de fumée de silice améliorent la cohésion du mélange frais, réduisant ainsi les risques de ségrégation et de ressuage [30].

I.4.3.2. Résistances mécaniques

L'activité pouzzolanique de la fumée de silice permet la formation de silicates de calcium hydratés supplémentaires, ce qui contribue à l'amélioration des résistances en compression et en traction des bétons et mortiers [31]. Des gains de résistance jusqu'à 30% peuvent être observés avec des taux d'incorporation de l'ordre de 5 à 10% en masse de ciment.

L'optimisation de la granulométrie du mélange, grâce à l'effet de remplissage des particules fines de fumée de silice, joue également un rôle important dans l'augmentation des performances mécaniques [31].

I.4.4.3. Durabilité

L'incorporation de fumée de silice dans les mélanges cimentaires améliore significativement la durabilité des bétons et mortiers [32], notamment en termes de :

- Perméabilité réduite : la fumée de silice densifie la microstructure et réduit la porosité, limitant ainsi la pénétration des agents agressifs.
- Résistance aux attaques chimiques : la fumée de silice renforce la résistance du béton aux sulfates, aux acides et aux ions chlorure.
- Résistance au gel-dégel : la fumée de silice améliore la résistance du béton aux cycles de gel-dégel.

Ces améliorations de durabilité sont directement liées à la réduction de la perméabilité et à la densification de la microstructure induite par l'activité pouzzolanique de la fumée de silice.

I.4.3.4. Retrait et fissuration

Bien que la fumée de silice puisse contribuer à une légère augmentation du retrait de séchage, en raison de sa forte absorption d'eau, elle permet de réduire significativement la fissuration des bétons et mortiers [33]. Cet effet bénéfique est attribué à une meilleure mûrissement et à une diminution de la perméabilité, limitant ainsi la pénétration de l'eau et les mouvements de l'humidité.

I.4.4. Dosage et mise en œuvre de la fumée de silice

L'utilisation optimale de la fumée de silice dans les mélanges cimentaires nécessite une attention particulière lors de la formulation et de la mise en œuvre.

I.4.4.1. Dosage

Les taux d'incorporation de fumée de silice les plus couramment utilisés se situent entre 5 et 10% en masse de ciment [34]. Des taux plus élevés (jusqu'à 15%) peuvent être envisagés pour des applications spécifiques, mais au-delà, les bénéfices diminuent généralement.

I.4.4.2. Interaction avec les adjuvants

L'utilisation conjointe de fumée de silice et d'adjuvants chimiques, tels que les superplastifiants, est généralement nécessaire pour maintenir une bonne maniabilité des mélanges [35]. Un dosage et une compatibilité appropriés de ces additifs (addition minérale + adjuvant) sont essentiels pour optimiser les propriétés rhéologiques du matériau cimentaire.

I.4.4.3. Cure et mûrissement

Un mûrissement adéquat des bétons et mortiers contenant de la fumée de silice est primordial pour permettre le développement complet de ses propriétés pouzzolaniques [36]. Une cure humide prolongée (28 jours ou plus) est recommandée pour assurer une hydratation optimale.

I.5. Les Fibres et leur apport aux propriétés des mortiers

I.5.1. Les fibres

Les fibres constituent un élément essentiel pour renforcer les bétons et mortiers, apportant un renfort significatif face aux contraintes de traction et à la propagation des fissures. On distingue principalement deux grandes familles de fibres utilisées dans les matériaux cimentaires : les fibres synthétiques et les fibres naturelles.

Les fibres synthétiques regroupent des matériaux tels que le polypropylène, le polyéthylène, l'acrylique ou encore le nylon. Ces fibres offrent l'avantage d'une grande résistance mécanique et d'une bonne durabilité dans l'environnement alcalin du béton. Les fibres de polypropylène sont sans doute les plus couramment utilisées, car elles permettent d'améliorer de manière notable la résistance à la fissuration et la ductilité du matériau.

À côté de ces fibres synthétiques, on trouve également des fibres d'origine naturelle comme les fibres de verre, de carbone ou de basalte. Ces fibres minérales présentent des propriétés mécaniques très intéressantes, avec une excellente résistance en traction. Elles sont souvent utilisées pour des applications structurales nécessitant de hautes performances. Enfin, des fibres végétales telles que le jute, le coco ou le sisal sont aussi parfois employées, offrant un renfort plus modeste mais des avantages en termes de coût et de durabilité.

Au-delà de leur nature chimique, les fibres se distinguent également par leur géométrie. Elles peuvent avoir une forme droite, ondulée ou présenter des extrémités déformées (crochets, boucles,

etc.). Ces différentes configurations visent à optimiser l'adhérence et l'ancrage des fibres au sein de la matrice cimentaire, pour une meilleure efficacité du renforcement.

L'incorporation de ces fibres, qu'elles soient synthétiques ou naturelles, permet ainsi d'améliorer significativement les performances mécaniques des bétons et mortiers, en renforçant leur résistance à la traction, leur ductilité et leur résistance à la fissuration.

I.5.2. Diversité des fibres dans les matériaux cimentaires

Les fibres constituent un élément essentiel pour renforcer les propriétés des bétons et mortiers, en apportant un renfort face aux contraintes de traction et à la propagation des fissures. On distingue principalement deux grandes familles de fibres employées dans les matériaux cimentaires : les fibres synthétiques et les fibres naturelles.

I.5.2.1. Fibres synthétiques

La famille des fibres synthétiques regroupe notamment :

- Les fibres de polypropylène : ce sont les plus couramment utilisées car elles permettent d'améliorer efficacement la résistance à la fissuration et la ductilité du béton.
- Les fibres de polyéthylène : elles offrent une bonne résistance mécanique et une grande durabilité dans l'environnement alcalin du béton.
- Les fibres d'acrylique : elles présentent également de bonnes propriétés mécaniques et de durabilité.
- Les fibres de nylon : elles apportent un renfort intéressant en traction et en résistance à l'impact.



Figure I.15 : Fibre de polyéthylène, nylon, polypropylène.

I.5.2.2. Fibres naturelles

Outre les fibres synthétiques, on trouve aussi des fibres d'origine naturelle, comme :

- Les fibres de verre : elles se distinguent par leur excellente résistance en traction, les rendant particulièrement adaptées pour des applications structurales.
- Les fibres de carbone : ces fibres minérales offrent des performances mécaniques très élevées, pour des usages nécessitant de hautes performances.
- Les fibres de basalte : elles présentent des propriétés proches des fibres de verre, avec l'avantage d'être issues d'une ressource naturelle.
- Les fibres végétales (jute, coco, sisal, etc.) : bien que plus modestes en termes de résistance, elles constituent une alternative intéressante en termes de coût et de durabilité.

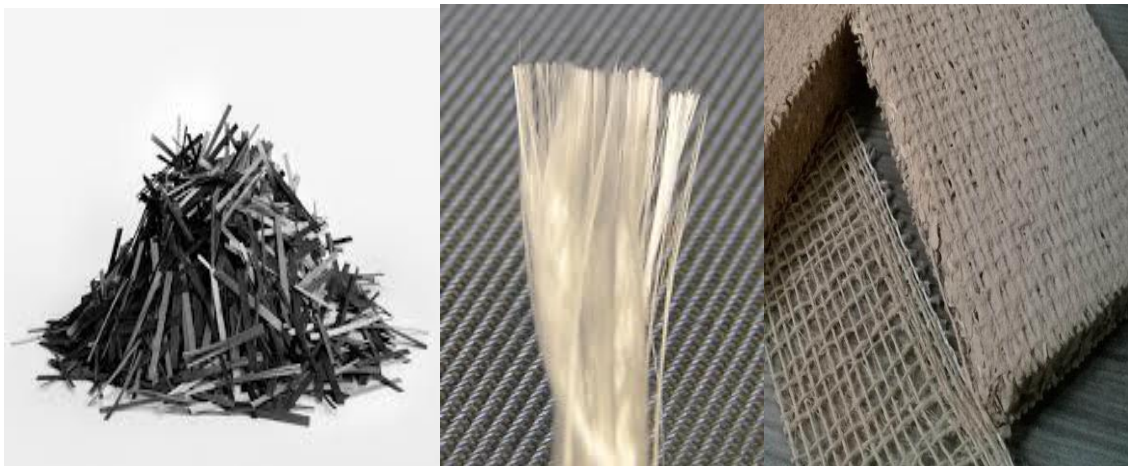


Figure I.16 : Fibres de carbone, verre, jutes.

Au-delà de leur nature chimique, les fibres se distinguent également par leur géométrie, pouvant être droites, ondulées ou présentant des extrémités déformées. Ces différentes configurations visent à optimiser l'adhérence et l'ancrage des fibres au sein de la matrice cimentaire, pour une meilleure efficacité du renforcement.

L'incorporation de ces fibres, qu'elles soient synthétiques ou naturelles, permet ainsi d'améliorer de manière significative les performances mécaniques des bétons et mortiers, en renforçant leur résistance à la traction, leur ductilité et leur résistance à la fissuration.

I.5.3. Les fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène (PP) sont des fibres synthétiques extraites du polypropylène, un polymère thermoplastique. Elles font partie de la famille des fibres polymères, au même titre que les fibres de polyéthylène, de nylon ou de polyester. Les fibres de polypropylène sont largement utilisées dans l'industrie de la construction comme renfort dans les matériaux cimentaires tels que le béton, le mortier et les composites à base de ciment. Leur emploi permet d'améliorer certaines propriétés mécaniques et de durabilité de ces matériaux

I.5.3.1. Types de fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène se déclinent en différents types en fonction de leurs caractéristiques géométriques et physiques [37] :

- a) Fibres monofilamentaires : il s'agit de filaments individuels de faible diamètre, typiquement compris entre 10 et 100 microns. Elles sont généralement obtenues par extrusion du polypropylène.
- b) Fibres fibrillées : elles sont obtenues par éclatement d'un film de polypropylène, donnant ainsi un faisceau de microfilaments reliés entre eux. Ce procédé de fibrillation permet d'obtenir une surface spécifique importante.
- c) Fibres macrosynthétiques : de plus gros diamètre, typiquement entre 0.5 et 1 mm, elles apportent un renfort structural au béton. Leur géométrie permet de mieux ancrer les fibres dans la matrice cimentaire.

Ces différents types de fibres de polypropylène présentent des caractéristiques et des modes d'action complémentaires dans les matériaux cimentaires.

I.5.3.2. Caractéristiques des fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène possèdent des propriétés physiques et mécaniques spécifiques qui les rendent particulièrement adaptées au renforcement des matériaux cimentaires [38] :

- a) Légèreté : avec une densité d'environ 0.9 g/cm^3 , les fibres de polypropylène sont plus légères que la plupart des autres types de fibres, comme les fibres d'acier (7.8 g/cm^3) ou les fibres de verre (2.6 g/cm^3). Cela facilite leur mise en œuvre dans les mélanges.

- b) Bonne résistance à la traction : leur résistance à la traction se situe généralement entre 400 et 700 MPa, ce qui est élevé pour une fibre polymère. Cela leur confère de bonnes propriétés de renforcement.
- c) Faible module d'élasticité : leur module d'élasticité est compris entre 3 et 8 GPa, ce qui est relativement faible comparé à l'acier (200 GPa) ou au verre (70 GPa) [39]. Cela leur confère une certaine ductilité.
- d) Bonne résistance aux agents chimiques et à la corrosion. Contrairement aux fibres métalliques, les fibres de polypropylène ne sont pas sujettes à la corrosion dans les milieux alcalins du béton.
- e) Température de fusion relativement basse, d'environ 160°C. Cela doit être pris en compte lors de la mise en œuvre à haute température.

Ces différentes propriétés physiques et mécaniques font des fibres de polypropylène un matériau de renfort intéressant pour les applications cimentaires.

I.5.3.3. Effets des fibres de polypropylène sur les propriétés des matériaux cimentaires

L'ajout de fibres de polypropylène dans les matrices cimentaires (béton, mortier) a plusieurs effets notables sur leurs propriétés :

a. Résistance à la compression et à la traction

L'influence des fibres PP sur la résistance en compression du béton ou du mortier est généralement faible, voire négligeable [39]. En effet, le rôle principal des fibres est de renforcer le matériau en traction, là où le béton est naturellement le plus faible. Ainsi, les fibres de polypropylène apportent un renfort significatif en traction, permettant d'améliorer la résistance à la fissuration et la ductilité du matériau [40]. Ce comportement s'explique par le fait que les fibres permettent de transférer les efforts de traction au-delà des fissures, retardant ainsi la rupture.

b. Retrait

L'incorporation de fibres de polypropylène dans les matrices cimentaires permet de réduire de manière importante le retrait de séchage. Cet effet bénéfique est attribué à la capacité des fibres à absorber les déformations de retrait et à empêcher la propagation des microfissures liées au retrait [50]. Ainsi, les fibres jouent un rôle de renfort contre les efforts de traction induits par le retrait, limitant l'apparition de fissures.

c. Ductilité

La présence de fibres de polypropylène confère au béton ou au mortier un comportement ductile après la première fissuration. En effet, les fibres permettent de transférer les efforts de traction au-delà de la fissure, améliorant ainsi la capacité de déformation et l'absorption d'énergie du matériau [39]. Ce comportement ductile est particulièrement intéressant dans le cas des structures soumises à des sollicitations dynamiques ou sismiques.

d. Durabilité

Les fibres de polypropylène présentent l'avantage d'être résistantes aux agents chimiques et à la corrosion [41]. Contrairement aux fibres métalliques, elles ne sont pas sujettes à la corrosion dans les milieux alcalins du béton, ce qui améliore la durabilité à long terme des matériaux cimentaires.

e. Mise en œuvre

La légèreté des fibres de polypropylène facilite leur incorporation dans les mélanges cimentaires. Cependant, leur température de fusion relativement basse nécessite une attention particulière lors de la mise en œuvre à haute température [41].

I.6. Conclusion

Cette étude bibliographique a permis d'explorer les caractéristiques et les impacts de l'utilisation du sable de dune de Touggourt et du sable recyclé dans les mortiers. Ces matériaux alternatifs présentent des opportunités intéressantes pour l'industrie de la construction, tout en soulevant certains défis techniques.

Le sable de dune de Touggourt, issu de l'Erg Oriental, se caractérise par sa composition principalement quartzreuse et sa forme arrondie. Son incorporation dans les mortiers affecte généralement les résistances mécaniques, mais peut améliorer l'ouvrabilité. La gestion de la porosité et de l'absorption d'eau reste un enjeu important pour assurer la durabilité des mortiers à base de sable de dune.

Le sable recyclé, quant à lui, offre une solution de valorisation des déchets de construction et de démolition. Sa composition hétérogène et ses propriétés physiques spécifiques nécessitent des ajustements dans la formulation des mortiers. Malgré ces défis, l'utilisation de sable recyclé présente un potentiel significatif pour réduire l'impact environnemental de la construction.

Les recherches montrent qu'il est possible d'optimiser les formulations en combinant judicieusement ces sables alternatifs avec des sables conventionnels et en utilisant des additions minérales ou des adjuvants appropriés. En particulier, l'incorporation de fumée de silice s'est révélée efficace pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers à base de sables alternatifs. De plus, l'utilisation de fibres polypropylène a montré des résultats prometteurs en termes de renforcement de la matrice cimentaire et de réduction de la fissuration.

En conclusion, l'utilisation du sable de dune de Touggourt et du sable recyclé dans les mortiers, en combinaison avec des additifs tels que la fumée de silice et les fibres polypropylène, représente une voie prometteuse vers une construction plus durable. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner les formulations et évaluer les performances à long terme de ces mortiers dans diverses conditions d'utilisation. À cet effet, une étude de formulations de mortiers basées sur des mélanges sable de dune-sable recyclé tantôt incorporant de la fumée de silice, tantôt des fibres de type polypropylène, et parfois la concomitance des deux a été menée. Le but étant d'observer l'effet améliorant le cas échéant, des ces additions, connues par ailleurs pour fortement augmenter les caractéristiques des mortiers à base de sables conventionnels.

Chapitre II : Matériaux et procédures

II.1. Introduction

Les mortiers à base de sable de dune et de sable recyclé sont des matériaux de construction innovants qui exigent la connaissance de leurs diverses propriétés. Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la présentation des caractéristiques des matériaux utilisés durant ce projet de recherche, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés. Afin d'étudier les caractéristiques physiques et mécaniques de ces mortiers, nous avons effectué plusieurs essais au niveau de laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri.

II.2. Matériaux utilisés

Durant le travail de recherche, un certain nombre de matériaux ont été utilisés

- Ciment CEM II/B-L 42.5 N fabriqué par **Lafarge**.
- Sable de dune Touggourt
- Sable Recyclé
- Fumée de silice
- Fibres polypropylènes
- Eau de gâchage

II.2.1. Ciment

Un seul type de ciment a été retenu pour la confection du mortier étudié. Il s'agit d'un ciment CEM II/B-L 42.5 N, produit par Lafarge sous la dénomination commerciale Mâtine. Ce ciment est conforme à la norme algérienne NA 442-2013[42] et présente une masse volumique absolue de 3100 kg/m³.

Les différentes caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques, mécaniques telles que fournies par la fiche technique des fabricants sont montrées dans la figure.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES	
• Analyses chimiques	
Perte au feu (%) (NA5042)	Valeur 10,0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2,5±0,5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1
• Temps de prise à 20° (NA 230)	
Début de prise (min)	Valeur 150±30
Fin de prise (min)	230±50
• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	
C3S (%)	Valeur 60±3
C3A (%)	8±2
• Résistance à la compression	
2 jours (MPa)	Valeur ≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5
• Propriétés physiques	
Consistance Normale (%)	Valeur 26,5±2,0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

Figure II.1 : Caractéristiques techniques du ciment utilisé.

II.2.2. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mélanges de mortier au sein du laboratoire de béton, provient du réseau d'alimentation en eau potable de la ville de Tizi- Ouzo. Cette eau est considérée comme propre à la consommation humaine, et adéquate comme eau de gâchage pour mortier.

II.2.3. Fumée de silice

La fumée de silice utilisée dans cette étude est de couleur grise et de type condensé. Elle provient d'une cimenterie Lafarge située dans le sud de l'Algérie.

Cette fumée de silice présente une teneur en oxyde de silice (SiO₂) supérieure à 95%. Sa masse volumique est de 2300 kg/m³.



Figure II.2 : Fumée de silice utilisée.

II.2.4. Fibres de polypropylène.

Les fibres polypropylène utilisé dans cette étude ont été fabriquées par la société Profiber basée en Turquie, elles ont pour avantage la capacité d'améliorer la résistance à la traction et à la flexion des mortiers et béton, par leur capacité à contenir le phénomène de fissuration.

Tableau II.1 : Propriétés physiques et mécaniques de fibre polypropylène

Masse volumique :	0,91
Diamètre d_f (mm)	0,03
Longueur l_f (mm)	18
Rapport d'aspect (l/d)	600
Point de fusion (°C)	160
Résistance à la traction (MPa)	600-700
Module d'Young (MPa)	3000-3500
Allongement à la rupture (%)	20-25



Figure II.3 : Fibre polypropylène.

II.2.5. Sable

Dans cette étude nous avons utilisé 2 types de sable, un sable de dune originaire de la région de Touggourt et un sable recyclé originaire des chantiers de démolition à Tizi-Ouzou.



Figure II.4 : Sable recyclé et sable de dune utilisés.

II.2.5.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une procédure normalisée permettant de déterminer la répartition dimensionnelle des particules composant un matériau granulaire, comme le sable, le gravier ou les granulats. Cette analyse est essentielle pour caractériser les propriétés physiques et les performances des matériaux de construction.

Le principe consiste à faire passer un échantillon représentatif du matériau à travers une série de tamis calibrés, de mailles décroissantes. Le refus sur chaque tamis est alors pesé, permettant de calculer les pourcentages cumulés de particules retenues et de particules passantes. Les courbes granulométriques des sables ont été déterminées selon les recommandations de la norme NA 2607[43].

Comme indiqué, l'opération de tamisage se réalise au moyen d'une tamiseuse. Celle-ci est composée d'un cadre avec un anneau inférieur sur lequel est placée la série de tamis normalisés, disposés selon des ouvertures de mailles décroissantes.

Une fois les tamis installés, l'ensemble est fixé solidement aux montants de la tamiseuse à l'aide de la couronne supérieure. Celle-ci permet de serrer les tamis en place grâce à deux jeux de ressorts et de vis de blocage.

Chapitre II : Matériaux et procédures

Une fois le dispositif assemblé, l'échantillon de sable à analyser est versé sur le tamis supérieur. L'arrangement et le classement des grains de sable dans les différents tamis sont alors effectué par la vibration et le choc de la colonne de tamis.

Ce mouvement vibratoire et de choc provoque un réarrangement progressif des particules de sable, qui sont ainsi triées en fonction de leur taille. Les grains les plus gros restent bloqués sur les tamis supérieurs, tandis que les plus fins passent au travers des mailles et sont retenus sur les tamis inférieurs.



Figure II.5 : Tamiseuse électrique.

À la fin du tamisage, chaque tamis contient une fraction granulaire de taille spécifique. La pesée des refus sur chaque tamis permet alors de calculer les pourcentages cumulés passants et refusés, qui serviront à tracer la courbe granulométrique du sable analysé.

Afin de mener à bien l'analyse granulométrique, il est nécessaire de disposer de :

- Tamiseuse électrique
- Série de tamis en mm (5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.315 – 0.16 – 0.08 – fond de tamis)
- Balance
- Brosse pour nettoyage des tamis
- Etuve

Les résultats obtenus à l'issue du tamisage des sables sont présentés dans les figures :

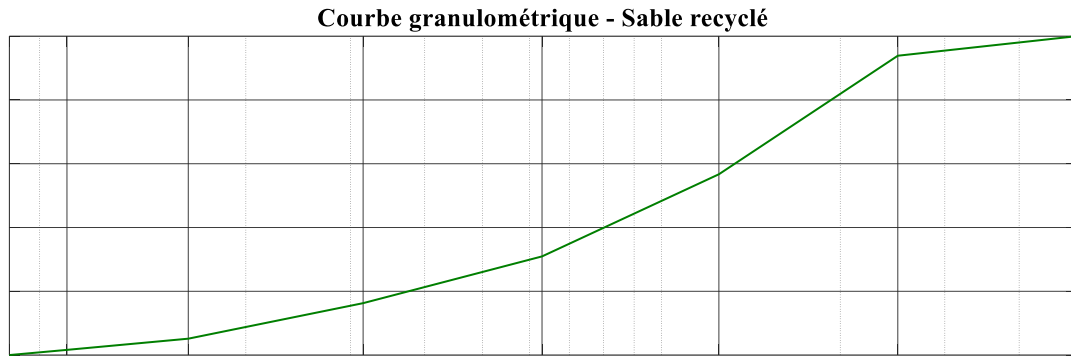


Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable recyclé.

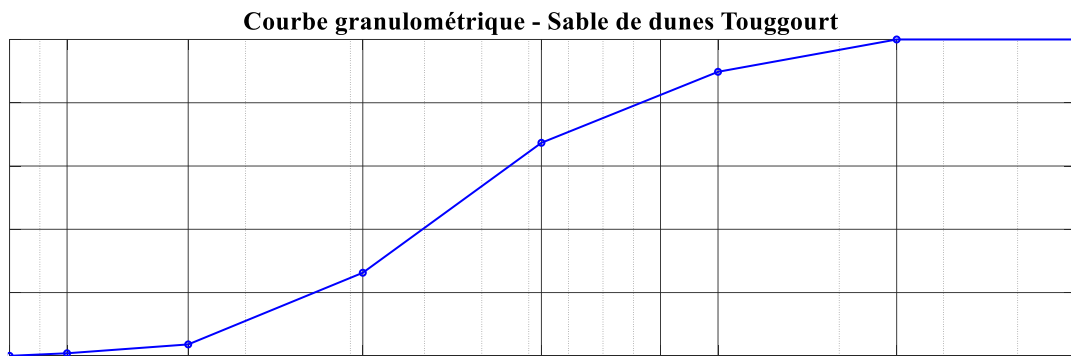


Figure II.7 : Courbe granulométrique du sable dune Touggourt.

D'après les résultats de ces deux courbes on constate que celle du sable recyclé a 90% des grains ont un diamètre inférieur à 2.5mm, cette courbe granulométrique indique un sable recyclé à granulométrie plus fine avec la présence de quelques éléments plus grossiers dans ce sable recyclé et plus étalée que le sable naturel. Cela aura des répercussions sur les propriétés et la mise en œuvre du mortier, nécessitant une optimisation de la formulation.

Concernant celle du sable de dune Touggourt nous remarquerons que 90% des grains ont un diamètre inférieur de 1.25 mm ce qui montre qu'il s'agit d'un sable fin, comme nous le confirmera la mesure du module de finesse présentée ci-après.

II.2.5.2. Module de finesse

En appliquant la norme algérienne NA 5113 [44] équivalente à la norme européenne EN

12620 [45] le module de finesse se calcule avec la relation suivante :

$$M_F = \frac{\sum \text{Refus des refus cum en \% des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5.5}{100}$$

Ainsi pour le sable de dune nous avons obtenue

MF= 2.13 1.8<MF<2.2 (Sable fin)

Tandis que pour le sable recyclé :

MF= 2.97 2.8<MF<3.3 (sable considéré comme grossier)

II.2.5.3. Masse volumique du sable.

a. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau granulaire comme le sable est une propriété importante à connaître lors de sa caractérisation. La masse volumique apparente se définit comme la masse du matériau divisée par le volume total qu'il occupe, y compris les espaces vides entre les grains. Pour déterminer la masse volumique d'un sable en sachant que le volume du récipient est de 1 litre (1 L = 1 dm³ = 0.001 m³), nous avons suivi la méthode expérimentale suivante :



Figure II.8 : Essai de détermination de la masse volumique apparente.

Matériel nécessaire :

- Un récipient d'un volume de 1 litre (ou 1 dm³)
- Une balance de précision
- Une masse de sable remplissant ce volume + surplus

Etape à suivre :

-Préparer un récipient de volume connu

-Remplir le récipient avec le sable en le versant doucement et en veillant à ce que le sable se tasse naturellement sans forcer ni le comprimer excessivement.

-Le remplissage complet du récipient formant un monticule, l'arase est faite à l'aide d'une règle, afin de correspondre le niveau supérieur du récipient avec celui du sable.

La masse volumique apparente se détermine comme indiqué par l'équation :

$$\rho_{app} = \frac{\text{masse des granulats secs}}{\text{volume du récipient}} = \frac{M_s}{V}$$

Avec :

ρ_{app} : Masse volumique apparente

M_s : la masse du sable

V : volume du récipient

Les masses volumiques apparentes mesurées sont présentées dans le tableau :

Tableau II.2 : masses volumiques apparentes des sables de dune et recyclé

Type du sable	Masse Volumique apparente
Sable de dune (SD) de Touggourt	1650 Kg/m ³
Sable recyclé (SR)	1320,6 Kg /m ³

b. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue, également appelée masse volumique réelle, est une propriété physique qui caractérise la matière constituant les grains du sable, indépendamment des espaces vides pouvant exister entre les grains. Pour déterminer la masse volumique absolue d'un sable, on utilise généralement la méthode du pycnomètre, qui permet de mesurer précisément le volume de la matière solide

Voici les principales étapes de la méthode expérimentale :

Ainsi, la mesure de la masse volumique du sable concassé a abouti à :

- Peser la masse du pycnomètre sec et vide (M_{pyc}).
- Remplir le pycnomètre avec une quantité connue de sable sec (M_{ss}).
- Ajouter un liquide de référence (généralement de l'eau) jusqu'à remplir complètement le pycnomètre.
- Peser le pycnomètre rempli de sable et de liquide (M_T).
- Trouver la masse de l'eau (M_e)

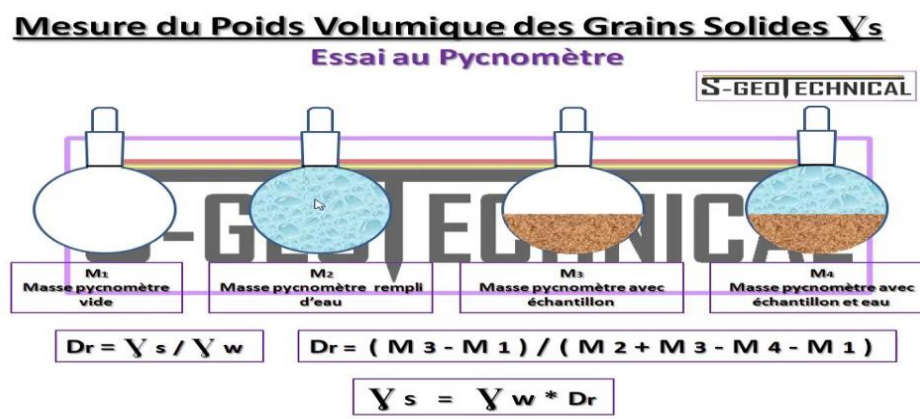


Figure II.9 : illustration de la mesure de la masse volumique absolue.

Où :

- $M_{pyc}=281.6g$ est la masse du pycnomètre vide
- $M_{ss}= 1059.1g$ est la masse du sable sec
- $M_T=1892g$ est la masse du pycnomètre rempli de sable et de liquide
- $M_e=552.2 g$ est la masse de l'eau

$$M_{ss} + M_e + M_{pyc} = M_T$$

$$M_e = M_{ss} - M_{pyc}$$

$$V_{tot} = \text{Volume designé}$$

$$V_s = V_{tot} - M_e$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ss}}{V_s}$$

Les masses volumiques absolues mesurées sont présentées dans le tableau :

Tableau II.3 : masses volumiques absolues des sables de dune et recyclé

Type de sable	Masse volumique absolue (kg /m ³)
Sable de dune (Touggourt)	2664 kg/m ³
Sable recyclé	2264.5 kg/m ³

II.3. Confection des mortiers

II.3.1. Formulation des éprouvettes

La formulation d'un mortier à base de sable de dune et de sable recyclé consiste à sélectionner judicieusement les constituants et à les proportionner de manière optimale afin d'obtenir les propriétés physiques et mécaniques répondant aux exigences techniques et économiques requises pour une application performante dans le domaine de la construction. L'objectif est d'exploiter au mieux les caractéristiques complémentaires du sable de dune et du sable recyclé mais aussi de la fumée de silice ainsi que les fibre polypropylène afin de concevoir un mortier répondant à des critères techniques stricts tout en restant économiquement viable pour les applications visées dans le secteur de la construction. Cette approche de formulation permet non seulement d'optimiser les performances du mortier, mais aussi de contribuer à la valorisation des déchets de construction sous forme de sable recyclé, limitant ainsi l'impact environnemental lié à l'extraction des ressources naturelles



Figure II.10 : Principe de la confection des mortiers.

A cet effet, nous avons confectionné 4 formulations de mortier différentes. Chaque mortier est lui-même constitué de 5 mélanges de sables (dune et recyclé) à différents dosages. Le 1^{er} mortier (MT) est un mortier témoin sans additif, le 2^{ème} mortier (M_{FS}) est constitué du mortier témoin dans lequel a été remplacé l'équivalent de 10% de la quantité du ciment par de la fumée de silice car des études précédentes que le pourcentage de remplacement de la fumée de silice doit être entre (5% et 15)% et on a choisi de prendre 10% . Le 3^{ème} mortier (M_{Fib}) est constitué du mortier témoin auquel ont été ajoutés l'équivalent de 1% du volume du mortier celui-ci aussi est un chois car selon des études précédentes le pourcentage d'ajout de fibres doit être entre (0.5% ET 1.5%) de fibres polypropylène et enfin, le 4^{ème} mortier (M_{FFS}) est constitué du mortier témoin auquel les 10% de la fumée de silice ainsi que les 1% des fibres ont été ajoutées. Le tableau montre les différents mélanges de sables utilisés et leurs pourcentages. Et tous les mélanges furent dosés en eau de sorte que le rapport E/C soit maintenu à 0.5

Tableau II.4 : pourcentages de sables de dune et recyclé.

	Sable de dune (%)	Sable recyclé (%)
M0	100	0
M1	75	25
M2	50	50
M3	25	75
M4	0	100

Les tableaux suivants nous résument les compositions des mortiers adoptées :

Tableau II.5 : Formulation des éprouvettes prismatiques.

	Nombre D'éprouvette		S D (g)	S R (g)	Ciment (g)	F s (g)	Fib (g)	Eau eff (g)
MT	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						
MFs	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						
MFib	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						
MFFs	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						

Sur la base de ces formulations, Nous avons confectionné au total :

- 60 éprouvettes de forme (4×4×16 cm³), elles sont utilisées pour les essais de flexion trois points et compression.

-60 éprouvettes cubique de dimensions (5×5×5 cm³) pour les tests d'absorption d'eau. Ces éprouvettes garderont la même dénomination que celles précédentes étant donné que la formulation et la méthode de confection a été maintenue, sauf les quantités de matériaux qui s'en sont retrouvées changées, pour correspondre au volume différent des moules cubiques. Le tableau y suivant montre les quantités confectionnées.

Tableau II.6 : Formulation des éprouvettes cubiques.

	Nombre D'éprouvettes		S D (g)	S R (g)	Ciment (g)	F s (g)	Fib (g)	Eau eff (g)
MT	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						
MFs	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						
MFib	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						
MFFs	3	M0						
	3	M1						
	3	M2						
	3	M3						
	3	M4						

II.3.2. Préparation des éprouvettes

La confection des éprouvettes est réalisée conformément à la norme NF EN 196-1[46]. Le malaxage du mélange est effectué à l'aide d'un malaxeur à deux vitesses, pour une durée totale de 3 minutes.

Le protocole de malaxage se déroule de la manière suivante :

1. Introduire le ciment dans le bol du malaxeur, puis ajouter l'eau et le super plastifiant.
2. Malaxer le tout à vitesse lente pendant 30 secondes.
3. Ajouter progressivement le sable durant 30 secondes.
4. Poursuivre le malaxage à vitesse rapide pendant 30 secondes.
5. Arrêter le malaxeur pendant 30 secondes et racler les parois du récipient.
6. Remettre le malaxeur en marche à vitesse rapide pendant 1 minute.

Une fois le malaxage terminé, le mortier est coulé dans des moules en acier, qui sont ensuite recouverts de sachets en plastique et stockés dans le laboratoire pendant 24 heures.

Après cette première phase de durcissement de 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau à température ambiante jusqu'au jour des essais.

Ce protocole normalisé de préparation des éprouvettes de mortier vise à assurer la reproductibilité des mélanges et la fiabilité des résultats obtenus lors des évaluations ultérieures.

II.3.3. Essai de caractérisation du mortier :

Après 28 jours de cure, les éprouvettes de mortier ont fait l'objet d'une série de tests non destructifs et destructifs afin d'évaluer leurs propriétés physiques et mécaniques.

II.3.3.1. Tests non destructifs

-Mesures d'absorption d'eau : ces essais permettent de déterminer la capacité d'absorption d'eau du mortier, un paramètre lié à sa porosité et par conséquent sa durabilité.

-Mesures de vitesses acoustiques : ces mesures non destructives fournissent des informations sur la compacité et l'homogénéité du matériau.

II.3.3.2. Tests destructifs

-Essai de résistance à la traction par flexion : cet essai mécanique permet de caractériser la résistance en traction du mortier, un paramètre clé pour évaluer sa capacité à résister aux efforts de traction.

-Essai de résistance à la compression : cet essai standard fournit la résistance en compression du mortier, une propriété majeure pour ses applications dans le bâtiment.

Ces différents tests, combinant des analyses non destructives et destructives, offrent une évaluation complète des performances physiques et mécaniques du mortier à base de sable de dune et de sable recyclé, après 28 jours de durcissement.

Les résultats obtenus permettront d'évaluer les propriétés de ces mortiers combinant deux sables à faible impact environnemental lorsqu'utilisés seuls, comparativement à ces mêmes mortiers améliorés par additions de fumée de silice et/ou de fibres Polypropylène.

Cette approche expérimentale complète vise à apporter des éléments de réponse quant à la faisabilité et à la pertinence de l'emploi de ce mortier innovant dans les applications de construction

II.3.4. Mesure de vitesse ultrason

L'auscultation par ultrasons est une méthode non destructive utilisée pour évaluer l'homogénéité du béton, conformément à la norme NF EN 12504-4[47] et à la norme ASTM C597[48]. Le principe consiste à mesurer le temps de propagation d'ondes longitudinales (ondes de compression) à travers un élément en béton ou en mortier sur une distance connue.

La vitesse de propagation de ces ondes ultrasonores est influencée par plusieurs facteurs, tels que l'âge du béton, son taux d'humidité, le rapport granulats/ciment, le type de granulats, la présence d'armatures ou de fissures. L'analyse de ces vitesses de propagation permet donc de caractériser l'intégrité et la qualité du béton, sans pour autant porter atteinte à sa structure.

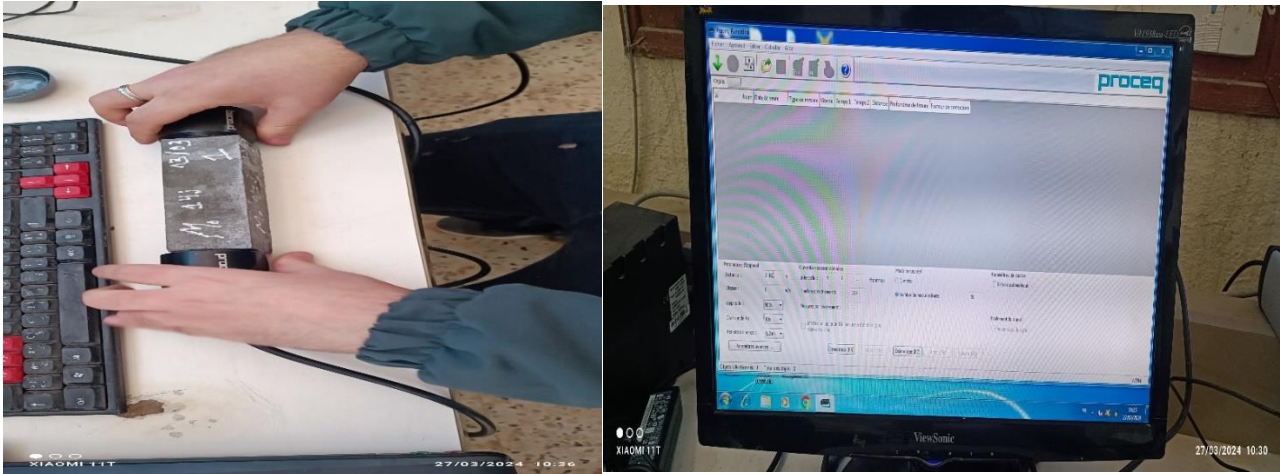


Figure II.11 : Mesure de la vitesse ultrasonore.

Dans le cadre de cette étude, l'appareil de mesure ultrasonore utilisé est le Pundit Lab, qui se compose des éléments suivants :

- a. Un testeur ultrasonique, permettant la génération et la réception des ondes.
- b. Deux transducteurs, l'un émetteur et l'autre récepteur, placés de part et d'autre de l'éprouvette.
- c. Une barre de calibrage, servant de référence pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil avant la mesure effectuée sur éprouvette.
- d. Deux câbles de connexion de 1.5 m, reliant les transducteurs au testeur.
- e. Un gel de contact, améliorant le couplage entre les transducteurs et la surface de l'éprouvette.
- f. Une centrale d'acquisition des données, enregistrant les mesures de temps de propagation.

Cette méthode non destructive offre ainsi la possibilité d'évaluer l'homogénéité et la qualité du mortier à base de sable de dune et de sable recyclé, sans altérer son intégrité.

II.3.4.1. Principe de mesure

L'appareil à ultrasons génère des ondes ou des impulsions ultrasonores qui sont transmises au mortier par l'intermédiaire d'un transducteur mis en contact avec la surface de l'éprouvette. Le temps de propagation de ces ondes à travers le mortier est ensuite mesuré et affiché sur l'écran numérique de l'appareil ou enregistré par un logiciel dédié.

II.3.4.2. Classement de la qualité du béton

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores mesurée permet de classer la qualité du mortier selon le barème suivant :

Vitesse de propagation (m/s) Qualité du mortier :

Tableau II.7 : Classification de la qualité des bétons selon la vitesse ultrasonore

>4500	Excellente
3500-4500	Bonne
3000-3500	Moyenne
<3000	Mauvaise

Ce classement fournit une indication sur l'homogénéité et la compacité du mortier. Une vitesse de propagation élevée traduit généralement une faible porosité et un bon état de compaction du matériau, témoignant ainsi d'une qualité supérieure.

II.3.5. Absorption

L'absorption d'eau des éprouvettes de mortier a été évaluée selon la norme ASTM C1585-11[49]. Cet essai, réalisé sans application de pression hydraulique, permet de caractériser la capacité du matériau à absorber l'eau, un paramètre révélateur de sa porosité et de sa durabilité. Des éprouvettes cubiques de (5*5*5 cm) ont été confectionnées et conservées dans l'eau pendant 28 jours, afin d'évaluer à saturation, la valeur de la porosité accessible à l'eau des différentes formulations de mortier.



Figure II.12 : Éprouvettes cubiques utilisées pour l'absorption.

Le protocole expérimental s'est déroulé en deux étapes :

Tout d'abord, les éprouvettes sont séchées en étuve à 105°C jusqu'à masse constante, ce qui permet de déterminer leur masse sèche initiale. Ensuite, les éprouvettes sont immergées dans l'eau et leur masse est mesurée régulièrement, toutes les 24 heures, jusqu'à ce qu'elles atteignent une masse saturée. A partir de ces données de masses sèche et saturée, le taux d'absorption d'eau du mortier est alors calculé. Les résultats de cet essai d'absorption, combinés aux autres analyses non destructives qui sont les mesures de vitesses ultrasonores, permettront d'évaluer de manière complète les propriétés physiques du mortier innovant à base de sable de dune et de sable recyclé. Cette caractérisation de la porosité contribuera à évaluer la durabilité de ce type de mortier à long terme mais aussi 'avoir une idée de ses performances vis-à-vis des agents agressifs externes.

II.3.6. Résistance à la traction par flexion

L'essai de résistance à la traction par flexion, réalisé selon un montage en 3 points, permet d'évaluer indirectement la capacité d'un matériau, en l'occurrence le mortier, à résister à la rupture en traction.



Figure II.13 : Test de résistance à la flexion.

Le principe de l'essai est le suivant :

- Les éprouvettes de mortier, de dimensions normalisées, sont posées sur deux points d'appui espacés de 120 mm
- Une force est alors appliquée au niveau du point central supérieur de l'éprouvette.
- Sous l'effet de cette sollicitation en flexion, des contraintes de traction apparaissent dans la partie inférieure de l'éprouvette.
- L'essai se poursuit jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne sa résistance maximale et se rompe.

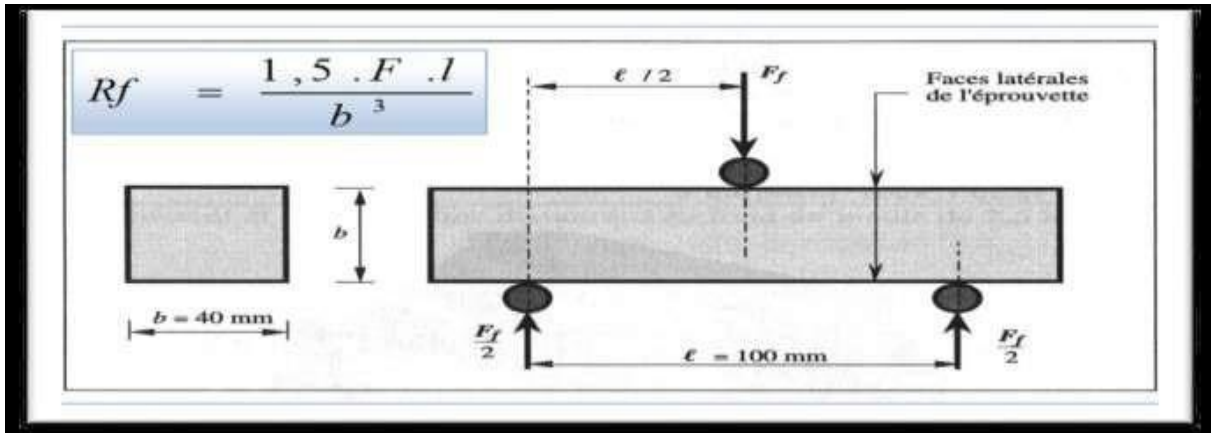


Figure II.14 : Principe de l'essai de flexion 3 points.

La résistance à la traction par flexion est ainsi déterminée à partir de la valeur maximale de la force appliquée et des dimensions de l'éprouvette. Ce type d'essai mécanique destructif permet d'évaluer une propriété essentielle du mortier, à savoir sa capacité à résister aux efforts de traction, qui est cruciale pour des applications dans le domaine de la construction. Les résultats obtenus sur le mortier à base de sable de dune et de sable recyclé seuls et améliorés par fumée de silice et/ou fibre polypropylène seront évalués afin d'identifier les éventuels avantages ou limites de cette formulation innovante. Le schéma de principe pour l'essai de flexion 3-points ainsi que l'équation donnant la résistance à la traction par flexion est donné dans la Figure II.14

II.3.7. Résistance à la compression

Après avoir réalisé l'essai de résistance à la traction par flexion, les demi-éprouvettes obtenues sont soumises à un essai de résistance à la compression. Pour cet essai, chaque demi-prisme de mortier, présentant des faces lisses de moulage, est placé entre deux plaques de métal dur sous une section de 40 x 40 mm². Une force de compression croissante est alors appliquée sur les faces de l'éprouvette jusqu'à ce qu'elle atteigne sa résistance maximale et se rompe. Cet essai mécanique destructif permet de déterminer la résistance à la rupture en compression du mortier.

C'est une propriété essentielle pour évaluer les performances du matériau dans ses applications de construction, où il est généralement soumis à des sollicitations de compression. Les résultats de cet essai de compression, combinés à ceux de l'essai de résistance à la traction par flexion, offrent une caractérisation complète des performances mécaniques du mortier à base de sable de dune et de sable recyclé. La comparaison de ces résultats avec ceux d'un mortier de référence contribuera à identifier les avantages et les éventuelles limites de cette formulation innovante intégrant les deux types de sables.



Figure II.15 : Test de résistance à la compression.

La résistance mécanique est obtenue par l'application de l'équation

$$R_c = \frac{F_c}{B^2}$$

Avec :

R_c : La résistance à la compression

F_c : La force appliquée

B^2 : La section transversale de l'éprouvette de mortier.

C'est une propriété essentielle pour évaluer les performances du matériau cimentaire tant donné qu'il est généralement soumis à des sollicitations de compression. Les résultats de cet essai de compression, combinés à ceux de l'essai de résistance à la traction par flexion, offriront une évaluation plus pertinente des performances mécaniques des différentes mixtures de mortiers confectionnées. Ils permettront aussi de distinguer les formulations les plus avantageuses mécaniquement parlant, et donc nécessitant une étude approfondie en vue d'une optimisation de formulation.

II.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail toute la partie expérimentale en commençant par la caractérisation de différents constituants, ainsi que les essais auxquels ont été soumis nos mortiers. Ce qui constitue une étape nécessaire afin de comprendre de manière claire le comportement du mortier à un âge avancé. Les différents résultats obtenus à l'issue de nos tests en laboratoire sur les mortiers à base de sable de dune et de sable recyclé sont illustrés et commentés dans le chapitre suivant

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. INTRODUCTION

Dans ce présent chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux que nous avons obtenus à partir des différents essais effectués sur les mortiers à base de sable de dune et sable recyclé avec les additifs utilisés à l'état durci.

Durant l'étude, nous avons confectionné quatre formulations de mortiers, un mortier témoin, un mortier avec de la fumée de silice, une autre avec des fibre polypropylène et enfin un mortier combinant de la fumée de silice et des fibres polypropylène. Chaque formulation a nécessité la confection de trois éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) et trois éprouvettes cubiques ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$), chacune soumise à des essais spécifiques, comme mentionné au chapitre 2.

III.2. Résistance à la traction

III.2.1. Mortier témoin

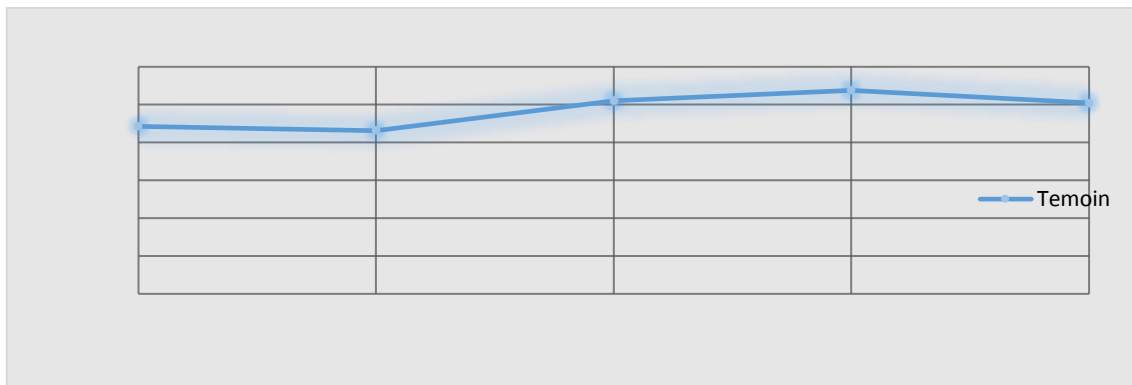


Figure III.1 : Résultats de la résistance à la traction du mortier témoin.

Les résultats du test à la traction donnée dans la figure , montrent que l'incorporation de sable recyclé dans les mortiers à un impact notable sur leur résistance en traction. Le mélange 0% de **sable de dune** affiche une résistance en traction de 0 MPa. Lorsque 0% du sable est remplacé par du **sable recyclé**, la résistance en traction diminue légèrement à 0 MPa.

Cependant, à partir d'un remplacement de 0%, la résistance en traction augmente de manière significative, atteignant 0 MPa. Cette tendance s'accroît avec 0% de sable recyclé et 0% sable de dune, où la résistance en traction atteint son maximum à 0 MPa. Bien que la résistance en traction diminue légèrement à 0 MPa avec 100% de sable recyclé, elle reste nettement supérieure au mélange 100% sable de dune.

III.2.2. Mortier avec de la FS

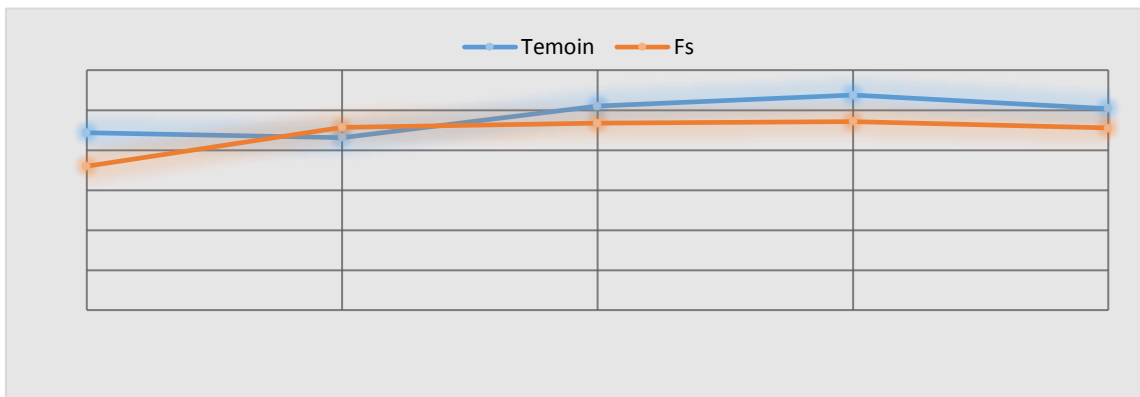


Figure III.2 : Résistance à la traction des mortiers FS vs mortier témoin.

La comparaison des résultats de résistance à la traction entre le mortier témoin et le mortier contenant 0% de **fumée de silice** (FS) met en évidence des différences de comportement. Pour le **mortier témoin sans fumée de silice**, la résistance en traction augmente de manière plus importante avec l'ajout de sable recyclé, atteignant un maximum de 0 MPa à 0 % de remplacement comme décrit précédemment.

En revanche, pour le mortier FS, les résultats sont plus **homogènes**, avec des valeurs comprises entre 0 et 0 MPa, et ce, quelle que soit la proportion de sable recyclé (hors témoins 0% SR). Cette différence suggère que l'incorporation de 0% de fumée de silice semble limiter les gains de résistance en traction comparativement aux mortiers témoins qui affichent des résistances plus élevées.

Tandis qu'en terme d'ordre de grandeur, les résistances des mélanges témoins et FS semblent proches, une exception est toutefois à noter pour le mélange à 0% de sable recyclé où le mortier FS est plus faible (0 MPa contre 0 MPa) où nous observons une perte de résistance de l'ordre de 0%.

III.2.3. Mortier avec les fibres polypropylène

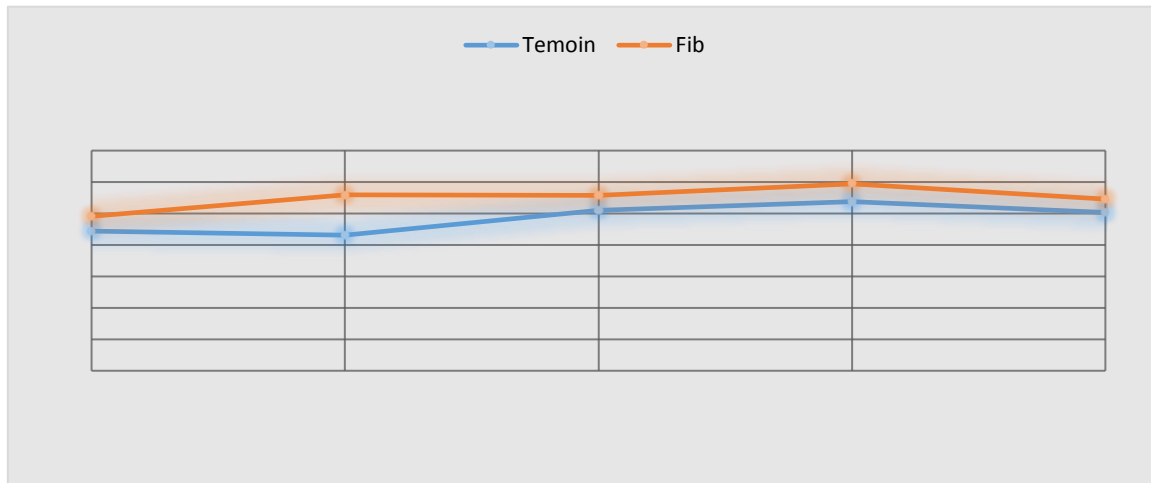


Figure III.3 : Résistance à la traction des mortiers fibrés vs mortier témoin.

La comparaison des résistances en traction entre le mortier témoin et le mortier incorporant des fibres de polypropylène met en évidence des différences significatives. Alors que le mortier témoin présente une résistance en traction qui augmente avec l'ajout de sable recyclé, atteignant un maximum de 0 MPa à 75% de remplacement, le mortier avec fibres de polypropylène affiche des valeurs systématiquement supérieures, quelle que soit la proportion de sable recyclé.

En effet, les résistances en traction du mortier avec fibres varient de 0 MPa pour 0% SR jusqu'à un maximum de 0 MPa à 0 % SR soit un gain maximal en résistance de 0 %, dépassant ainsi nettement les performances du mortier témoin. Même pour le mélange à 0% de sable recyclé, le mortier avec fibres de polypropylène conserve une résistance en traction de 0 MPa, supérieure au mortier témoin à 0 MPa.

Ces résultats démontrent que l'incorporation de fibres de polypropylène permet non seulement d'améliorer les propriétés en traction des mortiers, mais également de mieux valoriser les bénéfices apportés par l'utilisation du sable recyclé.

III.2.4. Mortier avec les fibres polypropylène et la fumée de silice (FFS)

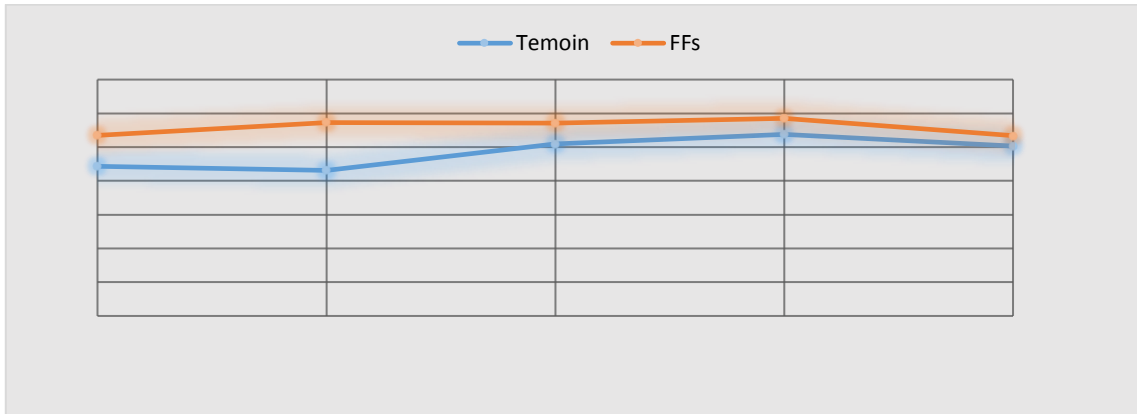


Figure III.4 : Résistance à la traction des mortiers FFS vs mortier témoin.

La comparaison des performances en traction entre le mortier témoin et le mortier incorporant des fibres et de la fumée de silice (FFS) met en évidence des différences notables. Alors que le mortier témoin présente une résistance en traction qui augmente avec l'ajout de sable recyclé, atteignant un maximum de 0 MPa à 0 % de remplacement, le mortier FFS affiche des valeurs de résistances somme toutes du même ordre de grandeur indépendamment de la présence de sable recyclé.

En effet, les résistances en traction du mortier FFs varient de 0 MPa à 0% SR jusqu'à un maximum de 0 MPa à 0 % SR, soit une amélioration de près de 0 % par rapport au mortier 0% SR, le mortier FFS conserve une résistance en traction de 0 MPa, dépassant légèrement le mortier témoin à 0 MPa.

Ces résultats démontrent que l'incorporation conjointe de fibres et de fumée de silice dans le mortier permet effectivement non seulement d'améliorer significativement les propriétés en traction, mais aussi de maintenir des performances élevées indépendamment de la teneur en sable recyclé.

III.3. Résistance à la compression

III.3.1. Mortier témoin

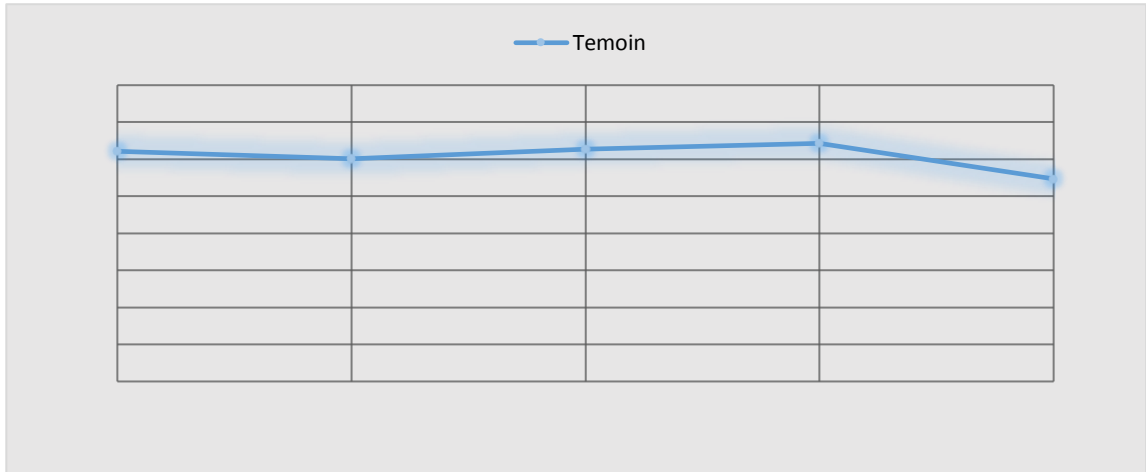


Figure III.5 : Courbe de résistance à la compression du mortier témoin

L'analyse des performances en compression du mortier témoin révèle une tendance intéressante en fonction de la proportion de sable recyclé utilisée. Lorsque le mortier ne contient aucun sable recyclé (0% SR), sa résistance en compression est de 0 MPa. Avec l'introduction de 0 % de sable recyclé, on observe une légère diminution de la résistance, qui s'établit alors à 0 MPa.

Cependant, à partir d'un taux de remplacement de 0%, la résistance en compression remonte pour atteindre 0 MPa. Cette amélioration se poursuit avec 0 % de sable recyclé, où la résistance culmine à 0 MPa, soit la valeur maximale enregistrée. Néanmoins, lorsque la totalité du sable est remplacée par du sable recyclé (0% SR), la résistance en compression chute de manière significative, se limitant à 0 MPa.

Ces résultats suggèrent qu'un remplacement modéré du sable par du sable recyclé, jusqu'à 0%, permet de maintenir voire parfois d'améliorer les performances en compression du mortier témoin à 0% de sable de dune.

III.3.2. Mortier avec de la FS.

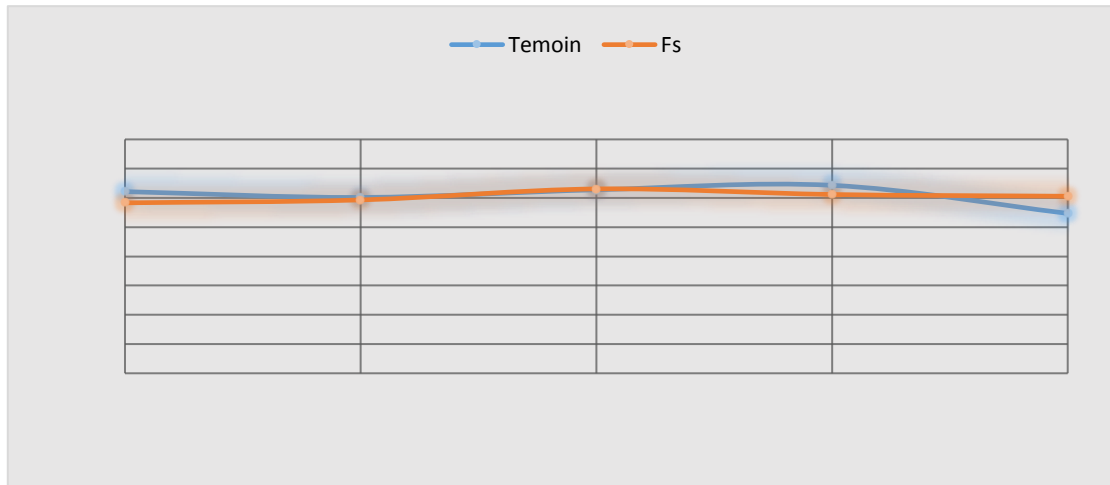


Figure III.6 : Résistance à la compression des mortiers fibrés vs mortier témoin.

La comparaison des performances en compression du mortier témoin et du mortier incorporant de la fumée de silice (FS) met en évidence des différences marquées. Pour le mortier témoin, on observe une augmentation progressive de la résistance en compression à mesure que le sable naturel est remplacé par du sable recyclé, atteignant un sommet à 0 MPa lorsque le taux de remplacement atteint 0 %. En revanche, le mortier FS présente des résultats beaucoup plus stables, avec des valeurs de résistance en compression comprises entre 0 MPa et 0 MPa, et ce indépendamment de la proportion de sable recyclé utilisée.

Cette observation suggère que l'ajout de fumée de silice a pour effet de limiter les gains de résistance en compression éventuellement apportés par l'incorporation de sable recyclé. Cependant, le mortier témoin affiche globalement des résistances plus élevées, à l'exception du mélange contenant 0% de sable recyclé où le mortier FS se montre légèrement supérieur (0 MPa contre 0 MPa pour le mortier témoin).

De plus, lorsque le sable est intégralement remplacé par du sable recyclé (0% SR), le mortier FS maintient une résistance en compression de 0 MPa, alors que le mortier témoin chute à 0 MPa. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de fumée de silice confère une meilleure stabilité des performances en compression, bien que les valeurs restent généralement un peu inférieures à celles du mortier témoin, sauf pour les mélanges à 0% et 0% de sable recyclé.

III.3.3. Mortier avec les fibres polypropylène.

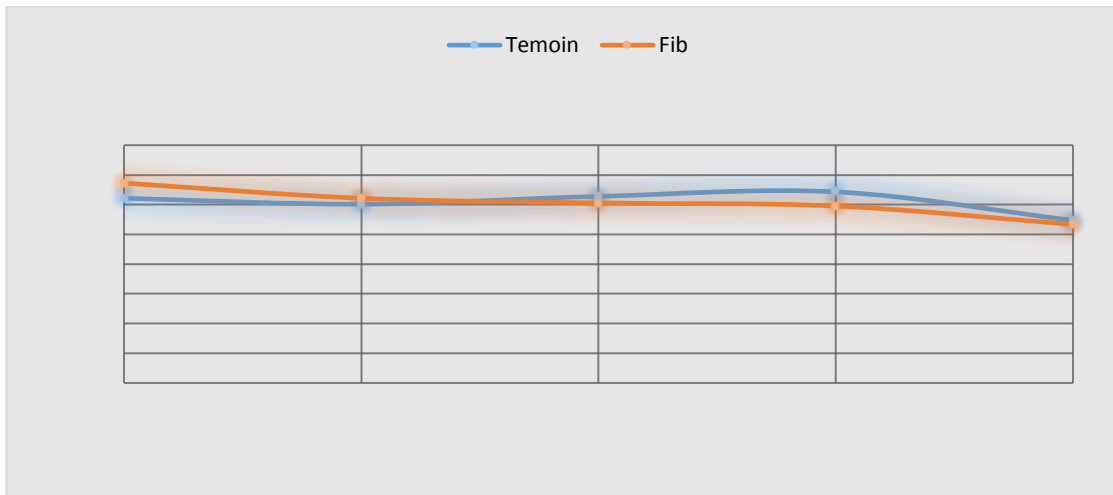


Figure III.7 : Résistance à la compression des mortiers fibrés vs mortier témoin.

La comparaison des propriétés en compression entre le mortier témoin et le mortier renforcé de fibres de met en évidence des tendances distinctes. Lorsque le mélange ne contient aucun sable recyclé (0% SR), le mortier avec fibres de polypropylène affiche une résistance en compression de 0 MPa, soit une amélioration substantielle par rapport au mortier témoin établi à 0 MPa.

Cependant, à mesure que la proportion de sable recyclé augmente, les performances en compression du mortier avec fibres de polypropylène se dégradent progressivement, atteignant seulement 0 MPa lorsque la totalité du sable est remplacée.

Cette évolution contraste avec celle observée pour le mortier témoin, dont la résistance en compression connaît une hausse jusqu'à atteindre un pic de 0 MPa à 0 % de sable recyclé, avant de chuter à 0 MPa dans le mélange à 0% de sable recyclé. Ainsi, à partir d'un taux de remplacement de 0%, le mortier avec fibres de polypropylène devient moins performant en compression que le mortier témoin.

Ces résultats indiquent que l'ajout de fibres de polypropylène présente des avantages en compression pour les mélanges sans sable recyclé, mais perd en efficacité à mesure que la part de sable recyclé augmente dans le mélange.

III.3.4. Mortier avec fumée de silice et fibre polypropylène.

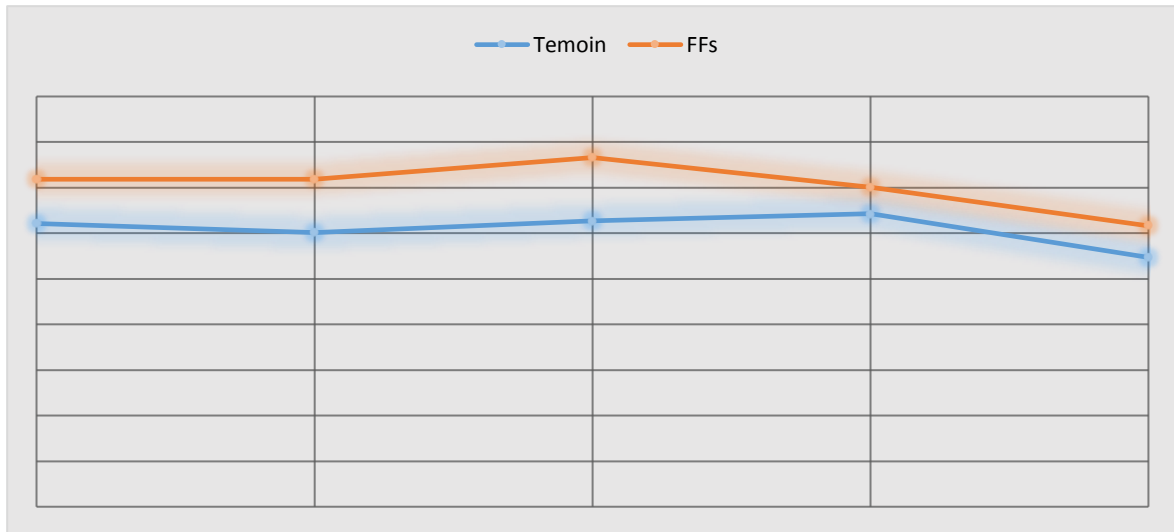


Figure III.8 : Résistance à la traction des mortiers FFs vs mortier témoin.

L'analyse comparative des propriétés en compression révèle une supériorité manifeste du mortier intégrant à la fois des fibres et de la fumée de silice (mortier FFs) par rapport au mortier témoin. Quelle que soit la proportion de sable recyclé incorporée, le mortier FFs affiche systématiquement des résistances en compression plus élevées.

Ainsi, en l'absence totale de sable recyclé (0% SR), le mortier FFs atteint 0 MPa, soit une valeur nettement supérieure aux 0 MPa du mortier témoin. Cette tendance se confirme avec l'ajout progressif de sable recyclé, le mortier FFs culminant même à 0 MPa à 0 % SR, alors que le mortier témoin n'atteint que 0 MPa à 0% SR. Fait remarquable, même lorsque la totalité du sable dune est remplacée par du sable recyclé (100% SR), le mortier FFs conserve une résistance en compression de 0 MPa, là où le mortier témoin chute à 0 MPa.

Ces résultats démontrent que la combinaison de fibres et de fumée de silice permet d'améliorer substantiellement les performances en compression du mortier contrairement à lorsqu'elles sont utilisées chacune seules, et ce indépendamment de la proportion de sable recyclé utilisée

III.4. Observation.

L'analyse comparative des propriétés en compression révèle une supériorité du mortier intégrant à la fois des fibres et de la fumée de silice (mortier FFS) par rapport aux autres mélanges. Quelle que soit la proportion de sable recyclé incorporée, le mortier FFS affiche systématiquement des résistances en compression plus élevées.

III.4.1. Ultrason

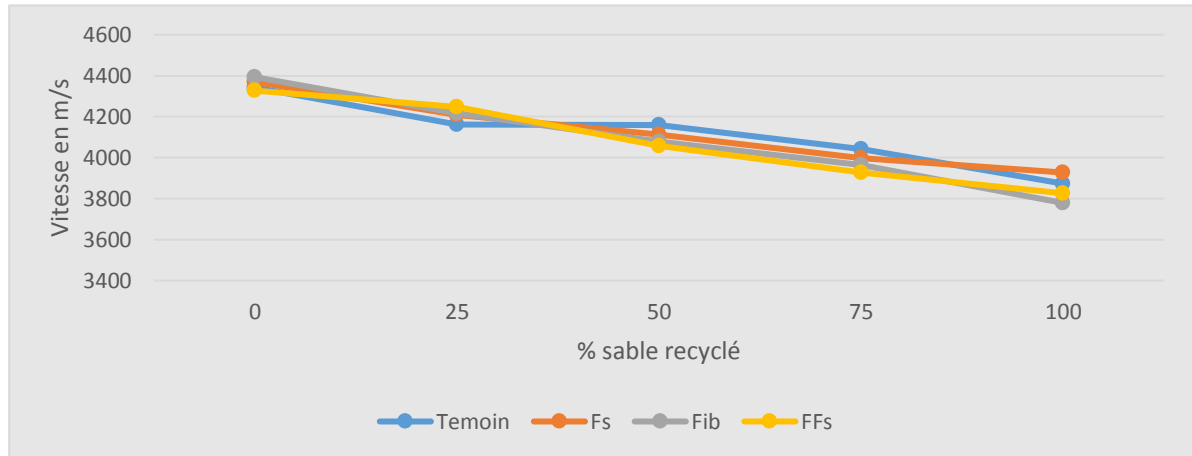


Figure III.9 : Résultats du test ultrason pour les mortiers testés.

L'analyse des résultats des tests ultrasons met en évidence des tendances intéressantes pour les différents mortiers en fonction de la proportion de sable recyclé. Pour le mortier témoin, la vitesse des ultrasons diminue progressivement à mesure que le taux de sable recyclé augmente, passant de 4350 m/s à 0% SR à seulement 3850 m/s à 100% SR. Cette baisse de vitesse traduit une dégradation de la qualité du mortier lorsque la part de sable recyclé s'accroît.

À l'inverse, l'incorporation de fumée de silice (mortier FS) permet de mieux préserver les performances, avec une vitesse restant supérieure au mortier témoin jusqu'à 25 % SR, avant de devenir légèrement inférieure à 100% SR.

Quant au mortier renforcé de fibres de polypropylène (mortier Fib), il affiche la vitesse la plus élevée à 0% SR, mais subit une forte baisse avec l'augmentation du taux de sable recyclé, devenant moins performant que les autres mélanges à partir de 25% SR. Enfin, la combinaison fibres - fumée de silice (mortier FFS) semble être la solution la plus efficace pour maintenir la qualité du mortier, sa vitesse des ultrasons restant systématiquement supérieure aux autres mélanges, y compris à 100% de sable recyclé.

III.4.2. Absorption

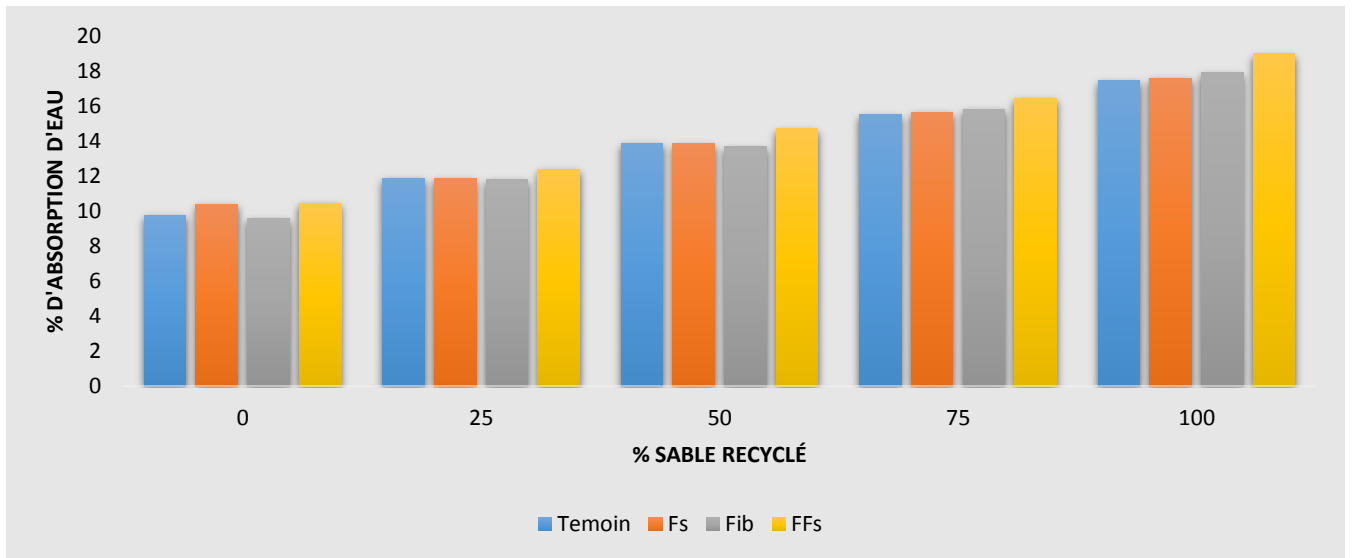


Figure III.10 : Courbe d'absorption des mortiers.

L'analyse des résultats d'absorption d'eau met en évidence des tendances intéressantes selon la composition des mortiers. Pour le mortier témoin, l'absorption augmente de manière quasi linéaire avec l'accroissement du taux de sable recyclé, passant de 0 % à 0% SR à 0 % à 100% SR. Cette hausse traduit une porosité et une perméabilité accrues du mortier lorsque la proportion de sable recyclé est élevée.

III.5. CONCLUSION

En conclusion, cette étude a permis de caractériser en détail les propriétés des mortiers élaborés avec différentes proportions de sable recyclé, de fumée de silice et de fibres de polypropylène. Les résultats ont montré que ces éléments influencent de manière significative les performances mécaniques, physiques et acoustiques des mortiers.

L'incorporation de sable recyclé, jusqu'à 0%, semble globalement bénéfique pour la résistance à la traction bien qu'un remplacement total dégrade ces propriétés. Pour la compression on voit que dans certains cas le mélange 0% Dune et 0% sable recyclé est le plus résistant tandis que dans d'autres cas nous voyons que le mortier à 0% sable de dune est le plus résistant ce qui signifie que l'ajout d'un pourcentage élevé de sable recyclé peut abaisser la résistance à la compression du mortier. L'ajout de fumée de silice permet quant à lui de stabiliser les résultats, mais sans apporter d'amélioration notable.

En revanche, la combinaison de fibres de polypropylène et de fumée de silice s'avère être la solution la plus performante. Elle permet d'obtenir des résistances en traction et en compression supérieures, y compris avec un fort taux de sable recyclé.

Sur le plan des propriétés physiques, l'augmentation du taux de sable recyclé induit une hausse significative de l'absorption d'eau, traduisant une porosité accrue du matériau. Les mélanges contenant de la fumée de silice ou des fibres montrent une tendance similaire, l'effet délétère du sable recyclé restant prédominant.

Enfin, les mesures ultrasonores révèlent une dégradation de la qualité du mortier lorsque la part de sable recyclé augmente, avec une diminution de la vitesse de propagation des ondes. Là encore, la combinaison de fibres et de fumée de silice permet de mieux préserver les propriétés du matériau.

Cette étude démontre la pertinence d'utiliser des matériaux recyclés dans les mortiers, tout en mettant en évidence l'intérêt de la synergie entre fibres et fumée de silice pour optimiser les performances. Ces résultats constituent une base solide pour poursuivre l'optimisation de la formulation de ces mortiers à base de ressources alternatives, en vue d'une application concrète dans le secteur de la construction.

CONCLUSION GENERALE

Des chercheurs du monde entier ont mené de nombreuses études sur l'utilisation du sable de dune et du sable recyclé comme matériaux de construction. Compte tenu de leur faible utilisation véritable sur le terrain, différentes idées ont été proposées afin de trouver des solutions appropriées pour valoriser ces matériaux se trouvant en grande quantité dans les régions Saharienne de l'Algérie pour le sable de dune et dans toutes les régions du pays pour le sable recyclé de l'industrie de démolition. L'Algérie souffrant d'un manque évident d'agrégats naturels (alluvionnaires notamment), leur utilisation contribuerait d'une part à atténuer la crise qui entrave le domaine de la construction et à réduire le coût de ces derniers d'autre part.

Le sable de dune, bien qu'abondant est très peu utilisé dans le bâtiment, car il comporte des particules de taille fine qui entraînent une diminution de la résistance mécanique du béton. Pour pallier à ce problème, nous avons opté pour un ajustement du module de finesse de notre sable par l'ajout d'un sable de grosseur plus élevée. A cet escient, nous avons opté pour un sable de béton recyclé. Cette approche non seulement permet d'améliorer les propriétés mécaniques du mélange, mais s'inscrit également dans une démarche de valorisation des déchets de construction et de démolition, contribuant ainsi à une utilisation plus durable des ressources dans le secteur du bâtiment.

A l'issu du travail expérimental mené au laboratoire de béton du département de génie civil, durant le projet de fin d'études, de nombreux résultats ont été obtenus, ils peuvent se résumer comme suit :

- Le mortier confectionné avec la fumée de silice et les fibres de polypropylène est le plus résistant, que cela soit à la traction ou à la compression.
- Le mélange de sable (SD+SR) le plus résistant à la traction pour les différents mortiers, est le 0% sable de dune et 0% sable recyclé
- Le pourcentage choisi pour la fumée de silice n'a pas donné les résultats attendus ce qui nous montre que 0% ne serait pas le pourcentage idéal pour ce type de mélanges
- L'absorption des mortiers augmente au fur à mesure qu'on ajoute du sable recyclé, du fait de la forte porosité initiale du grain de sable recyclé.
- La nature du sable et la morphologie du grain de sable influe grandement la résistance mécanique du mortier.

Perspectives

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle et efficace de ces matériaux, nous recommandons l'utilisation du sable recyclé pour des recherches futures, en testant certains aspects notamment :

- Varier les sables de dunes de par leur provenance, afin d'améliorer plus efficacement la compacité des mortiers et en conséquences leurs caractéristiques mécaniques et de durabilité.
- Pré-traiter les grains de sables recyclés afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et leur porosité par exemple par pré-mélange avec de la fumée de silice.
- Tester d'autres taux de substitution du ciment par de la fumée de silice, tout en restant dans les valeurs admises par la littérature.
- Varier la nature, la forme et la quantité de fibres, afin d'évaluer quelles variantes seraient efficaces pour améliorer les caractéristiques des mortiers.
- Elaborer des mortiers à tester à des échéances plus éloignées, type 90 jours, afin de laisser le temps à la réaction pouzzolanique de se produire, et donc d'améliorer les résistances du mortier.