



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة قاصدي مرباح - ورقلة
UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil et hydraulique

Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences

Spécialité : Génie civil

Option : Génie civil

Intitulé

**Influence de la formulation sur les propriétés des
bétons de sable de dunes**

Présentée et soutenue publiquement

Par : Mr KENNOUCHE Samir

Le : 16/05/2024

Devant le jury composé de :

- Mr. KEBAILI Nabil	Maître de conférences A	UKM Ouargla	Président
- Mr. BELFERRAG Allaoua	Maître de conférences A	UKM Ouargla	Rapporteur
- Mr. ABANI Said	Maître de conférences A	UKM Ouargla	Examineur
- Mr. LOGBI Abdelaziz	Maître de conférences A	UHL El Oued	Examineur
- Mr. TIOUA Tahar	Maître de conférences A	U Mila	Examineur
- Mr. MANI Mohammed	Maître de conférences A	UHL El Oued	Examineur

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la possibilité de mener à bien ce travail de recherche.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de thèse, M. Belferrag Allaoua, pour son soutien indéfectible, ses conseils éclairés, et ses accompagnements précieux tout au long de la préparation de cette thèse.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury, présidé par Mr. KEBAILI Nabil, ainsi qu'à chacun des membres pour avoir consacré leur temps à discuter de cette thèse. Leurs contributions et évaluations ont grandement enrichi ce travail.

Un remerciement particulier est adressé à Mr. Boutaoutaou Djamel pour sa disponibilité et son aide, à tous les collaborateurs du laboratoire LTPS Ouargla, en particulier à M. Hafsi Abd El Latif, pour son accueil chaleureux et ses conseils précieux.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont apporté leur aide et leur encouragement au cours de l'élaboration de cette thèse, notamment Chaib Hachem (Enseignant à l'Université de Ouargla), Keshired Ali (laboratoire de l'Université de Ouargla), Meziani Nedjma (Enseignante à l'Université de Ouargla) et Bouziane Haroun (Enseignant au lycée Mohamed Elaid-Ouargla).

Enfin, mes remerciements vont à mes parents et à ma famille, en particulier à ma femme, dont le soutien moral et les efforts ont été inestimables tout au long de ce parcours.

Résumé

Cette étude se focalise sur la valorisation du sable de dunes et des granulats recyclés dans la formulation des bétons de sables, en mettant en avant l'utilisation d'un sable corrigé.

Les objectifs de cette étude sont d'une part, l'évaluation de l'impact de l'intégration du sable recyclé et du sable de dunes dans la formulation du béton de sable sur les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologiques de ce dernier. En raison de la granulométrie très fine du sable de dunes, deux proportions de sable recyclé, soit 40 % et 50 %, ont été utilisées dans la correction de la granulométrie du sable de dunes.

D'autre part, l'utilisation du sable recyclé (SR) en remplacement partiel du sable alluvionnaire (SA), et de la fraction poudre fine recyclée (PFR) obtenue par tamisage du sable recyclé (SR) issu de déchets de construction et de démolition (DCD), comme remplacement du ciment Portland dans la production des composites. La fraction PFR utilisée comprend des particules d'un diamètre inférieur à 0,08 mm. Trois taux de remplacement de SR (0 %, 15 % et 25 %) et PFR (5 %, 10 % et 15 %), et des rapports E/C de 0.53 et 0.59 sont utilisés dans la formulation des bétons.

Les résultats obtenus montrent une amélioration significative des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques pour les bétons réalisés avec l'incorporation de 40 % et 50 % SR et ceux réalisés avec 75 % SA et 25 % SR. Les meilleurs résultats sont remportés par le béton réalisé par les proportions de 40 % SR et 60 % SD.

Par ailleurs, en ce qui concerne le retrait, l'incorporation de SR à raison de 15 % et 25 % et de PFR avec 5 % et 10 %, a exercé un effet positif sur les bétons examinés. Ces résultats incitent fortement à considérer l'utilisation du PFR dans la production de produits cimentaires.

Mots clés

Sable de dunes, Sable recyclé, Sable alluvionnaire, Correction granulométrique, Valorisation, Déchets de construction, Déchets de démolition, Propriétés physiques, Propriétés mécaniques, Retrait.

Abstract

This study focuses on the use of dune sand and recycled aggregates in the formulation of mortars, with emphasis on the use of corrected sand.

The objectives of this study are, on the one hand, to assess the impact of incorporating recycled sand and dune sand in the formulation of sand concrete on the physical, mechanical and rheological properties of the sand concrete. Due to the very fine grading of dune sand, two proportions of recycled sand, 40% and 50%, were used to correct the grading of dune sand.

Secondly, the use of recycled sand (RS) as a partial replacement for alluvial sand (AS), and of the recycled fine powder fraction (RFP) obtained by sieving recycled sand (RS) from construction and demolition waste (CDW), as a replacement for Portland cement in the production of composites. The RFP fraction used comprises particles with a diameter of less than 0.08 mm. Three replacement rates of RS (0%, 15% and 25%) and RFP (5%, 10% and 15%), and W/C ratios of 0.53 and 0.59 are used in the concrete formulation.

The results obtained show a significant improvement in physical, mechanical and rheological properties for concretes made with the incorporation of 40% and 50% RS and those made with 75% AS and 25% RS. The best results were achieved by the concrete made with proportions of 40% RS and 60% DS.

Furthermore, with regard to shrinkage, the incorporation of RS at 15% and 25% and RFP at 5% and 10% had a positive effect on the mortars examined. These results provide a strong incentive to consider the use of RFP in the production of cementitious products.

Keywords

Dune sand, Recycled sand, Alluvial sand, Grading correction, Valorization, Construction waste, Demolition waste, Physical properties, Mechanical properties, Shrinkage.

ملخص

تركز هذه الدراسة على استخدام رمل الكثبان الرملية والركام المعاد تدويره في تحضير خلطة الملاط، مع التركيز على استخدام الرمل المصحح.

تتمثل أهداف هذه الدراسة، من ناحية، في تقييم تأثير دمج الرمل المعاد تدويره ورمل الكثبان الرملية في تحضير الخرسانة الرملية على الخواص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية لهذه الأخيرة. نظرًا للتدرج الحبيبي الناعم جدًا لرمل الكثبان ، تم استخدام نسبتيين من الرمال المعاد تدويرها، 40% و50%، لتصحيح تدرجات رمل الكثبان الرملية.

ثانيًا، استخدام الرمل المعاد تدويره (SR) كبديل جزئي للرمل الغريني (SA) ، وكذلك استخدام المسحوق الناعم المعاد تدويره (PFR) الذي تم الحصول عليه عن طريق غربلة الرمل المعاد تدويره (SR) من مخلفات البناء والهدم (DCD)، كبديل للأسمنت البورتلاندي في إنتاج رابط هيدروليكي. يتكون جزء PFR المستخدم من جسيمات يقل قطرها عن 0.08 مم. تم استخدام ثلاثة معدلات استبدال من SR (0% و15% و25%) و PFR (5% و10% و15%)، و استعملت نسبتيين من الماء الى الاسمنت 0.53 و0.59 في تحضير الخلطة الخرسانية.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تحسناً كبيراً في الخواص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للخرسانة المصنوعة من 40% و50% للرمل المعاد تدويره وكذلك 75% رمل غريني و25% رمل معاد تدويره، تم تحقيق أفضل النتائج في الخرسانة المصنوعة بنسب 60% رمل غريني و40% رمل الكثبان.

وعلاوة على ذلك، فيما يتعلق بالانكماش، كان لدمج SR بنسبة 15% و25% و PFR بنسبة 5% و10% تأثير إيجابي على خصائص الملاط الذي تم فحصه. توفر هذه النتائج حافزاً قوياً للنظر في استخدام PFR في إنتاج المنتجات الأسمنتية.

الكلمات المفتاحية

رمل الكثبان ، الرمل المعاد تدويره، الرمل الغريني، تصحيح التدرج الحبيبي، التثمين، مخلفات البناء، مخلفات الهدم، الخواص الفيزيائية، الخواص الميكانيكية، الانكماش.

Listes des abréviations, des figures et des tableaux

Liste d'abréviation

SD	Sable de dunes
SR	Sable recyclé
SA	Sable alluvionnaire
PFR	Poudre de fine recyclée
GBR	Granulats de béton recyclé
AFR	Agrégats fins recyclés
MSD	Béton de sable formulé avec 100% sable de dunes
MSDC I	Béton de sable formulé avec 60% sable de dunes+40% sable recyclé
MSDC II	Béton de sable formulé avec 50% sable de dunes+50% sable recyclé
MSR	Béton de sable formulé avec 100% sable recyclé
M-SAF0	Béton de sable formulé avec 100% sable alluvionnaire
M1-SASR	Béton de sable formulé avec 85% sable alluvionnaire +15% sable recyclé
M2-SASR	Béton de sable formulé avec 75% sable alluvionnaire +25% sable recyclé
M-SAFx	Béton de sable alluvionnaire à un dosage x % de PFR
M1-SASRFx	Béton de sable formulé avec 85% SA +15% SR à un dosage x % de PFR
M2-SASRFx	Béton de sable formulé avec 75% SA +25% SR à un dosage x % de PFR
MEB	Microscope Électronique à Balayage
EDS	Spectromètre de dispersion d'énergie
E/C	Eau/Ciment
ES	Equivalent de sable
Mf	Module de finesse

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Mouvement du sable par suspension, saltation et fluage	11
Figure I.2. Types de dunes de sable : barkhane (A), longitudinale (B), transversale (C), parabolique (D), barkhanoïde (E) et étoile (F).	12

Chapitre II

Figure II.1: Granulats recyclés.	17
Figure II.2. Total des déchets générés dans l'Union européenne selon : (a) Activité économique ; (b) Catégorie de déchet.	19
Figure II.3. Composition des déchets de construction et de démolition	21
Figure II.4. L'impact de l'extraction intensive de sable et du dragage sur le canal qui relie le lac Poyang au fleuve Yangtze .	21
Figure II.5. Usine de recyclage	26
Figure II.6. Mélange de matériaux concassés provenant d'une construction de bâtiment selon QLDRecycling	27
Figure II.7. Station de prélèvement	28
Figure II.8. Lames d'air	29
Figure II.9. Tamis à vent	29
Figure II.10. Dépistage	30
Figure II.11. Agrégat naturel calibré de 20 mm et agrégat recyclé.	30
Figure II.12. Structure de remplacement complet des granulats fins et grossiers d'origine naturelle (GN) par des granulats recyclés fins et grossiers (GR) et leurs zones de transition.	33
Figure II.12. Effect of replacing different incorporation ratios and types of fine GR content	33
Figure II.13. Relation entre le béton AFR et l'affaissement pour un rapport E/C similaire.	34
Figure II.14. Effet de l'incorporation d'AFR dans le béton sur la résistance à la compression en fonction du temps.	35

Chapitre III

Figure III.1 : (a,b et c) sables utilisés	41
---	----

Figure III.2 (a) Poudre fine utilisée	42
Figure III.2 (b) Image MEB de PFR	42
Figure III.3. Procédures de préparation de granulats recyclés (sable et fines)	45
Figure III.4. Eprouvettes des mélanges préparés.	49
Figure III.5 : Maniabilimètre	51
Figure III.6 : Dispositif de rupture en compression	52
Figure III.7 : L'appareil pour l'essai de flexion (3 points).	52
Figure III.8: Rétractomètre	53

Chapitre IV

Figure IV.1. Distribution granulométrique des sables utilisés	57
Figure IV.2 : Image micrographique électronique à balayage du sable de dunes	58
Figure IV.3 (a,b et c) : Images micrographique électronique à balayage du sable recyclé	58
Figure IV.4. EDS du sable de dunes	59
Figure IV.4 (a) EDS du sable de dunes pour le point 1	59
Figure IV.4 (b) EDS du sable de dunes pour le point 3	60
Figure IV.5. EDS du sable recyclé	60
Figure IV.5 (a) EDS du sable recyclé Point 2	61
Figure IV.5 (b) EDS du sable recyclé Point 4	61
Figure IV.6. Temps d'écoulement LCPC des bétons de sable en fonction du rapport E/C.	62
Figure. VI.7. Résistance à la compression des mélanges MSDC I, MSDC II, MSD et MSR.	65
Figure. IV.8. Résistance à la flexion des mélanges MSDC I et MSDC II, MSD et MSR.	66
Figure IV.9. Densité et porosité en fonction de l'âge des bétons MSDC I, MSDC II, MSD et MSR.	67
Figure IV.10. Perte de poids en fonction de l'âge pour les mélanges MSDC I, MSDC II, MSD et MSR	68
Figure IV.11. Retrait en fonction de l'âge des mélanges MSDC I, MSDC II, MSD et MSR	69
Figure IV.12 (a,b et c) Image par MEB du mélanges MSDC I	70
Figure IV.13 (a et b) Image par MEB du mélange MSDC II	71

Figure IV.14 (a et b) Image par MEB du mélange MSD	71
Figure IV.15 (a,b,c et d) Image par MEB du mélange MSR.	72
Figure IV.16. Distribution granulométrique des sables utilisés	75
Figure IV.17. EDS des PFR	74
Figure IV.17(a) EDS des PFR pour le point 2	75
Figure IV.17(b) EDS des PFR pour le point 3	75
Figure IV.18 (a,b,c et d). Images MEB par le mode électron rétrodiffusé et les analyses EDS des PFR	76
Figure IV.19. Temps d'écoulement en (s) LCPC des bétons de sable en fonction du E/C	78
Figure IV.20. Résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons (sans ajout de PFR) M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.	80
Figure IV.21 (a,b,c et d). Résistance à la compression des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.	82
Figure IV.22. Résistance à la flexion en fonction de l'âge des bétons de sable (Sans ajout de PFR) M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.	83
Figure IV.23 (a,b,c et d) Résistance à la flexion des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.	85
Figure IV.24. Perte en poids en fonction de l'âge des bétons de sable sans ajout de PFR M-SAF0,M1-SASRF0 et M2-SASRF0.	87
Figure IV.25 (a,b,c et d) Perte en poids des mélanges avec et sans ajout de PFR en fonction du temps.	89
Figure. IV.26. Densité et porosité en fonction de l'âge des bétons de sable M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0	90
Figure IV.27 (a, b et c). Densité et porosité des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.	93
Figure IV.28. Retrait de séchage en fonction de l'âge des bétons de sable (sans ajout de PFR) M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.	94
Figure IV.29 (a,b,c et d) Retrait de séchage des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.	97

Liste des Tableaux

Chapitre III

Tableau III.1. Analyse chimique du ciment	42
---	----

Tableau III.2. Caractéristiques physiques du ciment	42
Tableau III.3. Composition minéralogique du clinker (Bogue) (%).	42
Tableau III.4. Densité absolue et surface spécifique du PFR et du CPJ-CEM II utilisés	43
Tableau III.5 : Composition chimique de l'eau	43
Tableau III.6. Essais de caractérisation des sables	47
Tableau III.7. Essais de caractérisation des fines	47
Tableau III.8. Proportions des mélanges pour 1 m ³	49

Chapitre IV

Tableau IV.1. Propriétés physiques des sables utilisés.	57
Tableau IV.2 (a) Résultats quantitatifs des composants du sable de dunes pour le point 1	59
Tableau IV.2b. Résultats quantitatifs des composants du SD pour le point 3	60
Tableau IV.3 (a) Résultats quantitatifs des composants du sable recyclé pour le point2	61
Tableau IV.3 (b) Résultats quantitatifs des composants du sable recyclé pour le point4	61
Tableau IV.4. Propriétés physiques des sables utilisés	72
Tableau IV.5. Densité absolue et surface spécifique du PFR et du CPJ-CEM II utilisés.	73
Tableau IV.6 (a). Résultats des quantités des composants pour le point 2	75
Tableau IV.6 (b). Résultats des quantités des composants pour le point 2	76

Table des matières

Table des matières

Remerciements

Résumés

Liste des abréviations, des figures, des tableaux et des photos

Table des matières

Introduction générale 2

Chapitre I. Généralités sur les sables et sables de dunes

I.1. Introduction 7

I.2. Les sables 7

I.2.1. Classification des sables 8

I.2.1.1. Granulométrie 8

I.2.1.2. Propreté 8

I.2.1.3. Nature minéralogique 8

I.2.2. Les types de sables selon leurs provenances 9

I.2.3. Utilisations et importance des sables 9

I.3. Les sables de dunes 10

I.3.1. Définition 10

I.3.2. Nature du sable de dunes 10

I.3.2.1. Mécanismes de formation 10

I.3.2.2. Mobilisation du sable de dunes 10

I.3.3. Types des dunes de sable 11

I.3.4. Utilisation du sable de dunes dans la fabrication du mortier et béton 13

I.4. Conclusion 15

Chapitre II. Généralités sur les granulats recyclés

II.1. Introduction 17

II.2. Historique 17

II.3. Contexte 18

II.4. Définition 19

II.5. Avantages et obstacles de l'utilisation de granulats fins recyclés (sable recyclé) 20

dans les bétons et les mortiers

II.5.1. Les avantages 20

II.5.1.1. Réduction du CO ₂	20
II.5.1.2. Enfouissement des déchets	20
II.5.1.3. Rareté des matières premières	21
II.5.1.4. Coûts	22
II.5.2. Les obstacles de l'utilisation de sable recyclé (SR)	22
a) Variations des propriétés de SR	22
b) Normes	23
c) Recherche vs. Pratique	23
II.6. Utilisation de granulats recyclés dans la construction	23
II.7. Déchets industriels utilisés dans la fabrication du béton	24
II.8. Classement les granulats recyclés	25
II.8.1 Granulats de Béton Recyclés (GBR)	25
II.8.2. Granulats de Maçonnerie Recyclés (GMR)	25
II.8.3. Granulats Mixtes Recyclés (GMR)	25
II.8.4. Granulats Recyclés de Construction et Démolition (GRCD)	26
II.9. Production de granulats recyclés	26
II.9.1. Origines des matériaux dans la fabrication des agrégats recyclés : Une exploration des sources durables	27
II.9.2. Transport et collecte	27
II.9.3. Le processus de création d'agrégats recyclés	28
II.9.3.1. Pré-tri du matériel source	28
II.9.3.2. Usine de concassage primaire	28
II.9.3.3 Usine de concassage secondaire	28
II.9.4. Étude comparative entre les agrégats recyclés et les agrégats naturel	30
II.9.4.1. Texture de surface des particules	30
II.9.4.2. Qualité	31
II.9.4.3. Densité des particules	31
II.9.4.4. Résistance globale	31
II.10. Paramètres généraux affectant les performances de AFR dans le béton	31
II.10.1. Processus de recyclage	31
II.10.2. La taille des particules	32
II.10.3. Qualité du matériel source	33
II.11. L'effet de la variation du ratio d'incorporation de AFR sur la performance du	34

béton	
II.11.1. Maniabilité	34
II.11.2. Densité fraîche en vrac	35
II.11.3. Résistance à la compression	35
II.11.4. Influence de AFR sur le retrait et la perte en poids	36
II.12. Utilisation de AFR pré-humidifié comme réservoir interne pour fournir de l'eau	36
II.13. Utilisations des fines recyclées dans les matériaux cimentaires	37
II.14. Conclusion	37

Chapitre III. Matériels et méthodes

III.1. Introduction	40
III.2. Enquête préliminaire et choix des matériaux	40
III.3. Matériaux utilisés	40
III.3.1. Sables	41
III.3.2. Ciment	41
III.3.3. La poudre fine de béton recyclé	42
III.3.4. Eau de gâchage	43
III.4. Méthodes expérimentales	43
III.4.1. Mode de fabrication de sable recyclé et poudre des fines recyclées	43
III.4.2. Méthodes utilisées dans la caractérisation des matériaux	46
III.4.2.1. Sable	46
III.4.2.1.1. Masses volumiques	46
III.4.2.1.2. Module de finesse	46
III.4.2.1.2. Equivalent de sable (propreté)	46
III.4.2.1.3. Absorption d'eau	46
III.4.2.1.5. Microscopie électronique à balayage (MEB)	46
III.4.2.2. Caractérisation physique des fines	47
III.4.2.2.1. Mesure de la masse volumique absolue	47
III.4.2.2.2. Mesure de la surface spécifique Blaine	47
III.4.2.3. Caractérisation chimique	47
III.4.3. Formulation et confection des éprouvettes	47
III.4.3.1. Les mortiers de sable de dunes	48
III.4.3.2. Les mortiers de sable alluvionnaire	50
III.4.4. Caractérisation du mortier à l'état frais	50

III.4.4.1. Essai d'ouvrabilité	50
III.4.5. Caractérisation du béton à l'état durcis	50
III.4.5.1. Essai de résistance à la compression	50
III.4.5.2. Essai de traction par flexion	51
III.4.5.3. Essai de retrait	52
III.4.5.4. Densité et porosité par absorption d'eau des bétons	52
III.4.5.5. Microscopie électronique à balayage (MEB)	52
III.5. Conclusion	53

Chapitre IV. Résultats et discussion

IV.1. Introduction	55
IV.2. Propriétés des sables utilisés	55
IV.2.1. Propriétés physiques	55
IV.2.2. Propriétés morphologiques	57
IV.3. Propriétés des bétons de sable de dunes à l'état frais	62
IV.3.1. Consistance des bétons de sable frais	62
IV.2.3. Propriétés mécaniques des bétons de sable de dunes	63
IV.2.3.1. Résistance à la compression	63
IV.2.3.2. Résistance à la flexion	65
IV.2.4. Propriétés physiques des bétons de sable de dunes	66
IV.2.4.1. Porosité et densité apparente	66
IV.2.4.2. Perte en poids	68
IV.2.5. Propriétés rhéologiques des bétons de sable de dunes (retrait de séchage)	69
IV.2.6. Observations par MEB des bétons de sable étudiés	70
IV.3. Etude de l'effet de sable recyclé et poudre des fines de granulats recyclés sur les propriétés du mortier de sable alluvionnaire	72
IV.3.1. Propriétés physiques des sables utilisés	72
IV.3.2. Propriétés de poudre des fines	73
IV.3.2.1. Propriétés physiques	73
IV.3.2.2. Caractéristiques chimiques	74
IV.3.3. Propriétés des bétons de sable alluvionnaire avec et sans SR et PFR à l'état frais	77
IV.3.3.1. Consistance des bétons de sable frais	77
IV.3.4. Caractéristiques des mortiers de sable alluvionnaire avec et sans SR et PFR	79

à l'état durcis	
IV.3.4.1. Résistance à la compression	79
IV.3.4.1.1. Résistance à la compression des témoins	79
IV.3.4.1.2. Résistance à la compression des bétons de sable avec et sans PFR	80
IV.3.4.2. Résistance à la flexion	83
IV.3.4.2.1. Résistance à la flexion des mortiers témoins	83
IV.3.4.2.2. Résistance à la flexion des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR	84
IV.3.4.3. Perte en poids	86
IV.3.4.3.1. Perte en poids des bétons de sable témoins	86
IV.3.4.3.2. Perte en poids des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR	87
IV.3.4.4. Densité apparente sèche et porosité des bétons de sable	90
IV.3.4.4.1. Densité apparente sèche et porosité des bétons de sable alluvionnaire témoins	90
IV.3.4.4.1. Densité apparente sèche et porosité des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR	91
IV.3.4.5. Retrait de séchage des bétons de sable alluvionnaire	94
IV.3.4.5.1. Retrait de séchage des bétons de sable alluvionnaire témoins	94
IV.3.4.5.2. Retrait de séchage des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR	95
IV.3. Conclusion	98
Conclusion générale	100
Références bibliographiques	103
Annexes	115

Introduction générale

Introduction générale

Selon les estimations [1], le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde au cours des dernières décennies, et sa consommation devrait augmenter considérablement avec l'urbanisation croissante. Cependant, cette expansion urbaine pose des défis environnementaux liés à la préservation des ressources naturelles, notamment en raison de la production importante de déchets par le secteur de la construction et de la démolition (C&D) de l'industrie du génie civil.

Plus de 500 millions de tonnes de déchets de construction sont générées chaque année en Europe, environ 300 millions de tonnes de déchets de béton aux États-Unis, environ 80 millions de tonnes de déchets de béton en Chine [2] et 70 millions de tonnes de déchets de béton au Brésil [3] se produit. Les coûts de stockage sont très variables en France et les taux de recyclage restent faibles. Au Royaume-Uni, le coût moyen d'une mise en décharge est estimé à 15 £ par tonne (environ 18,8 €/tonne), ce qui équivaut à un coût total pour l'industrie du ciment de 11,25 millions de £/an (environ 15,5 millions d'euros/an). [4], la situation a été encore exacerbée par la hausse des prix de l'énergie.

En Algérie, avec le développement croissant de la filière bâtiment et travaux publique (BTP) ces dernières années et la multiplication des chantiers de construction et de démolition sur des sites inappropriés, la filière BTP est devenue la principale source de déchets. En 2016, les estimations indiquent une production de 11 millions de tonnes de déchets de construction. Chaque activité de construction ou de démolition impacte l'environnement à travers l'utilisation de matériaux, la génération de déchets, les émissions de polluants dans l'air et l'eau, ainsi que les besoins énergétiques des bâtiments et des espaces associés.

Dans le cadre de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée des Déchets (SNGID) à l'horizon 2035, l'État algérien vise à réduire l'impact environnemental des déchets inertes en promouvant des mesures d'économie d'énergie et l'utilisation de matériaux renouvelables. Actuellement, les déchets de construction et de démolition (DCD) sont principalement éliminés dans des décharges, posant de graves risques environnementaux. Il devient impératif d'envisager le recyclage et la réutilisation de ces produits pour assurer la protection de l'environnement à long terme.

Alors que le recyclage est souvent cité comme le meilleur moyen de gérer le DCD.

En Algérie, d'importantes quantités de sable roulé siliceux alluvionnaire sont traditionnellement utilisées dans la fabrication de bétons et de mortiers. Cependant, les extractions excessives de ces sables ont eu des conséquences néfastes, contribuant fortement à l'épuisement des ressources et entraînant des répercussions dommageables sur l'environnement. Cette problématique n'est pas unique à l'Algérie, de nombreuses régions du monde font face à des défis similaires et cherchent actuellement des matériaux de substitution pour répondre à la demande croissante en granulats pour le béton et le mortier.

Un autre type de sable, abondant localement et exempt de problématiques environnementales significatives, est le sable de dune. Bien que largement disponible, il demeure relativement méconnu dans le secteur de la construction. Avec des quantités estimées en milliards de mètres cubes, ce sable est présent sur près de 60% du territoire algérien. Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques suggèrent qu'il pourrait être adopté comme matériau de construction, établissant ainsi un équilibre entre les impératifs de préservation de l'environnement et les considérations économiques et sociales.

L'utilisation du mortier à base de sable de dunes présente divers avantages, en particulier d'un point de vue environnemental. Un intérêt croissant [5-6] se manifeste pour l'utilisation du sable de dunes dans la formulation du béton. Cependant, son utilisation pose des défis en raison de sa granulométrie très fine, ayant des impacts sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton. Des études similaires ont révélé que cette finesse induit des résistances mécaniques réduites et un retrait important.

Lors de l'incorporation de granulats de béton recyclés (GBR) provenant de gravats de maçonnerie ou de matériaux à base d'asphalte, une diminution des performances mécaniques est généralement observée [8, 9, 10]. Cependant, des améliorations ont été constatées avec l'utilisation de GBR provenant de béton concassé [11-19], expliquées par les propriétés auto-cimentantes du ciment non hydraté des particules de béton concassées et une surface plus rugueuse, augmentant le frottement inter-particulaire. Une étude de référence [4] indique que le gravier recyclé peut être utilisé efficacement dans la fabrication du béton, à condition de gérer adéquatement les niveaux d'absorption et de saturation de ces agrégats. En revanche, le sable recyclé présente des défis plus complexes en raison de sa teneur élevée en fines (0-63 μm), rendant difficile son contrôle dans la production de béton à l'échelle industrielle. Cette complexité souligne les difficultés d'incorporer du sable recyclé à des taux égaux ou supérieurs à 30% en masse [20]. Pour résoudre ce problème, plusieurs solutions sont

envisageables, telles que le criblage de la partie fine du sable recyclé ou une gestion précise de l'adjuvantation.

En parallèle au problème de la génération de déchets de construction et de démolition, l'impact environnemental de la fabrication de clinker, en raison des fortes émissions de CO₂ [21], pose une préoccupation majeure. Chaque tonne de clinker utilisée dans la production de ciment entraîne l'émission d'environ une tonne de CO₂ dans l'atmosphère [22]. Diverses études indiquent que l'industrie du ciment est responsable d'environ 75% des émissions mondiales de CO₂ [22-24]. Une alternative visant à réduire ces émissions consiste à intégrer des matériaux alternatifs en substitution partielle au clinker, en plus d'améliorer son utilisation dans le ciment Portland [25].

Peu d'études dans la littérature se sont intéressées à l'utilisation des fines de sable recyclé issues de déchets de béton démolis en remplacement du ciment. La majorité des travaux se concentrent sur le remplacement des granulats fins ou grossiers.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

Évaluer les matériaux locaux, en l'occurrence le sable des dunes et les déchets industriels issus de la démolition des bétons. Cela implique d'ajouter des fines de sable recyclé en substitution dans le béton de sable de dunes pour améliorer ses caractéristiques physico-mécaniques et rhéologiques.

Aspirer à produire un nouveau ciment uniquement à partir du traitement physique des fines de sable recyclé (récupération des fines par tamisage). Ceci se ferait en utilisant la partie fine du sable recyclé (< 0,08 mm) en substitution du ciment dans le mortier à base de sable alluvionnaire. Dans le contexte de l'économie circulaire, cette recherche vise à être une solution efficace pour minimiser les problèmes liés aux émissions de CO₂ pendant la production de ciment, ainsi que les difficultés d'élimination et de stockage des déchets de construction et de démolition (DCD).

La thèse est structurée en quatre chapitres, débutant par une introduction générale et se concluant par une conclusion générale.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les différents types de sables.

Le second chapitre offre une synthèse bibliographique sur les granulats recyclés et leurs utilisations dans le domaine de la construction. Il englobe également une synthèse des recherches réalisées sur les effets des granulats recyclés sur les propriétés des mortiers et des bétons.

Le troisième chapitre présente la caractérisation des matériaux (sables, ciment, fines recyclées) utilisés dans cette thèse, ainsi que les protocoles expérimentaux des essais réalisés. Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sables utilisés et des fines sont détaillées, tout comme les protocoles normalisés employés pour évaluer les différentes propriétés du béton.

Le quatrième chapitre se consacre à l'exposition de l'évolution des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques du béton de sable de dunes et du béton de sable alluvionnaire induites par l'incorporation du sable recyclé et des fines recyclées, en fonction du pourcentage de substitution et du temps de durcissement. Une synthèse des résultats obtenus après 6 mois pour les deux types de déchets (sable et fines) est présentée, permettant une évaluation de l'efficacité de cette approche dans l'utilisation des déchets de construction.

En conclusion, une synthèse générale met en lumière les principaux résultats issus de ce travail de thèse, suivie de quelques propositions de perspectives de recherche.

Chapitre I
Généralités sur les sables
et sables de dunes

Généralités sur les sables et les sables de dunes

I.1. Introduction

Le granulats fin représente un ingrédient essentiel dans la production de mortier et de béton [26]. La quantité et le type de sable inclus dans un mélange de béton déterminent ses caractéristiques. Ils exercent une influence significative sur des aspects tels que la fluidité, la résistance aux conditions environnementales, la force et le retrait de séchage du béton. Le sable, constituant une part plus importante du mélange que le ciment, remplit les pores du matériau, formant une masse de particules capable de résister aux contraintes appliquées. De plus, les granulats fins minimisent les variations de volume induites par les processus de prise et de durcissement, contribuant à la capacité du béton à se consolider et à fournir la résistance nécessaire. Ils sont cruciaux pour renforcer la résistance globale du béton.

Les dunes de sable sont présentes à travers le monde, notamment dans les déserts chauds, les plaines côtières et les rives des lacs, constituant des habitats uniques pour diverses formes de vie. Leur formation est un processus complexe nécessitant un abondant approvisionnement en sable fin, une énergie éolienne suffisante pour déplacer les grains de sable et une topographie permettant le dépôt des particules de sable.

Ce chapitre se divise en deux parties. La première explore les différentes propriétés des sables utilisés en génie civil, notamment leur classification, types et utilisation pour les travaux de construction. La seconde partie se concentre sur la formation, la mobilisation, la croissance et le déplacement des dunes, en plus d'aborder les types de dunes et les environnements inter-dunaires.

En conclusion, une synthèse des recherches sur l'utilisation du sable de dune dans la fabrication du béton.

I.2. Les sables

Selon la norme NF EN 12620 + A1 2008, le sable est défini comme un agrégat rocheux dont la dimension maximale (D) est inférieure ou égale à 4 mm. Bien que cette définition soit globale, les limites peuvent varier en fonction de la classification.

Dans son sens le plus courant, le terme "sable" fait référence à une roche sédimentaire meuble constituée de petites particules, généralement de taille comprise entre 0 et 5 mm, résultant de la désintégration d'autres roches. Cette définition exclut les matériaux de remblai,

tout en incluant le sable concassé. Les sables naturels, présents en abondance dans de nombreux pays avec des réserves pratiquement illimitées, sont ceux qui viennent généralement à l'esprit lorsque l'on évoque le sable.

La définition du sable est plus complexe qu'il n'y paraît, car elle varie en fonction de l'époque, du pays et de l'utilisation prévue. Les sables naturels et les sables transformés sont deux types distincts qui diffèrent à plusieurs égards. Ces matériaux sont abondants dans certaines régions et résultent d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation.

La production de sables naturels s'articule en trois étapes successives : initialement, les différentes roches se décomposent localement, puis elles sont transportées vers un gisement où elles subsistent sous différentes formes.

I.2.1. Classification des sables

Les types de sables naturels les plus courants sont souvent identifiés en fonction de leur localisation, tels que le sable de mer. Ces références géographiques ont été mentionnées par Abdeldjalil (2022) [27], ainsi que Song et al. (2022) [28].

La classification des sables peut s'effectuer en se basant sur trois paramètres, parmi lesquels :

I.2.1.1. Granulométrie

Elle permet de diviser les sables en trois catégories distinctes :

- Sable fin ;
- Sable moyen ;
- Sable grossier.

I.2.1.2. Propreté

La propreté d'un sable est une caractéristique cruciale déterminée par l'essai d'équivalent de sable, permettant d'établir des limites pour chaque type de sable.

I.2.1.3. Nature minéralogique

Les sables peuvent être classés généralement comme suit [29]:

- Sables siliceux ;
- Sables silico-calcaires ;
- Sables calcaires.

I.2.2. Les types de sables selon leurs provenances

Le sable peut être classé en fonction de son origine, soit comme sable de rivière, sable de mer, sable de carrière, sable artificiel et sable de dunes :

- Le sable de rivière, obtenu par dragage du lit des rivières, est considéré comme propre et durable, ce qui le rend approprié pour la formulation du béton ;
- Quant au sable de mer, il provient des côtes et ne doit pas être excessivement fin. Un lavage est nécessaire pour éliminer le sel avant son utilisation dans la formulation du béton ;
- Le sable de carrière doit être évité car il contient des grains d'argile qui recouvrent les grains de sable, empêchant leur adhérence aux liants ;
- Le sable artificiel, produit par le concassage de blocs de roche tels que le calcaire dur et le grès, est riche en charges. Pour son utilisation dans les mélanges de béton, le pourcentage de fines doit être réduit au minimum ;
- Le sable de dunes est un type de sable présent dans les régions sahariennes. Il est plus fin que le sable de mer et se trouve principalement dans les régions présahariennes.

I.2.3. Utilisations et importance des sables

Le sable, élément crucial du processus de sédimentation, représente une ressource précieuse du point de vue économique. Il est utilisé dans divers domaines tels que les remblais, les agrégats de béton, les matériaux de construction et le sable siliceux industriel. Ce dernier, anciennement désigné sous le terme de sable industriel, constitue la principale matière première pour l'industrie du verre, ainsi que pour la fabrication de moules et noyaux de coulée. Il trouve également des applications dans la production de céramiques et de mortiers spéciaux.

Le sable joue un rôle essentiel comme milieu naturel propice à l'accumulation de minéraux alluvionnaires lourds. Ces concentrations minérales dans le sable, appelées placers, peuvent renfermer des minéraux précieux tels que l'or, les diamants, la cassitérite (minerai d'étain), la magnétite (oxyde de fer) et l'ilménite (oxyde de fer et de titane).

Les gisements d'ilménite, également connus sous le nom de "sable noir", revêtent une importance économique significative, notamment dans la production de pigments pour peinture blanche (gisements côtiers australiens) et en tant que source de titane métallique. Le sable joue également un rôle crucial en tant que réservoir potentiel d'eau souterraine

(aquifère) ou d'hydrocarbures. Il est important de souligner que l'exploitation non réglementée du sable peut perturber l'équilibre naturel fragile, entraînant l'érosion des plages, l'épuisement des réserves naturelles de sable et la détérioration des eaux souterraines [30].

I.3. Les sables de dunes

I.3.1. Définition

Le sable des dunes résulte de l'érosion de diverses roches, du transport fluvial et parfois éolien. Principalement composé de quartz, il se distingue par une granulométrie fine et très serrée [31]. Abondant dans des régions comme le Sahara, son extraction est pratiquement gratuite, faisant de lui une solution face à l'épuisement des ressources naturelles et un matériau d'avenir [32]. Utilisé depuis longtemps dans la construction de remblais, de fondations et de projets routiers [33], le sable des dunes suscite l'intérêt de chercheurs dans divers domaines scientifiques en raison de sa propreté, de son abondance et de ses avantages économiques et environnementaux [7].

I.3.2. Nature du sable de dunes

I.3.2.1. Mécanismes de formation

Les dunes de sable, monticules formés par le vent, varient en taille de moins d'un mètre à plusieurs dizaines de mètres de haut, selon la quantité de sable disponible. Ces formations dynamiques changent d'emplacement, de longueur ou de hauteur en fonction du type de dune [33]. Les dunes de sable possèdent des caractéristiques minéralogiques et sédimentaires qui révèlent leur origine [34].

I.3.2.2. Mobilisation du sable de dunes

Le transport du sable par le vent est un processus complexe qui implique divers modes de déplacement. Les particules sont transportées par suspension, saltation et reptation. La saltation, caractérisée par le déplacement des particules sous le vent en une série de sauts ou de bonds (figure I.1), soulève généralement les particules de sable à moins d'un centimètre au-dessus du sol, à des vitesses variantes entre la moitié et le tiers de la vitesse du vent dominant. Les grains en saltation peuvent entrer en collision les uns avec les autres, certains continuant à sauter et à se déplacer. Les grains plus volumineux, trop lourds pour effectuer des sauts, peuvent également être heurtés et progresser lentement, poussés par les grains en saltation.

Le fluage de surface représente le mouvement saccadé vers l'avant de ces grains plus gros, qui ne peuvent pas être soulevés par le vent et avancent lorsqu'ils entrent en collision avec des grains plus petits (figure I.1). Le fluage de surface contribue jusqu'à 25 % du déplacement des grains dans les déserts. Le déplacement des grains de sable de petite taille peut s'effectuer de trois manières, la suspension étant l'une d'entre elles (figure I.1).

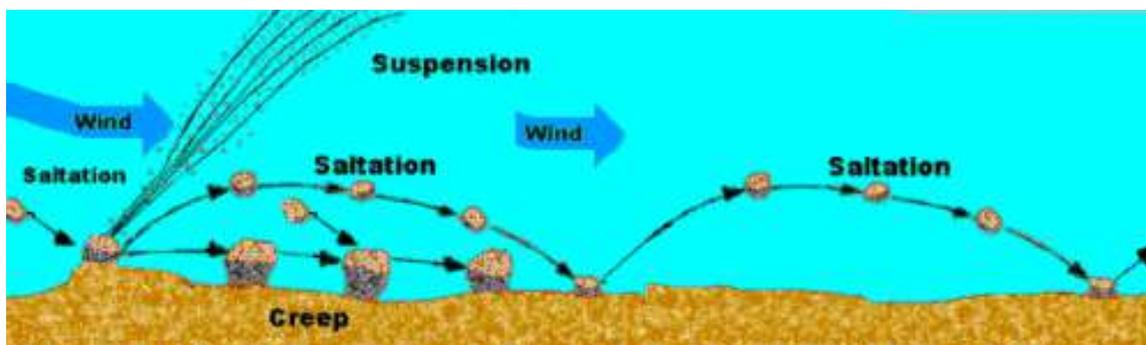


Figure I.1. Mouvement du sable par suspension, saltation et fluage [35]

Le transport du sable par le vent est influencé par divers facteurs, dont la distribution de la taille des grains, le régime des vents, la végétation et l'humidité de surface [36]. Il est crucial de comprendre la morphologie et les processus dynamiques des dunes de sable, incluant la disponibilité du sable, la végétation et les distances de transport depuis les zones d'origine [37]. La distribution de la taille des grains est un paramètre significatif dans cette compréhension. Pour atteindre l'objectif d'analyser la composition des mélanges minéraux présents dans divers environnements géologiques à l'aide de données hyper-spectrales, il est essentiel de prendre en compte la variation de la taille des grains.

Des études antérieures ont démontré que la taille moyenne des grains des dépôts de sable éolien varie spatialement en fonction de la morphologie des dunes [38]. Par exemple, selon la littérature, les crêtes de dunes peuvent parfois présenter une texture plus grossière que les flancs de dunes ou les plaines inter-dunaires [39]. Cependant, à d'autres moments, les crêtes peuvent avoir une granulométrie plus fine [40]. De plus, certaines études n'ont observé aucune différence dans la taille moyenne des grains entre les crêtes de dunes et les plaines inter-dunaires [41].

I.3.3. Types des dunes de sable

Les dunes de sable se forment lorsque toutes les conditions nécessaires sont réunies, incluant une source de sable sec, un moyen de tri et de transport du sable, ainsi qu'un site propice au dépôt du sable. La taille et la forme d'une dune sont influencées par le changement

de direction du vent au fil des saisons et par la quantité de sable disponible. Les conditions de vent exercent une forte influence sur la morphologie d'un champ de dunes, en supposant une quantité de sable équivalente. Des vents constants ont tendance à former des crêtes régulières, parfois longues, tandis que des vents irréguliers ou changeants donnent des dunes de formes plus variées [37].

Selon McKee [42], les dunes individuelles peuvent être classées en fonction du nombre et de la position des faces glissantes, le nombre de faces glissantes correspondant au nombre de directions de vent dominantes dans le régime de vent local. Les dunes de sable peuvent adopter différentes formes, telles que barkhanes, longitudinales, transversales, paraboliques, barchanoïdes et étoilées (Figure I.2).

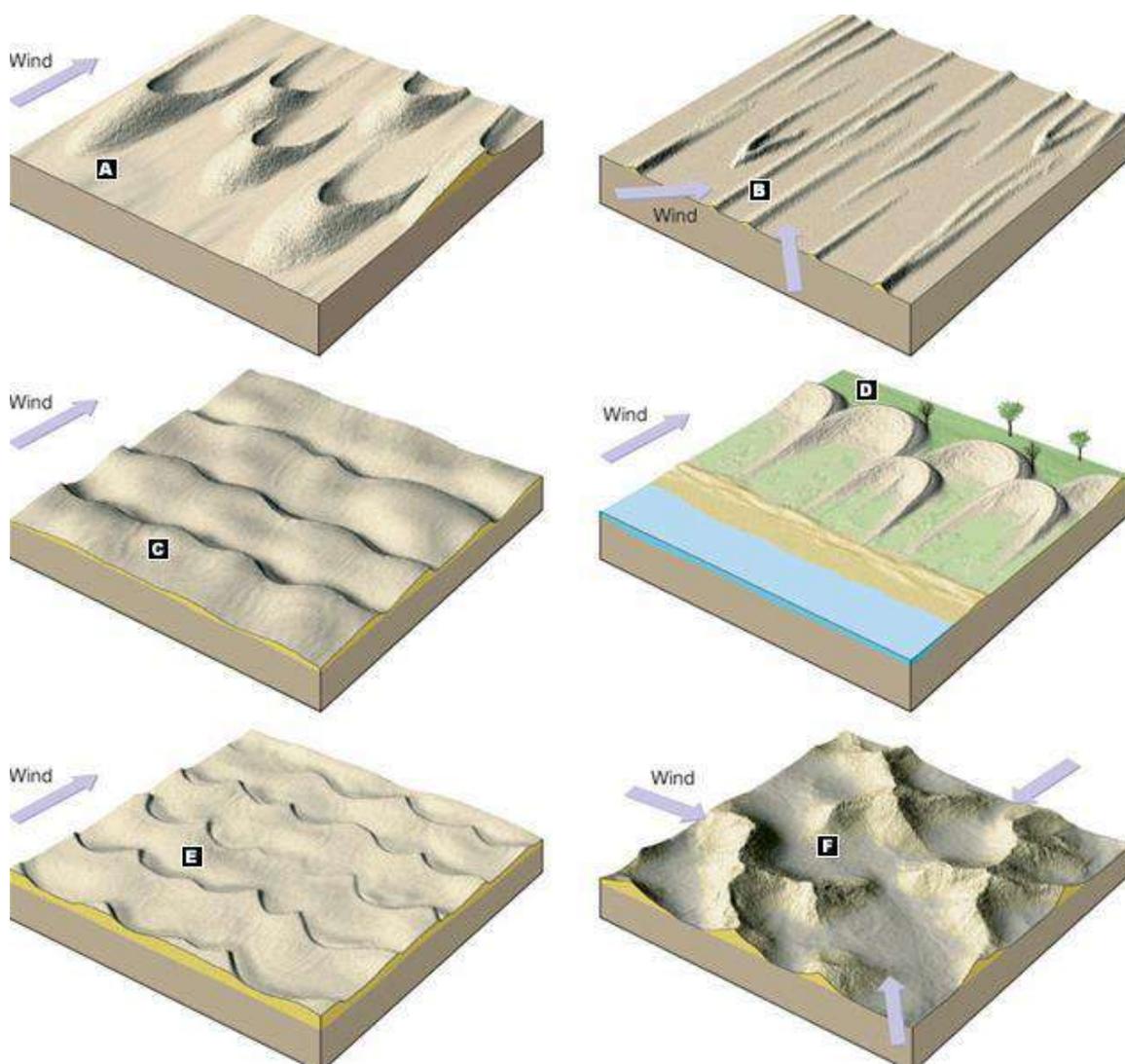


Figure I.2. Types de dunes de sable : barkhane (A), longitudinale (B), transversale (C), parabolique (D), barchanoïde (E) et étoile (F) [35].

Tsoar et al. [34] ont établi une classification des dunes de sable en trois groupes distincts : les dunes migratrices, les dunes qui s'allongent et les dunes qui s'accumulent.

Les dunes migratrices avancent sans subir de changement significatif de forme ou de taille. Ce groupe englobe les dunes transversales et les dunes en croissant, telles que les barkhanes. En revanche, les dunes qui s'allongent augmentent en longueur au fil du temps, grâce à des processus différents de ceux affectant les dunes en migration. Les dunes linéaires en sont un exemple caractéristique.

Les dunes qui s'accumulent ne présentent ni avancée ni élongation claire. Les dunes étoilées sont les représentantes les plus significatives de cette catégorie.

Il est important de noter que les dunes migratrices constituent le groupe le plus actif et peuvent entraîner des dommages substantiels aux infrastructures telles que les routes, les terres agricoles et les prairies.

I.3.4. Utilisation du sable de dunes dans la fabrication du mortier et béton

Il est largement reconnu que de nombreux projets de construction, tels que la construction de bâtiments, de canaux d'approvisionnement en eau et de plates-formes d'exploitation pétrolière, sont réalisés dans des zones désertiques. Le sable fluvial est un composant primaire crucial pour ces projets d'infrastructure en pleine expansion. Cependant, en raison de la grande distance et de la sur-utilisation du canal fluvial dans plusieurs zones désertiques, la diminution du sable fluvial et l'augmentation de la demande sont devenues des défis insurmontables.

Bien que le sable des dunes soit largement répandu dans le désert, il est rarement utilisé dans les travaux de génie civil en raison de sa forte prévalence de particules de très petite taille et de son incapacité à se conformer aux normes de classement granulométrique. Si le sable de dunes et l'argile, qui sont facilement disponibles localement, peuvent être utilisés à la place d'un agrégat fin naturel et d'un liant comme matériau de construction, cela permettrait non seulement de répondre à la demande de développement des infrastructures, mais aussi de réduire considérablement les coûts des projets de construction, ce qui rendrait les déchets rentables.

De nombreuses études ont fait état de l'utilisation du sable des dunes comme agrégat fin dans le béton, en particulier dans les régions désertiques, afin de répondre aux critères de construction technique en utilisant les ressources locales et en réduisant les coûts de transport

[43]. Par conséquent, le remplacement des granulats fins naturels et du ciment par le sable de dunes et l'argile dans la production de béton et de mortier suscite un intérêt croissant à l'échelle mondiale. Des recherches universitaires récentes ont examiné les caractéristiques du mortier et du béton. Mikael et al [44], ont étudié les caractéristiques rhéologiques du mortier, y compris le sable concassé. Ils ont également évalué l'effet du sable de rivière naturel sur les propriétés du mortier contenant des suspensions de particules grossières. Les expériences ont montré que les agrégats fins ont un impact significatif à la fois sur le besoin en eau et sur la facilité d'utilisation du mortier.

Jin et al. [43], ont étudié les caractéristiques du béton fabriqué à partir de sable de dunes provenant du terrain sablonneux de Maowusu. L'utilisation de sable de dunes dans les matériaux cimentaires a gagné en importance en raison de ses avantages environnementaux. Plusieurs études ont été menées au cours de la dernière décennie sur les propriétés du sable de dunes et la qualité des matériaux cimentaires fabriqués à partir de ce sable.

Le sable des dunes se distingue du sable ordinaire d'atelier d'usinage par sa petite taille de particules. Le taux élevé de remplacement du sable de dune par du sable de construction affecte de manière significative les différentes propriétés mécaniques des composites à base de ciment. La résistance à la compression la plus élevée a été observée pour le béton fabriqué avec un rapport sable de dunes/granulats fins de 10 % [45]. La résistance des composites à base de ciment noyés dans le sable des dunes peut être augmentée en ajoutant des fibres ultrafines [46] et des charges minérales [47] ou en contrôlant la fracture et la perméabilité au niveau macro avec des matériaux hautes performances.

Fu Jia Luo et al. [48], ont étudié l'impact des particules très fines sur la fluidité et la résistance du béton fabriqué avec du sable de dunes provenant du désert australien. Les résultats indiquent que les fibres métalliques modifient les propriétés du béton par divers mécanismes, en fonction de la concentration du rapport sable-ciment, mais n'ont pas d'effets négatifs sur la fluidité. En outre, le béton fabriqué avec du sable de dune présente une résistance comparable, voire supérieure, à celle du béton à base de granulats fins naturels.

Belferrag et al. [6], ont étudié l'amélioration de la résistance à la compression du béton dans des conditions sèches en valorisant le sable de dunes et les fibres métalliques de déchets pneumatiques. L'étude a examiné l'impact de l'ajout d'une nouvelle catégorie de fibres

métalliques issues de pneus usés sur la résistance à la compression du béton de sable de dune. Les résultats révèlent une augmentation de la capacité de compression du béton de sable de dunes renforcé de fibres métalliques par rapport au béton sans fibres.

Krobba et al. [49] ont constaté que l'ajout de microfibres naturelles affecte les caractéristiques du mortier, notamment la densité, la résistance, le retrait, l'élasticité et la force d'adhérence. Comparé au mortier fabriqué à partir de sable de plage (sans microfibres naturelles Alfa) et testé dans des circonstances identiques, les résultats ont montré que le mortier contenant des microfibres naturelles présentait de meilleures propriétés mécaniques et physiques [49].

La littérature avance l'idée que le sable des dunes pourrait être un matériau de remplacement dans la production de béton. Cependant, en raison d'une connaissance limitée, son utilisation n'est pas encore réalisable.

I.4. Conclusion

Ce chapitre a débuté en fournissant des informations générales sur le sable, qui constitue l'élément central du mortier. Nous avons ensuite dirigé notre attention vers les sables dunaires, explorant leur processus de formation, leurs divers types et leurs caractéristiques distinctives. Enfin, nous avons examiné certaines études scientifiques qui mettent en lumière la valorisation de ces sables dunaires et les bénéfices associés à leur intégration dans la production de mortiers et de bétons, en considérant les aspects techniques, économiques et écologiques.

Chapitre II

Généralités sur les granulats recyclé

Généralités sur les granulats recyclés

II.1. Introduction

Le recyclage est l'acte de traiter les matériaux usagés en vue de les réutiliser dans la création d'un nouveau produit. L'utilisation croissante des granulats naturels accompagne les progrès dans le domaine des infrastructures. Afin de diminuer la dépendance envers les granulats naturels, les granulats recyclés peuvent être employés en tant que matériaux de substitution. Les granulats recyclés (figure II.1) se composent de particules inorganiques broyées, classées et traitées à partir de matériaux ayant servi dans la construction ainsi que de débris de démolition. Ces matériaux proviennent généralement de bâtiments, de routes, de ponts, et parfois même de catastrophes telles que des guerres et des tremblements de terre.



Figure II.1: Granulats recyclés.

II.2. Historique

Les applications des granulats recyclés dans les zones de construction sont vastes et existent depuis longtemps. Wilmot et Vorobieff [50] ont indiqué que les granulats recyclés étaient utilisés dans la construction routière depuis 100 ans en Australie. Ils ont également souligné que l'utilisation de matériaux recyclés en tant qu'agrégats pour la construction et la réhabilitation des routes au niveau du gouvernement local a considérablement augmenté au cours des dernières années.

Les pierres provenant des routes anciennes ont été réutilisées lors de la reconstruction de leur réseau routier bien établi. Ils ont également noté que depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'industrie du recyclage s'était bien implantée en Europe.

II.3. Contexte

Le marché mondial des granulats de construction devrait augmenter de 5,2 %, et cette tendance devrait se maintenir, atteignant jusqu'à 48,3 milliards de tonnes [51]. Aux États-Unis, l'Agence de Protection de l'Environnement [52] a estimé que la génération de débris provenant de la construction, de la démolition et de la rénovation des bâtiments résidentiels et non résidentiels en 2003 s'élevait à environ 170 millions de tonnes. Selon Eurostat [53], la quantité totale de déchets générés dans l'Union européenne en 2010 était de plus de 2,5 milliards de tonnes, dont près de 35 % (860 millions de tonnes) provenaient de la construction et des activités de démolition, et 27 % (672 millions de tonnes) appartenaient aux activités d'exploitation minière et de carrière.

En 2010, ces deux secteurs économiques ont généré plus de déchets que tout autre (figure 1a). Parmi l'ensemble des déchets générés par les activités de construction et de démolition, ainsi que les activités d'exploitation minière et de carrière, 97 % étaient des déchets minéraux ou des sols (terres excavées, déchets de construction routière, débris de démolition, déblais de dragage, stériles, résidus, et autres). La part de déchets minéraux et solidifiés par rapport à la quantité totale de déchets produits était de 76 % (Figure 1b).

Bien que le recyclage soit souvent cité comme le meilleur moyen de gérer les DCD, plusieurs obstacles persistent quant à l'utilisation des granulats recyclés (GR) dans la construction :

- Manque de confiance des clients et des entrepreneurs ;
- Incertitude quant à ses bénéfices environnementaux ;
- Absence de normes et de spécifications auxquelles les producteurs de béton peuvent se conformer ;
- Faible qualité du produit final, due au manque de connaissances et/ou d'intérêt des propriétaires d'usines de recyclage de DCD ;
- Distance entre les chantiers de construction et de démolition et les usines de recyclage;
- Absence d'un approvisionnement constant en GR de bonne qualité pour répondre à la demande existante.

Dans l'espoir de stimuler et de promouvoir l'utilisation des GR, les agences gouvernementales du monde entier ont souvent introduit des taxes et des lois pour tenter de surmonter ces obstacles, avec plus ou moins de succès. La directive européenne n° 2008/98/CE [54] encourage la réutilisation et le recyclage des déchets. Les nouvelles structures de bâtiments comprennent au moins 5 % de matériaux recyclés. Ces matériaux

incluent le papier, le métal, le plastique et le verre, provenant des ménages ou d'autres sources dont le flux de déchets est similaire à celui des ménages, ainsi que les DCD non dangereux. La variabilité des méthodes de construction des bâtiments signifie naturellement que les GR issus des activités de construction et de démolition varieront en qualité et en composition, produisant indubitablement de nouveaux matériaux de construction de qualité variable.

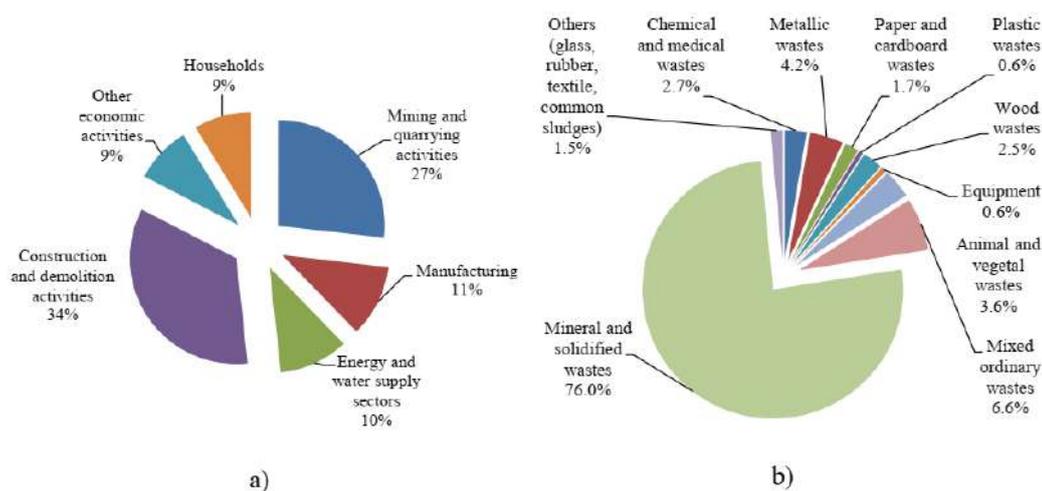


Figure II.2. Total des déchets générés dans l'Union européenne selon : (a) Activité économique ; (b) Catégorie de déchet [53]

II.4. Définition

Les agrégats recyclés désignent le béton de ciment concassé ou la chaussée en asphalte issus de débris de construction, qui sont ensuite réutilisés dans d'autres projets de construction.

Le revêtement d'asphalte peut être récupéré sur les routes, les parkings et les pistes, tandis que le béton de ciment peut être collecté sur les ponts, les trottoirs et les routes. Après collecte et traitement, ces granulats recyclés peuvent être utilisés dans la construction de pistes cyclables, d'accotements de chaussée et dans de nombreux autres aspects de la construction.

L'utilisation de matériaux recyclés dans la construction est une approche durable dans l'industrie de la construction. Elle présente de nombreux avantages, tels que la réduction du besoin d'agrégats vierges, la diminution de la consommation d'énergie, la réduction des déchets dirigés vers la décharge, et la diminution des émissions. Non seulement c'est une excellente option sur le plan environnemental, mais l'utilisation de granulats recyclés permet également de réaliser des économies et peut contribuer à l'obtention de crédits en vue d'une certification environnementale.

II.5. Avantages et obstacles de l'utilisation de granulats fins recyclés (sable recyclé) dans les bétons et les mortiers

II.5.1. Les avantages

II.5.1.1. Réduction du CO₂

Au cours de la dernière décennie, la prise de conscience des conséquences du changement climatique a atteint un niveau élevé parmi la population mondiale. Dans les décennies à venir, des facteurs tels que la croissance démographique, l'expansion des infrastructures (particulièrement dans les pays en développement confrontés à un manque d'infrastructures), l'accumulation des déchets et l'augmentation du nombre de structures devant être démolies (dans les grands pays industrialisés) constitueront les principaux moteurs de la recherche dans le domaine des matières premières alternatives et des nouvelles techniques de construction.

Il est crucial de garantir que de nouveaux matériaux, tels que les matériaux recyclés, contribuent à la durabilité de la société, évitant ainsi l'épuisement des ressources [55]. Cette approche économise une quantité significative d'énergie et réduit les émissions de CO₂, NO_x et autres polluants atmosphériques émis par les fabricants d'agrégats. Hosain et al. [56], ont rapporté que la production d'une tonne de granulats naturels (sable de rivière et pierre concassée) émet entre 23 et 33 kg CO₂-eq, tandis que la production d'une tonne de matériaux recyclés à partir de débris de construction et de démolition (DCD) génère seulement 12 kg CO₂-eq.

II.5.1.2. Enfouissement des déchets

En ce qui concerne l'enfouissement des déchets, le recyclage offre une alternative à l'élimination en décharge, permettant la réutilisation de tous les matériaux utilisés. Cela réduit les coûts d'élimination des déchets, qui sont susceptibles d'augmenter en raison des taxes sur les décharges. Par conséquent, le recyclage des DCD est devenu de facto la norme pour le secteur du bâtiment.

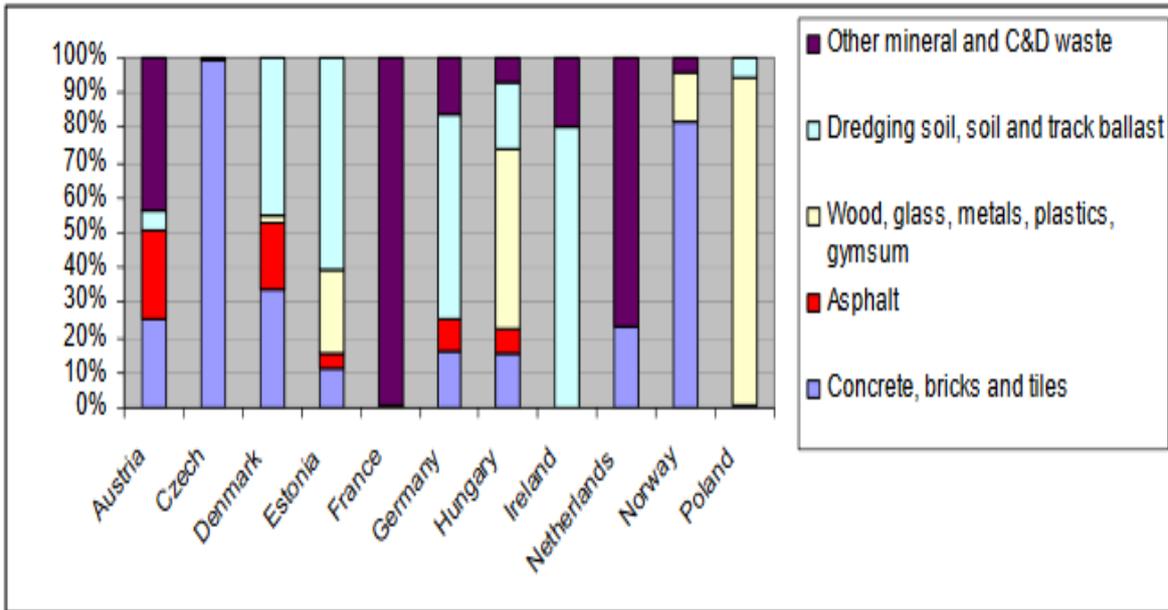


Figure II.3. Composition des déchets de construction et de démolition en fonction des pays [57].



i. December 7, 1995

ii. December 24, 2013

Figure II.4. L'impact de l'extraction intensive de sable et du dragage sur le canal qui relie le lac Poyang au fleuve Yangtze [58].

II.5.1.3. Rareté des matières premières

Les granulats grossiers et fins représentent les composants les plus importants du béton. En raison de l'augmentation rapide de la production et de l'utilisation du béton, la consommation de granulats naturels a également connu une hausse significative. La figure II.3 illustre l'origine des granulats naturels et leurs quantités pour différents pays. La roche concassée, le sable de rivière et le gravier sont les granulats les plus fréquemment utilisés.

Cependant, leurs quantités diminuent, et leur extraction pose de sérieux problèmes. L'extraction du sable des rivières engendre des dommages environnementaux à l'échelle mondiale, tels que la modification du cours de l'eau, l'érosion du littoral, la création de déviations sans issue et de fosses. Par exemple, la Figure II.4 illustre l'impact du dessablage et du dragage dans la branche nord du plus grand lac d'eau douce de Chine en 18 ans. Le dragage du sable a largement modifié la topographie et les caractéristiques hydrologiques en réduisant le niveau de l'eau, augmentant la turbidité et les concentrations de sédiments [59]. Compte tenu de la demande en béton et des impacts de l'extraction des fines agrégats naturels (0-4 mm) des rivières et des mers, les sources alternatives revêtent une importance croissante.

II.5.1.4. Coûts

Actuellement, le SR est moins cher que le sable de rivière. Il est souhaitable d'utiliser des granulats de béton recyclés dans la production de béton tant qu'ils sont moins chers que les granulats naturels et qu'ils n'augmentent pas la demande pour les constituants coûteux du béton, en particulier le ciment.

II.5.2. Les obstacles de l'utilisation de sable recyclé (SR)

Contrairement aux avantages, les défis suivants sont estimés être critiques dans les futures utilisations de SR dans de nouveaux mélanges de béton.

a) Variations des propriétés de SR

Les variations physiques et les propriétés chimiques du SR provoquent un large éventail de propriétés de durabilité des mortiers et bétons avec SR, ce qui résulte en une livraison de matériau incohérente.

- Variations physiques : La forme des granulats fins évolue largement de ronde à angulaire après le recyclage des gravats de béton. De plus, les particules de SR présentent une distribution granulométrique et des surfaces spécifiques différentes par rapport aux particules naturelles des agrégats fins ;
- Variations chimiques : En raison des variations chimiques liées au type de ciment et au type de granulats dans le béton d'origine, la composition chimique et les propriétés du SR peuvent être très différentes. La matière ultrafine peut également contenir différents types d'impuretés. Afin d'améliorer la qualité du SR, il serait plus coûteux, tant sur le plan économique qu'écologique, d'éliminer le mortier des particules de SR et de nettoyer le matériau de diverses impuretés par rapport aux granulats naturels fins. De plus, les lots fortement contaminés nécessiteront plusieurs étapes de traitement pour produire des

granulats de béton recyclé avec une qualité suffisante pour le nouveau béton, ce qui entraîne un processus plus coûteux.

b) Normes

La demande d'utilisation de SR dans les nouvelles structures en béton est énorme. Cela nécessite un contrôle de qualité plus strict du SR par rapport aux granulats naturels fins. Cependant, l'absence d'un système bien développé de lignes directrices pour le contrôle de la qualité entrave une utilisation plus large de SR dans le béton neuf. Compte tenu de l'intérêt accru pour le SR dans la pratique, les gouvernements pourraient également envisager de définir une « écotaxe » pour encourager son utilisation.

c) Recherche vs. Pratique

Le contrôle qualité du SR au laboratoire est plus exigeant et rigoureux que dans les usines à béton. Pour les applications du SR dans les usines à béton, les principales préoccupations sont l'origine inconnue du SR, la mise à l'échelle et le manque de lignes directrices pour les tests. Cela rend l'application de différents SR dans la pratique extrêmement difficile.

II.6. Utilisation de granulats recyclés dans la construction

Il existe un fort potentiel de réutilisation et de recyclage du DCD, car la plupart de ses composants ont une valeur élevée en ressources. Un marché de réutilisation du GR dérivé du DCD s'est développé dans des secteurs tels que l'aménagement paysager, la construction routière (couches de fondation et de base non liées, couches liées hydrauliquement, revêtements de surface bitumineux), ainsi que dans la production de mortiers et de bétons à base de ciment [60]. Plusieurs études ont obtenu des résultats positifs après l'utilisation de GR dans diverses applications de construction routière [61].

Généralement, lors de l'incorporation de GR à partir de gravats de maçonnerie ou de matériaux à base d'asphalte, les performances mécaniques peuvent diminuer [61]. Cependant, des études ont montré des performances améliorées avec l'utilisation de GR provenant de béton concassé [62]. Cette amélioration s'explique par les propriétés auto-cimentantes du ciment non hydraté des particules de béton concassées et une surface plus rugueuse, ce qui augmente le frottement inter-particulaire, provoquant même des redistributions de charge.

Une préoccupation sérieuse concernant l'utilisation de matériaux recyclés dans la construction de routes est leur lixivibilité. Le DCD traité de manière non contrôlée peut contenir des matières lixiviables dangereuses pour la santé humaine et l'environnement (par

exemple, peinture à base de plomb, mercure dans les lampes fluorescentes, bois traité et amiante) qui, à leur tour, peuvent contaminer les eaux souterraines [62]. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de l'utilisation du GR dans des applications sensibles à la lixiviation.

II.7. Déchets industriels utilisés dans la fabrication du béton

La génération de sous-produits industriels a augmenté de manière alarmante. Selon le type d'industrie, une large gamme de sous-produits industriels est générée. Un exemple de tel matériau est le laitier de haut fourneau granulé broyé (LHGB), principalement issu des hauts fourneaux des industries sidérurgiques. Composé principalement de silicates et d'alumine, le LHGB peut avoir des propriétés liantes, ce qui est en fait un remplacement partiel potentiel du ciment. Des études ont examiné son utilisation comme agrégat et partie du liant dans la production de béton [63].

Il est évident que le LHGB est plus bénéfique lorsqu'il est utilisé comme substitut du ciment, car son incorporation accrue peut améliorer la maniabilité. Cela permet de réduire la quantité d'eau nécessaire tout en maintenant la même maniabilité qu'un mélange de béton de ciment Portland ordinaire, conduisant ainsi à des performances mécaniques améliorées. De plus, l'utilisation de ce matériau a démontré une résistance supérieure à l'attaque des sulfates et à la pénétration des ions chlorures par rapport au ciment Portland ordinaire.

La cendre volante, un sous-produit des industries de combustion du charbon, est composée de silicates et d'alumine. Son utilisation partielle en remplacement du ciment peut entraîner des réactions pouzzolaniques. Les effets de l'utilisation de cendres volantes dans le béton sont bien documentés [64]. Une utilisation judicieuse de ce matériau peut améliorer la maniabilité, la pompabilité, la cohésion, la finition, les performances mécaniques et la durabilité du béton.

La production et la consommation massives de verre, notamment dans la fabrication de bouteilles, nécessitent des méthodes de recyclage supplémentaires. Outre le recyclage habituel pour de nouvelles bouteilles, plusieurs études ont évalué son application dans la production de béton [65]. L'incorporation de granulats de déchets de verre peut entraîner une diminution de la performance mécanique du béton, attribuée au comportement fragile des agrégats de déchets de verre. Cependant, l'utilisation de granulats de déchets de verre très fins peut conduire à un effet de remplissage, améliorant certaines propriétés mécaniques et liées à la durabilité.

L'utilisation de déchets plastiques comme substitut naturel des granulats dans le béton est une pratique relativement récente. L'approche adoptée évalue généralement directement l'effet des agrégats de déchets plastiques sur les propriétés du béton sans tenir compte de la nature et des caractéristiques spécifiques de l'agrégat utilisé, ce qui peut rendre l'évaluation significative du rôle du ou des agrégats extrêmement difficiles, voire impossible.

II.8. Classement les granulats recyclés

Les trois principaux types de matériaux dérivés de la plupart des déchets de construction et de démolition (DCD) sont le béton concassé, la maçonnerie concassée et les débris de démolition mixtes. Après le processus de concassage et la valorisation dans des usines de recyclage certifiées, les granulats obtenus peuvent être classés dans l'une des quatre catégories suivantes.

II.8.1 Granulats de Béton Recyclés (GBR)

Le béton se retrouve couramment dans la plupart des agrégats recyclés (AR) car c'est le matériau de construction le plus utilisé dans les structures. Des organisations de divers pays ont élaboré des spécifications [66] qui incluent une définition des AR. Beaucoup d'entre eux [67, 68] semblent convenir que pour être considéré comme AR, ils doivent comprendre au minimum 90 %, en masse, de fragments à base de ciment Portland et de matériaux agrégats naturels (AN). Dans l'amendement proposé à l'EN 12620 [69], le béton concassé est classé sous la désignation BR (béton recyclé). Cette catégorie comprend également les éléments de maçonnerie en mortier et en béton.

II.8.2. Granulats de Maçonnerie Recyclés (GMR)

Les moellons de maçonnerie constituent une désignation collective pour divers matériaux de construction minéraux résultant de la construction et de la démolition de bâtiments et d'ouvrages de génie civil. Cette famille de matériaux peut inclure des blocs de béton aérés et légers, des briques en céramique, des briques de hauts fourneaux, des blocs de laitier, et des briques silico-calcaires. Les moellons de maçonnerie contiennent souvent un enduit de mortier.

II.8.3. Granulats Mixtes Recyclés (GMR)

Ce matériau est composé de béton concassé et calibré ainsi que de gravats de maçonnerie. L'agrégat résultant est un mélange de deux composants principaux obtenus à partir de l'enrichissement de DCD. Certaines spécifications [70] établissent sa composition à moins de 90 %, en masse, de fragments à base de ciment Portland et d'AN. En d'autres termes,

il peut contenir plusieurs autres matériaux DCD courants tels que les matériaux à base de maçonnerie (céramique, béton léger).

II.8.4. Granulats Recyclés de Construction et Démolition (GRCD)

Tout au long de cette enquête, il a été constaté que, dans l'ensemble, la littérature contient peu d'informations sur l'origine et la composition des granulats, et ainsi, lorsqu'il n'a pas été possible de les catégoriser complètement, ils ont été considérés comme GRCD. Dans d'autres cas, les Produits recyclés contenait des niveaux élevés de contamination (par exemple, asphalte, verre, plastiques, bois) et a également été classée dans cette catégorie car elle n'appartenait à aucune des autres (GBR, GMR, GMR). Ces matériaux peuvent être le résultat de déchets provenant de chantiers de construction et de démolition qui n'ont pas subi de tri et peuvent donc contenir des matériaux de valeur ainsi que des contaminants.

II.9. Production de granulats recyclés

Le recyclage du béton est un processus relativement simple, similaire au broyage de l'agrégat naturel. Il s'agit de casser, d'enlever et de broyer le béton existant en un matériau d'une taille et d'une qualité spécifiée. Pour obtenir un produit de bonne qualité, il est essentiel de séparer les différents types de matériaux avant qu'ils n'entrent dans le concasseur. Un haut niveau de propreté du matériau est essentiel pour créer un produit final de qualité pouvant être réutilisé. Pour cette partie, nous ferons référence à Recycling Queensland [71] et à leur usine de Brisbane dans la figure II.5 comme exemple dans la production de granulats recyclés.



Figure II.5. Usine de recyclage (Source : Recyclage du Queensland) [71]

II.9.1. Origines des matériaux dans la fabrication des agrégats recyclés : Une exploration des sources durables

Une part significative du béton provient de la démolition de bâtiments ou de projets de construction, généralement à partir de chantiers de démolition. Les matériaux acheminés vers les usines de recyclage locales proviennent couramment d'un rayon de 20 à 30 kilomètres autour de ces installations. La source de béton est souvent mélangée à divers autres matériaux. Par exemple, selon une étude menée par Recycling Queensland, la composition typique des débris de démolition (figure II.6) se compose généralement d'un mélange de 21 % de béton, 20 % de carton-plâtre-papier-verre, 19 % de bois, 16 % de briques, 9 % d'acier et autres métaux, 6 % de sol, 5 % de déchets divers et 4 % de plastiques.

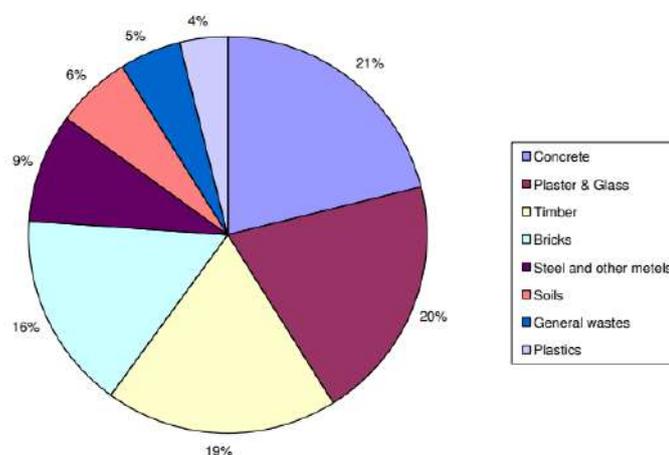


Figure II.6. Mélange de matériaux concassés provenant d'une construction de bâtiment selon QLD Recycling [71]

La qualité du granulat recyclé dépend étroitement de la propreté du matériau lorsqu'il entre dans le broyeur. La propreté se réfère à la quantité de corps étrangers retirés, laissant uniquement du béton. L'endroit optimal pour débiter la séparation des matériaux est sur le site de démolition lui-même. Les éléments tels que le bois, les fenêtres, la plomberie et le câblage électrique peuvent être retirés et recyclés séparément avant que la structure ne soit démolie.

La qualité du béton est un facteur de coût essentiel. Actuellement, Recycling Queensland facture environ 6,0 \$ la tonne pour le béton propre (béton brut) et jusqu'à 20,0 \$ la tonne pour le béton sale (matériaux mixtes) qui est déversé dans l'usine.

II.9.2. Transport et collecte

Après la démolition de la structure, le matériau est transporté à l'usine de recyclage pour le traitement. Le transport peut s'effectuer via diverses méthodes. Les quatre méthodes

les plus courantes incluent l'utilisation de conteneurs roll-off, de grandes remorques à benne basculante, de remorques à caisse fermée et de conteneurs couverts.

II.9.3. Le processus de création d'agrégats recyclés

II.9.3.1. Pré-tri du matériel source

La première étape à l'arrivée à l'usine de recyclage est le pré-tri du matériau. Tous les matériaux de démolition passeront par un système de tri primaire pour séparer initialement l'acier, le bois, le gypse, les panneaux de particules, les panneaux de fibres, le papier, les déchets légers, le béton et les fines lourdes.

II.9.3.2. Usine de concassage primaire

Le matériau entre ensuite dans l'usine de concassage primaire. La première étape de ce processus est réalisée par l'excavatrice Pulvériser, une machine qui écrase le béton en morceaux ronds d'environ un demi-mètre, fonctionnant comme un concasseur à impact de moulin. Ensuite, le sol est à nouveau « scalpé ». Le scalpage s'effectue avec un écran de scalpage de 25 mm afin d'éliminer la terre et les boules d'argile du béton brisé. Le matériau passe ensuite dans le concasseur primaire qui le réduit à une taille de 100 mm, produisant un agrégat de 150 mm. Ce concasseur est généralement un concasseur à mâchoires.

II.9.3.3 Usine de concassage secondaire

Lorsque le matériau broyé quitte l'usine de concassage primaire, il passera par un poste de prélèvement (Figure II.7). Le personnel présent à cet endroit tentera de retirer tout reste de bois, d'acier renforcé, de plastique et d'autres objets volumineux.



Figure II.7. Station de prélèvement (Source : Recyclage du Queensland)

Le matériau passera ensuite à travers des aimants. Cette séparation électromagnétique élimine tout acier renforcé restant et autres ferrailles métalliques.

Il existe deux autres méthodes de tamisage ou de séparation du matériau pour créer des agrégats. Ce sont la séparation sèche et la séparation humide. La séparation par voie humide implique le passage du matériau dans un aqua mateur, dans lequel les matières étrangères de densité sont éliminées par des jets d'eau et l'utilisation d'un réservoir à flotteur/évier. Cela produit un agrégat très propre. Cette méthode n'est pas actuellement utilisée à l'Usine de recyclage du Queensland à Brisbane. La séparation à sec implique l'utilisation d'air soufflé pour éliminer les particules plus légères du matériau en béton plus lourd. Cette méthode est utilisée à l'usine Recycling Queensland. Les lames d'air (figure II.8) et les déflecteurs de vent (figure II.9) sont tous deux utilisés à l'usine Recycling Queensland. Les granulats recyclés sont généralement « soufflés » au moins deux fois et généralement trois fois.



Figure II.8. Lames d'air



Figure II.9. Tamis à vent

Le matériau nettoyé entre ensuite dans l'installation de concassage secondaire. C'est un concasseur à noyau à l'usine Recycling Queensland. Le broyeur peut être réglé sur une certaine taille et le matériau broyé est ensuite passé à travers des tamis (figure II.10). Il y a plusieurs écrans qui trient l'agrégat en plusieurs tailles. L'agrégat qui est trop grand reviendrait à la séparation électromagnétique et circulerait à travers les couteaux à air avant de retourner dans le broyeur secondaire.



Figure II.10. Dépistage (Source : Recyclage du Queensland)

II.9.4. Étude comparative entre les agrégats recyclés et les agrégats naturel

Il est crucial de comprendre la disparité entre les granulats recyclés et les granulats naturels afin de prendre en considération et éventuellement atténuer les divergences lors de l'utilisation des granulats recyclés dans les mélanges de béton.



Figure II.11. Agrégat naturel calibré de 20 mm (côté gauche) et agrégat recyclé (côté droit).

II.9.4.1. Texture de surface des particules

Les agrégats recyclés ont généralement une texture plus rugueuse (Figure II.11), offrant une plus grande surface spécifique. En revanche, les agrégats naturels ont une tendance à être plus lisses et plus arrondis, ce qui a un impact significatif sur la qualité du ciment. Les agrégats naturels ont la capacité de se compacter plus étroitement, entraînant une résistance à la compression accrue et une absorption d'eau réduite. En raison de leur forme plus rugueuse, les granulats recyclés présentent une disposition moins compacte des

particules, créant ainsi davantage de vides. Cette caractéristique entraîne une absorption d'eau plus importante, affaiblissant la liaison dans le béton.

Par ailleurs, la texture de surface des particules peut influencer les besoins en eau du mélange, impactant ainsi la maniabilité globale. Ainsi, la texture joue un rôle crucial dans la gestion de l'eau et des propriétés du mélange, affectant directement la maniabilité et d'autres caractéristiques du béton produit.

II.9.4.2. Qualité

La qualité des granulats recyclés peut être très variable en raison des propriétés physiques et chimiques du matériau source, tandis que les agrégats naturels présentent une cohérence accrue en raison de leur source uniforme. Cette variabilité de qualité peut poser des défis lors de l'utilisation de granulats recyclés, comme indiqué dans diverses revues scientifiques où plusieurs chercheurs ont rapporté des résultats divergents pour des mélanges similaires. Cette diversité peut potentiellement compliquer le processus de conception des mélanges.

Une autre préoccupation majeure réside dans le niveau de teneur en chlorure des granulats recyclés, en particulier lorsque le matériau est destiné à être utilisé dans du béton armé

II.9.4.3. Densité des particules

Il est important de noter que la densité des particules a une influence significative sur la densité du béton, tant dans son état plastique que durci. Cette différence de densité peut avoir des implications sur les propriétés mécaniques et la performance globale du béton lorsqu'on utilise des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels.

II.9.4.4. Résistance globale

Les expériences ont montré que la résistance des agrégats recyclés est inférieure à celle des agrégats naturels, ce qui peut avoir un impact négatif sur la résistance finale à la compression du béton produit avec des granulats recyclés.

II.10. Paramètres généraux affectant les performances de AFR dans le béton

II.10.1. Processus de recyclage

Le processus de transformation du béton démolit (DCD) en granulats, qu'ils soient grossiers ou fins et adaptés à la réintégration dans le béton, peut être subdivisé en plusieurs étapes. Ces étapes comprennent la séparation par des détecteurs de métaux, le criblage, le

concassage, le criblage secondaire, le concassage secondaire, puis le tamisage et la séparation.

Le nombre d'étapes de concassage a un impact significatif sur la qualité sable recyclé (SR) produit et, par extension, sur le béton recyclé (BR) qui l'utilisera. Les bétons soumis à un concassage secondaire dans un concasseur à percussion présentent généralement un SR avec moins de mortier attaché que ceux suivant uniquement une procédure de broyage primaire. En raison de la porosité plus élevée de la pâte de ciment durcie par rapport au granulats naturels (GN), une augmentation de la teneur en mortier adhérent entraîne également une augmentation de l'absorption d'eau du GR [72]. Une étude menée par Kim et Yun [73] sur un béton démolé de résistance à la compression de 21 MPa a utilisé des taux d'absorption d'eau de 6% et 8% après plusieurs cycles de concassage et de tri.

Une étude menée par Lee [74], comparant deux processus de concassage utilisant un concasseur à mâchoires et un concasseur à percussion, a abouti à des densités séchées au four de 2390 kg/m³ et 2280 kg/m³, ainsi qu'à une absorption d'eau de 6,59% et 10,35%, respectivement.

Le processus de lavage du GR a également un impact significatif sur son absorption d'eau. Une étude de Wegen et Haverkort [75] a montré qu'après le lavage des GR, l'absorption d'eau des agrégats a diminué de 35% à 55%, probablement en raison de l'élimination de très petites particules par le processus de lavage. Song et Ryou [76] ont utilisé des processus chimiques et physiques combinés pour laver le SR fin, ce qui a réduit l'absorption d'eau de 6% à 2%, la teneur en impuretés de 0,5% à 0,2%, et augmenté le rapport absolu de volume de 62% à 65%.

En conclusion, il est recommandé d'utiliser des concasseurs à mâchoires plutôt que des concasseurs à percussion et d'effectuer plusieurs cycles de lavage et de concassage du DCD pour améliorer la qualité des granulats recyclés. Cependant, il est important de noter que plus le nombre de cycles est élevé, plus la consommation d'énergie augmente, ce qui peut avoir des implications sur la performance environnementale globale du processus de recyclage.

II.10.2. La taille des particules

Bien que le processus de recyclage, tel qu'expliqué précédemment, puisse être très approfondi, il ne permet pas de détacher complètement l'ancien mortier des granulats. Ainsi, comme illustré dans la figure II.12, le béton recyclé (AFR) présente une seule transition entre le granulats et la matrice cimentaire, formant une étroite bande poreuse à l'interface de la pâte de ciment et de l'agrégat, connue sous le nom de zone de transition interfaciale (ZTI).

Pour les agrégats naturels (AN), il n'y a qu'une seule ITZ entre le granulats et la matrice

cimentaire, créant également une bande poreuse à l'interface pâte de ciment/agrégat. Cependant, pour les granulats recyclés (AFR), deux phases ITZ distinctes sont observées : une nouvelle ITZ entre la nouvelle pâte de ciment et l'ancien mortier de SR, ainsi qu'une ancienne ITZ entre l'ancienne pâte de ciment et le granulats d'origine AN [77]. De plus, le processus de concassage lui-même génère des microfissures dans le mortier attaché/le granulats d'origine. Ces pores et fissures dans les AFR absorbent l'eau, conduisant à une teneur élevée en eau, ce qui peut ultimement entraîner une réduction de la résistance du béton.

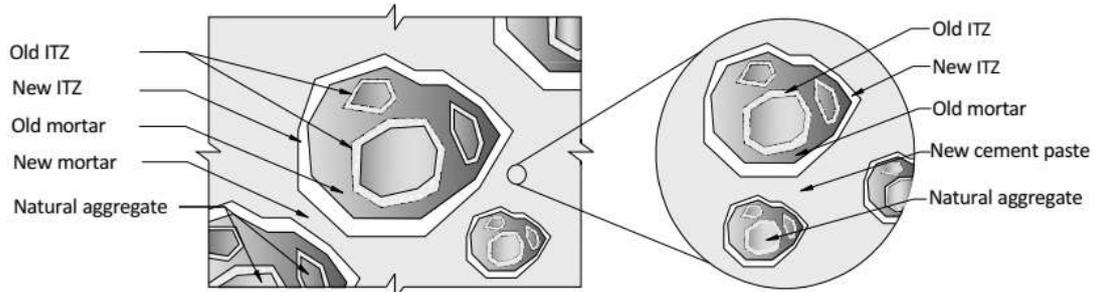


Figure II.12. Structure de remplacement complet des granulats fins et grossiers d'origine naturelle (GN) par des granulats recyclés fins et grossiers (GR) et leurs zones de transition.

II.10.3. Qualité du matériel source

Solyman [78] a analysé l'influence de l'incorporation de différents types et niveaux de poussière de roche (PR) fine sur le module d'élasticité du béton et la maniabilité du béton recyclé (BR) résultant. Comme le montre la figure II.12, parmi les différents types de déchets de construction et de démolition (DCD), il a été conclu que l'utilisation de 80 % de vieux béton + 20 % de vieilles briques comme source de PR fine entraîne la moindre baisse de la maniabilité et du module d'élasticité avec des taux d'incorporation plus élevés. La raison pourrait également être liée à l'optimisation du potentiel d'absorption d'eau.

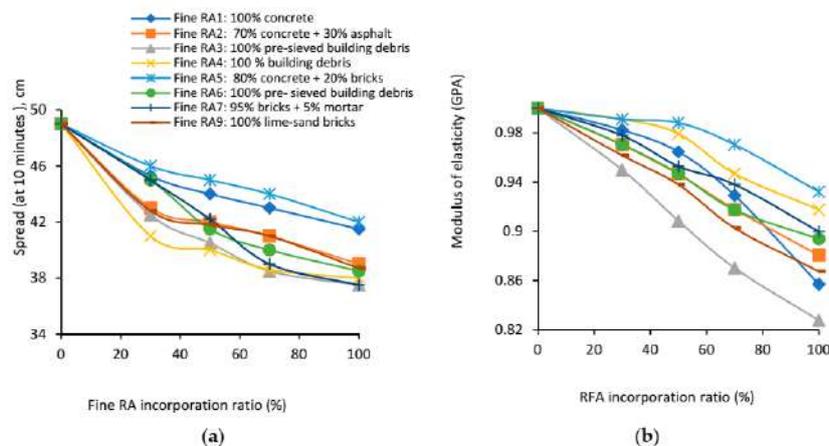


Figure II.12. Effect of replacing different incorporation ratios and types of fine GR content

II.11. L'effet de la variation du ratio d'incorporation de AFR sur la performance du béton

II.11.1. Maniabilité

La figure II.13 présente la relation entre l'affaissement du béton et les niveaux d'incorporation de AFR, provenant de ces études [79]. Une explication raisonnable à cela pourrait être que la AFR absorbe plus d'eau du mélange que les granulats naturels (GN) [80,81]. De plus, la taille minimale des particules de AFR affecte la maniabilité du béton, car les AFR plus petits ont une absorption d'eau plus élevée que les plus grands dans le même béton d'origine. Une plus grande surface et une plus grande absorption d'eau des particules fines de la AFR ont plus de potentiel pour une demande en eau plus élevée et une maniabilité réduite en conséquence [79]. Le niveau de finesse de la AFR et son effet sur la maniabilité sont d'autres aspects qui doivent être pris en compte.

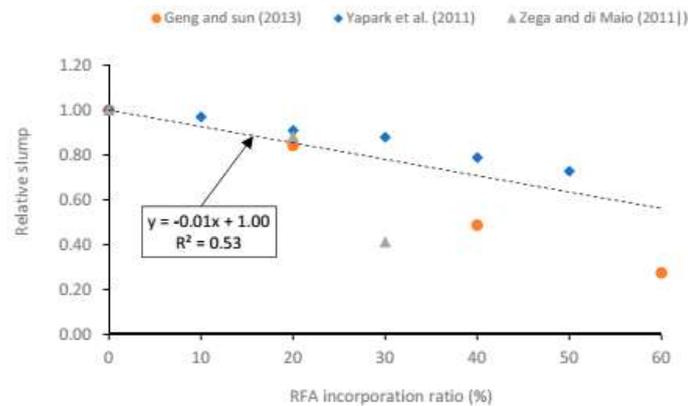


Figure II.13. Relation entre le béton AFR et l'affaissement pour un rapport E/C similaire.

Yaparak et al. [82] ont obtenu des valeurs d'affaissement comprises entre 85 et 165 mm pour du béton frais réalisé avec différents niveaux d'incorporation de AFR. Les données de cette étude confirment que la chute l'affaissement de béton AFR diminue à mesure que le niveau d'incorporation de AFR augmente. Cet écart pourrait être dû à la texture, la forme, l'absorption d'eau et la teneur en poussière du AFR broyé par rapport au sable naturel. Geng et Sun [79] ont maintenu le rapport (E/C) constant à 0,40 et ont rapporté que le béton AFR a une adsorption d'eau plus élevée, ce qui entraîne un affaissement et une maniabilité médiocres à un taux d'incorporation de AFR plus élevé.

Pour un béton AFR normal sans utilisation de superplastifiants (SP), ces études [83,84] ont montré que le rapport E/C doit être augmenté à mesure que le rapport d'incorporation de AFR augmente dans le mélange de béton pour obtenir le même affaissement cible. Ceci pourrait être réalisé en ajoutant 15% d'eau supplémentaire au béton AFR [85].

II.11.2. Densité fraîche en vrac

Généralement, la densité du béton RFA est inférieure à celle du béton conventionnel et sa densité diminue avec l'incorporation croissante de RFA en raison de la présence d'une densité plus faible des mortiers de ciment résiduels fixés sur des particules de granulats [86].

II.11.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est l'un des paramètres les plus importants qui détermine la capacité d'un élément de structure à supporter certaines charges en service. La résistance à la compression du béton de granulats recyclés (ACR) dépend normalement de l'âge du béton, du niveau d'incorporation de AFR, des additifs, des adjuvants, du rapport E/C, de la qualité du matériau source et de la teneur en humidité, du type et de la taille de la AFR [87]. Deux résultats contradictoires ont été tirés de différentes recherches sur ce sujet. La figure II.14 résume les résultats des études suivantes et montre l'influence de l'incorporation croissante de AFR sur la résistance à la compression des mélanges de béton dans le temps.

La majorité des chercheurs sont arrivés à la même conclusion, à savoir que l'incorporation de AFR dans les mélanges de béton est néfaste en termes de force de compression [88]. Ceci est lié à plusieurs facteurs, le plus significatif étant la teneur en eau nécessaire pour augmenter le rapport E/C dans les mélanges ACR afin d'obtenir la même maniabilité que celle du béton AN. Cela peut être lié à l'absorption d'eau élevée du AFR et à sa texture et à sa forme angulaire. Néanmoins, les résultats de ces études [80,81] montrent que la AFR n'influence pas significativement la résistance des mélanges de béton à faible résistance [79,80], car la résistance ultime des bétons à faible résistance dépend principalement de la qualité de la pâte plutôt que des granulats.

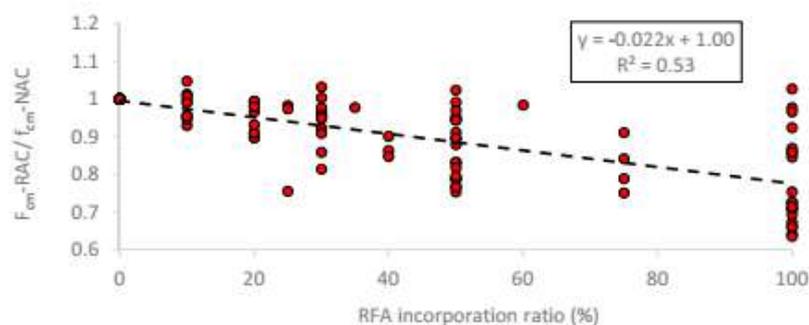


Figure II.14. Effet de l'incorporation d'AFR dans le béton sur la résistance à la compression.

Evangelista et de Brito [89] ont rapporté que la résistance à la compression du béton avec jusqu'à 30 % de AFR ne devrait pas être compromise. De plus, la perte pour 100% de AFR n'était que de 7%. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que le AFR a augmenté la teneur totale en ciment (lors du processus de broyage du béton source, certains produits d'hydratation qui ont piégé les particules de ciment d'origine peuvent se briser et libérer les particules de ciment non hydratées), pouvant atteindre jusqu'à 25 % de son poids [90].

Ahmed [91] a confirmé que la résistance à la compression du béton avec un remplacement jusqu'à 50% de AN fin par du AFR était similaire à celle du béton de référence, voire légèrement supérieure. Pour des taux de remplacement plus élevés, la perte maximale de résistance à la compression était de 13 % et 22 % à 28 et 56 jours, respectivement.

II.11.4. Influence de AFR sur le retrait et la perte en poids

En raison du taux d'absorption d'eau (A_b) élevé, le AFR est généralement utilisé dans des conditions de surface saturée sèche (SSD) ou ajouté avec de l'eau supplémentaire, calculée à l'aide de la méthode de compensation d'eau, pour maintenir une maniabilité acceptable [92]. L'influence de l'état de saturation des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux à base de ciment a attiré l'attention de certains chercheurs [93]. Oliveira [94] a constaté que le béton préparé avec des granulats secs et saturés présentait une durabilité plus faible, alors que de meilleurs résultats pouvaient être obtenus avec des granulats semi-saturés.

Poon et al. [95] ont montré que les granulats secs recyclés entraînaient un affaissement initial plus élevé et une perte d'affaissement plus rapide que celle des granulats SSD, ce qui pourrait être le résultat de la « purge » de l'excès d'eau dans les granulats SSD. De plus, le béton contenant des granulats secs recyclés présentait une résistance à la compression supérieure à celle à l'état SSD. D'après les recherches, les granulats recyclés à l'état partiellement saturé devraient être optimaux pour la production de mortier ou de béton. Cela est attribué à la différence de répartition de l'humidité, qui résulte de la modification du rapport E/C réel de la pâte et de la capacité d'absorption d'eau des granulats ayant des états d'humidité initiaux différents.

II.12. Utilisation de AFR pré-humidifié comme réservoir interne pour fournir de l'eau

Le séchage des matériaux à base de ciment est une méthode efficace pour soulager le retrait autogène [96,97]. L'eau supplémentaire absorbée dans le AFR peut être libérée pour atténuer la baisse d'humidité relative, ce qui tend à diminuer le retrait. De plus, la teneur en humidité dans les pores affecte directement la résistance et le taux d'hydratation. D'autre part,

la pâte de ciment adhérente avec une faible rigidité réduit à la fois la rigidité globale des granulats et la retenue fournie par les granulats [98], ce qui peut augmenter le retrait autogène.

Alors que les matériaux sont toujours exposés à des conditions sèches, le retrait de séchage se produit lorsque l'eau libre stockée dans les pores capillaires s'évapore, résultant d'une faible humidité relative de l'environnement [99]. La perte d'humidité produit des contraintes internes, une perte de masse et par conséquent une réduction de volume des matériaux. Silva et al. [100], Tam et al. [101] et Knaack et al. [102] ont découvert que les granulats recyclés présentent généralement un retrait au séchage plus élevé que les granulats naturels correspondants. La teneur en humidité et son transport sont essentiels pour évaluer l'effet de la répartition interne de l'humidité sur le retrait au séchage.

II.13. Utilisations des fines recyclées dans les matériaux cimentaires

La possibilité d'utiliser des fines issues de bétons recyclés dans une matrice cimentaire est peu discutée dans la littérature. Deux aspects sont rapportés dans cette section :

Utilisé comme matière première pour la production de clinker :

Certains chercheurs ont exploré l'utilisation des fines de béton recyclé comme matière première pour la production de clinker. Cette approche vise à incorporer ces fines dans le processus de fabrication du clinker, contribuant ainsi à la réduction de la consommation de ressources naturelles tout en offrant une alternative durable.

Utilisé comme additif minéral :

Les fines issues de bétons recyclés peuvent également être utilisées en tant qu'additif minéral dans les mélanges de ciment. Cela consiste à intégrer ces fines dans la matrice cimentaire pour améliorer certaines propriétés du béton. L'ajout de ces fines peut modifier les caractéristiques de la pâte de ciment, influençant ainsi les propriétés finales du matériau.

Ces deux approches offrent des perspectives intéressantes pour la valorisation des fines de béton recyclé, contribuant à la durabilité globale de l'industrie cimentière et à la gestion des déchets de béton. Des études approfondies sont nécessaires pour évaluer les performances à long terme de ces applications et garantir la qualité des produits résultants.

II.14. Conclusion

La présence d'impuretés poreuses, telles que le vieux mortier attaché, dans le sable recyclé peut conduire à des variations significatives et à une incohérence des propriétés physiques des agrégats recyclés, les rendant souvent considérés comme de mauvaise qualité et moins utilisés.

- Les agrégats recyclés présentent des caractéristiques physiques différentes, tels que des particules rugueuses, texturées, angulaires et allongées, par rapport aux granulats naturels qui sont lisses et arrondis. Les particules rugueuses et angulaires nécessitent généralement plus d'eau que les particules lisses.
- La qualité des agrégats recyclés est influencée par la contamination provenant des sources de débris, tandis que la qualité des granulats naturels est basée sur les caractéristiques physiques et propriétés chimiques des sites sources ;
- L'absorption d'eau et la porosité des agrégats recyclés sont généralement plus élevées que celles des agrégats naturels. Cependant, la densité des agrégats recyclés est inférieure en raison de la présence de mottes de mortier résiduelles poreuses et moins denses qui adhèrent aux surfaces ;
- La taille des particules des agrégats recyclés influe sur la quantité de mortier résiduel, avec une augmentation de la taille des particules conduisant à une augmentation du pourcentage de mortier résiduel ;
- Les usines de recyclage de déchets de construction et de démolition sont souvent situées en zone urbaine, ce qui influence l'emplacement des sources de débris et, par conséquent, la qualité des agrégats recyclés.

Chapitre III

Matériels et méthodes

Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Le recyclage du vieux béton démolé en granulats est un processus simple, impliquant le concassage, l'enlèvement, le broyage et le tamisage du béton existant pour obtenir un matériau de taille et de qualité spécifiée. L'utilisation de ces matériaux recyclés répond au défi de durabilité en réduisant l'investissement énergétique dans le traitement des matériaux naturels, en préservant les ressources naturelles et en diminuant la pollution.

Les granulats de béton recyclés (GBR) présentent une densité spécifique plus faible et une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les granulats naturels en raison du mortier ancien qui adhère aux granulats recyclés (GR). Les propriétés du béton fabriqué avec du GBR dépendent fortement de la qualité du béton primaire concassé.

Dans ce chapitre, nous avons d'abord cherché à justifier le choix et les propriétés des matériaux utilisés, en mettant l'accent sur la valorisation du sable de dunes et des déchets recyclés (sable recyclé et poudre de fines recyclée). Ensuite, nous avons décrit en détail tous les tests et essais pratiqués sur les matériaux (naturels et recyclés) utilisés dans cette étude, ainsi que la méthode de préparation des éprouvettes du béton. Enfin, des essais sur les bétons de sable à l'état frais et durcis sont présentés.

III.2. Enquête préliminaire et choix des matériaux

Le choix des matériaux dans cette étude n'a pas été aléatoire, mais basé sur une démarche visant à trouver des matériaux économiques et respectueux de l'environnement capables de remplacer les matériaux naturels tout en conservant ou améliorant les mêmes propriétés. Nous avons également inclus du sable de dunes dans cette étude, bien qu'il ne soit pas couramment exploité dans la construction malgré sa présence significative dans le désert algérien.

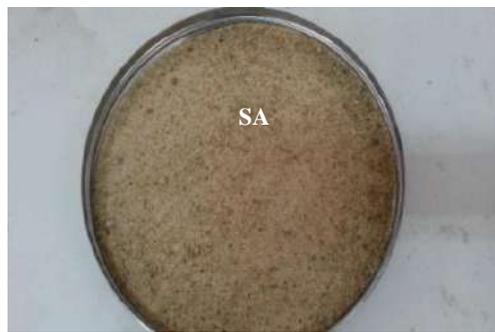
III.3. Matériaux utilisés

Plusieurs matériaux de base ont été utilisés pour la préparation du béton de sable dans cette étude, notamment le sable de dunes, le sable recyclé, le sable alluvionnaire, le ciment, l'eau et la poudre des fines issues du béton recyclé.

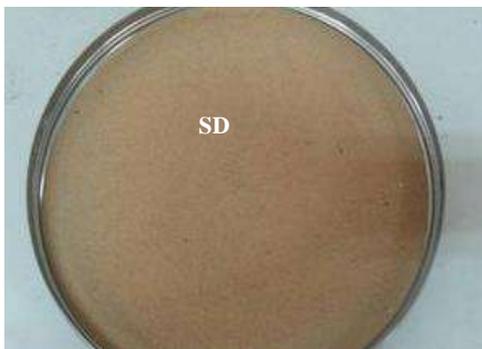
III.3.1. Sables

Trois types de sable ont été utilisés dans ce travail :

- Le sable de dunes utilisé dans ce travail a été extrait du site d'Ain Beida dans la wilaya de Ouargla située au Sahara Algérien (figure III.1(b)) ;
- Le sable recyclé, utilisé comme correcteur dans cette étude, provient des résidus d'une décharge de béton. Ce sable recyclé (0/4 mm) est obtenu par le concassage de déchets de béton et le tamisage (figure III.1(c)) ;
- Le sable alluvionnaire naturel, a été prélevé dans la carrière de Hassi Sayah dans la région de Ouargla (figure III.1(a)).



a. Sable alluvionnaire -



b. Sable de dunes



c. Sable recyclé

Figure III.1 : (a,b et c) sables utilisés.

III.3.2. Ciment

Le ciment employé dans cette étude est le ciment CPJ - CEM II/A 42.5 N, également connu sous le nom de Matine, et il est produit par la cimenterie de Hammam Eddalaa M'sila. Les tableaux III.1, III.2 et III.3 fournissent respectivement l'analyse chimique et les caractéristiques physiques et minéralogiques de ce ciment.

Tableau III.1. Analyse chimique du ciment

Perte au feu	Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Teneur en chlorures (%)
10,0 ± 2	2,5 ± 0,5	1,7 ± 0,5	0,02 – 0,05

Tableau III.2. Caractéristiques physiques du ciment

CPJ-CEM II/A 42.5	
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	3700 - 5200
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.215
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.150
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤ 3.0
Temps de début de prise (heures)	2h : 03
Temps de fin de prise (heures)	3h : 00
Consistance normale	26.5 ± 2.0

Tableau III.3. Composition minéralogique du clinker (Bogue) (%).

C3S	C3A
60±3	7.5±1

III.3.3. La poudre fine de béton recyclé

Dans le cadre de notre approche, nous avons introduit la poudre fine recyclé (PFR) en remplacement d'une partie du ciment. Cette poudre est obtenue par le concassage du béton suivi du tamisage en laboratoire. Cette démarche vise à explorer le concept innovant présenté dans cette étude, comme illustré dans la Figure III. 2 (a et b).



Figure III.2 (a) Poudre fine utilisée

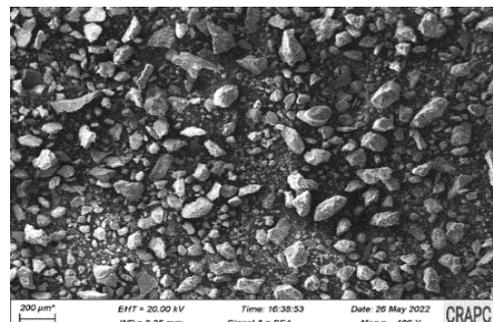


Figure III.2 (b) Image MEB de PFR

Tableau III.4. Densité absolue et surface spécifique du PFR et du CPJ-CEM II utilisés

Matériaux	Ciment Portland	Poudre de fines recyclées
Densité absolue (g/cm ³)	3.10	2.43
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3740	6520

Ces résultats révèlent que la surface spécifique Blaine des poudres fines est supérieure à celle du ciment CPJ-CEM II 42,5 N. Cette observation peut être expliquée par l'effet du concassage successif et la friabilité de la matière première, riche en matériaux calcaires et cimentaires. C'est cette particularité qui justifie notre choix de substituer le ciment par les fines issues du béton de démolition.

III.3.4. Eau de gâchage

En ce qui concerne l'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton dans cette étude, elle provient de la distribution d'eau potable alimentant le laboratoire de génie civil de l'université de Ouargla. La qualité de cette eau est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404 [103]. L'eau joue un rôle crucial en association avec le ciment, remplissant deux fonctions principales : d'une part, elle contribue à l'hydratation du ciment, et d'autre part, elle facilite la fluidification de la pâte. L'analyse chimique de l'eau a été réalisée au laboratoire de traitement des eaux de l'université d'Ouargla, et les résultats sont présentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Composition chimique de l'eau

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	pH
242	125	31	536	755	14,5	755	124	7,75

* Les concentrations sont données en mg/l

En se référant aux résultats présentés dans le tableau III.5, il est évident que l'eau utilisée présente une faible salinité selon les critères définis par Gorisse [104]. Cette faible teneur en sel indique que cette eau est tout à fait appropriée pour être utilisée dans la fabrication de bétons et mortiers normaux.

III.4. Méthodes expérimentales

III.4.1. Mode de fabrication de sable recyclé et poudre des fines recyclées

Une méthode de concassage-criblage a été employée pour obtenir des fines inférieures à 80 µm. En ce qui concerne le béton, les éprouvettes cylindriques de 16 x 32 cm et prismatiques de 4 x 4 x 16 cm ont été préalablement concassées manuellement à l'aide d'un

marteau, réduisant ainsi les morceaux à des dimensions inférieures à 10 cm. Cette étape a été entreprise dans le but de faciliter leur traitement ultérieur dans le concasseur, permettant ainsi de gagner du temps et d'économiser des ressources financières.

Les granulats recyclés (GR) ont été introduits directement dans le concasseur, suivant une méthode consistant à broyer successivement les GR avec une ouverture décroissante des mâchoires. À la fin de chaque étape de concassage, le matériau est tamisé à 5 mm pour obtenir le sable recyclé (SR), puis à 80 μm pour obtenir la PFR. Toutes les particules rejetées par ce tamis sont réintroduites pour une nouvelle étape de broyage, tandis que celles passant à travers le tamis de 80 μm sont retenues (Figure III.3). Ces opérations sont répétées jusqu'à ce que l'ouverture de la mâchoire ne puisse plus être réduite.

Le choix délibéré de filtrer à 80 μm est motivé par le fait que cette taille est proche de D_{max} , valeur classiquement utilisée pour les ajouts de minéraux dans ce contexte.

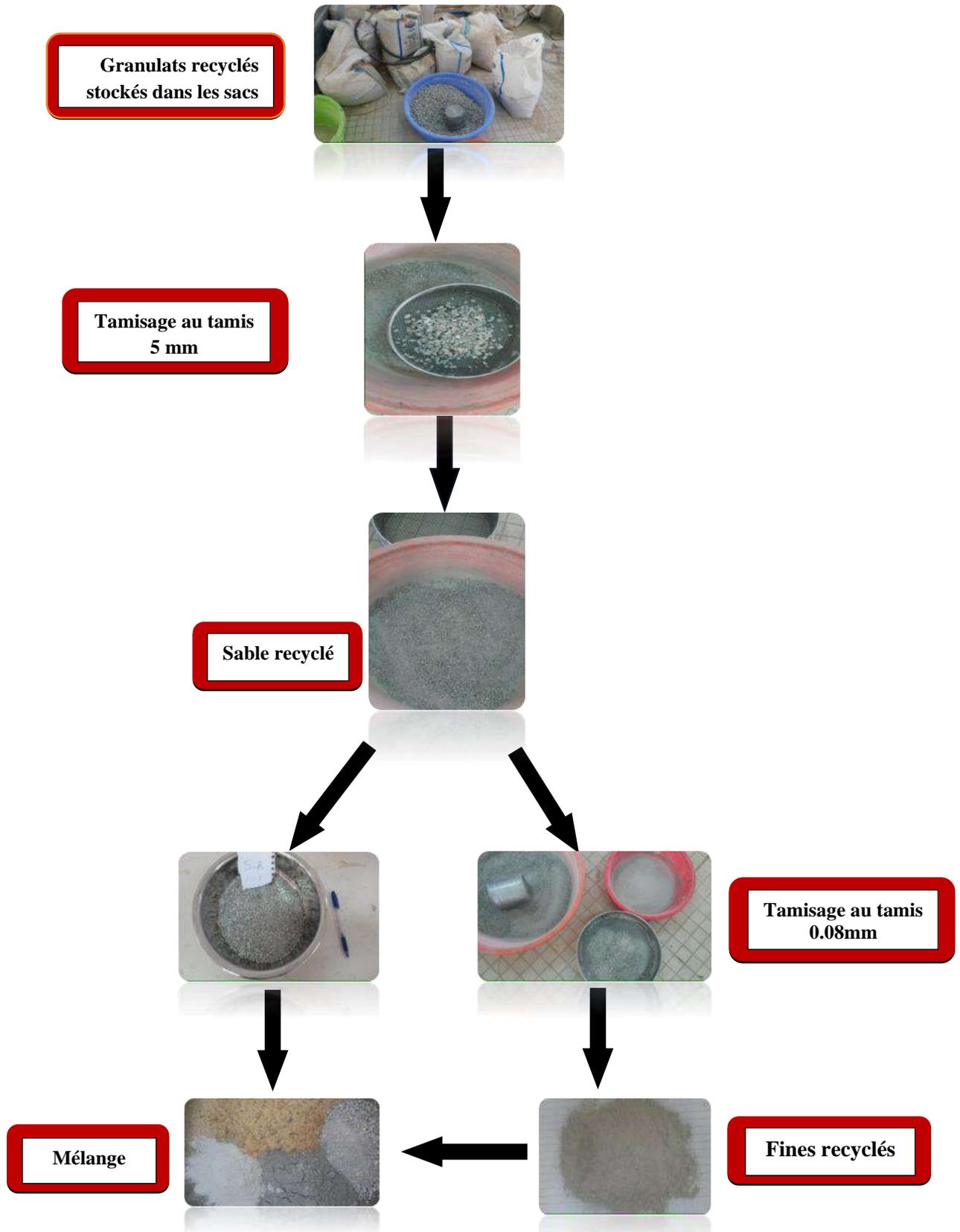


Figure III.3. Procédures de préparation de granulats recyclés (sable et fines)

III.4.2. Méthodes utilisées dans la caractérisation des matériaux

III.4.2.1. Sable

III.4.2.1.1. Masses volumiques

Les valeurs de densité apparente et absolue des divers granulats, qu'ils soient naturels ou recyclés, ont été déterminées conformément la norme NF P 18-555 [105].

III.4.2.1.2. Module de finesse

La détermination de l'analyse granulométrique par tamisage et le calcul du module de finesse (MF) ont été effectués en accord avec la norme NF P 18-560 [106].

III.4.2.1.2. Equivalent de sable (propreté)

Le but de cet essai est de déterminer la propreté du sable, en suivant la norme NF P 18-598 [107].

III.4.2.1.3. Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption a été évalué conformément à la norme NF P 18-555 [105]. Il est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon après 24 heures de trempage à 22°C.

III.4.2.1.5. Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a été effectuée à l'aide d'un instrument à effet de champ (ESM/AWD) modèle EVO 15 de la marque ZEISS. La tension appliquée était de 15 kV, et le grossissement maximal atteignait 1 000 000X.

Le MEB a été associé à un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) de la marque EDAX. Cette combinaison offre l'avantage de visualiser la structure des grains sur des coupes polies ou des pellets, de réaliser des analyses chimiques spécifiques pour chaque phase minérale, et de quantifier leurs proportions par le biais d'analyses d'images.

Ces essais ont été conduits en utilisant les modes électronique secondaire et électronique rétrodiffusé.

III.4.2.2. Caractérisation physique des fines

III.4.2.2.1. Mesure de la masse volumique absolue

La masse volumique absolue a été mesurée en utilisant la méthode du pycnomètre conformément à la norme EN1097-6 [108]. En raison de la nature des fines et de leur sensibilité potentielle à l'eau, le toluène ($0,87 \text{ g/cm}^3$) a été employé comme liquide non réactif dans cette procédure.

III.4.2.2.2. Mesure de la surface spécifique Blaine

La surface spécifique (Ss) a été mesurée en utilisant la méthode Blaine, qui évalue la finesse du matériau en mesurant le temps nécessaire à une quantité d'air pour traverser un lit de poudre compactée par un piston, dont les dimensions et la porosité sont préalablement connues. Cette méthode, essentiellement comparative, est conforme à la norme NF EN 196-6[109]. La surface spécifique est exprimée en cm^2/g .

III.4.2.3. Caractérisation chimique

Le MEB a été associé à un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS). Cette combinaison offre l'avantage de visualiser la structure des grains sur des coupes polies ou des pellets, de réaliser des analyses chimiques spécifiques pour chaque phase minérale, et de quantifier leurs proportions par le biais d'analyses d'images.

Tableau III.6. Essais de caractérisation des sables

Propriétés	Essais	Normes
Physiques	Analyse granulométrique	NFP 18-541
	Module de finesse	NF P 18-560.
	Masse volumique apparent et absolue	NF P 18-555
	Equivalent de sable	NF P 18-598 (1991)
	Absorption d'eau	NF P 18-555
Chimiques	EDX (compositions chimiques par Fluorescence X)	NF EN 196-2
Morphologiques	Microscopie électronique a balayage (MEB)	Modèle : JSM 6700F
Minéralogiques	Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)	Modèle : STA 449 F3

Tableau III.7. Essais de caractérisation des fines

Propriétés	Essais	Normes
Physiques	Surface spécifique Blaine	[NF EN 196-6]
	Masse volumique absolue	NF EN 1097-7
Chimiques	EDX (compositions chimiques par Fluorescence X)	NF EN 196-2
Morphologiques	Microscopie électronique a balayage (MEB)	Modèle : JSM 6700F
Minéralogiques	Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)	Modèle : STA 449 F3

III.4.3. Formulation et confection des éprouvettes

III.4.3.1. Les bétons de sable de dunes

Les proportions de ciment et de sable utilisées pour la fabrication du béton de sable de dunes sont conformes à celles du mortier normalisé selon EN 196, avec une proportion d'une partie

de ciment pour trois parties de sable. La détermination de la proportion d'eau a été réalisée à l'aide du test de maniabilité. La particularité du sable de dune réside dans ses grains fins, qui n'entrent pas dans la plage granulométrique spécifiée par la norme AFNOR NFP 18-541. Il était donc impératif d'ajuster la granulométrie du sable des dunes. Des tests approfondis ont été menés, aboutissant à la décision d'incorporer du sable recyclé comme additif pour rectifier la granulométrie du sable des dunes. Le mélange de référence est du sable de dunes, et le liant est du ciment CPJ-CEM II/A 42.5, avec un rapport E/C de 0,59.

Quatre formulations de bétons de sable de dunes ont été préparées et étudiées, désignées comme suit :

MSD : Béton de sable à base de sable de dunes.

MSDC I : Béton de sable à base de 60 % de sable de dunes et 40 % de sable recyclé.

MSDC II : Béton de sable à base de 50 % de sable de dunes et 50 % de sable recyclé.

MSR : Béton de sable à base de sable recyclé.

La composition de ces quatre formulations du Béton de sable est présentée dans le tableau III. 8 (série 1).

III.4.3.2. Les bétons de sable alluvionnaire

Une étude visant à remplacer le sable alluvionnaire par du sable recyclé et le ciment par de la poudre fine recyclée a été réalisée sur des mélanges composés de sable alluvionnaire (sable naturel) et de ciment Portland CPJ-CEM II/A 42.5. Les différentes compositions ont été obtenues à partir d'une composition de référence (témoin) dans laquelle les fractions volumiques de sable et d'eau sont fixées. Le mélange de référence est du sable alluvionnaire, et le liant est du ciment CPJ-CEM II/A 42.5, avec un rapport massique E/C de 0,53.

D'autres compositions ont été réalisées en remplaçant une certaine quantité de ciment par de la poudre fine recyclée (PFR), en maintenant le même volume que celui du ciment remplacé. Trois pourcentages de remplacement du ciment par la PFR ont été utilisés : 5 %, 10 % et 15 %. Le rapport volumique pâte/eau est resté constant pour toutes les compositions.

La composition de ces formulations des bétons est présentée dans le tableau III.8 (Série 2). Les échantillons de l'ensemble des bétons préparés (série 1 et série 2) ont des dimensions de 4 x 4 x 16 cm³. Le processus a commencé par un mélange à sec de sable et de ciment pendant 60 secondes. Par la suite, de l'eau a été introduite dans le mélange. Les moules ont ensuite été remplis en deux couches distinctes, chacune soumise à 30 secondes de vibration. Après une période de 24 heures pour le processus de durcissement, les éprouvettes ont été extraites de leurs moules et entièrement immergées dans de l'eau à une

température contrôlée de 25 ± 2 °C pendant une durée de 14 jours. Ensuite, ils ont été retirés de l'eau et exposés à des conditions de laboratoire caractérisées par une température de 30 ± 5 °C et un taux d'humidité de 25 ± 2 %.

Dans ce travail, six éprouvettes ont été utilisées par essai et par échéance.



Figure III.4. Eprouvettes des mélanges préparés.

Tableau III.8. Proportions des mélanges pour 1 m³

	Mixtures	Sable alluvionnaire (kg)	Sable de dunes (kg)	Sable recyclé (kg)	Ciment (kg)	Poudre fine recyclée (kg)	Eau (l)	E/C
Série 1	MSD	0,00	1385,62	0,00	461,87	0,00	272,51	0,59
	MSDC I	0,00	692,81	692,81	461,87	0,00	272,51	0,59
	MSDC II	0,00	831,37	554,25	461,87	0,00	272,51	0,59
	MSR	0,00	0,00	1385,62	461,87	0,00	272,51	0,59
Série 2	M-SA	1404	0,00	0,00	468	0,00	248.1	0,53
	M-SAF5	1404	0,00	0,00	444.6	23.4	248.1	0.53
	M-SAF10	1404	0,00	0,00	421.2	46.8	248.1	0.53
	M-SAF15	1404	0,00	0,00	397.8	70.2	248.1	0.53
	M1-SASRF0	1193.4	0,00	210.6	468	0,00	248.1	0,53
	M1-SASRF5	1193.4	0,00	210.6	444.6	23.4	248.1	0.53
	M1-SASRF10	1193.4	0,00	210.6	421.2	46.8	248.1	0.53
	M1-SASRF15	1193.4	0,00	210.6	397.8	70.2	248.1	0.53
	M2-SASRF0	1053	0,00	351	468	0,00	248.1	0,53
	M2-SASRF5	1053	0,00	351	444.6	23.4	248.1	0.53
	M2-SASRF10	1053	0,00	351	421.2	46.8	248.1	0.53
	M2-SASRF15	1053	0,00	351	397.8	70.2	248.1	0.53

III.4.4. Caractérisation du béton de sable à l'état frais

III.4.4.1. Essai d'ouvrabilité

Un bon béton doit non seulement être maniable à l'état frais, mais aussi développer une résistance suffisante. La maniabilité du béton peut être influencée par divers facteurs tels que le rapport eau/ciment, la proportion du mélange d'agrégats, la granulométrie des granulats, la taille des agrégats, le type de ciment, la température ambiante, etc.

Dans le cadre de ce travail, l'ouvrabilité des bétons est mesurée à l'aide du maniabilimètre LCLP, conformément à la norme NF 15-437. Cet essai permet d'estimer la fluidité du béton en mesurant le temps d'écoulement d'un béton ou d'un mortier frais soumis à des vibrations.



Figure III.5 : Maniabilimètre

III.4.5. Caractérisation du béton à l'état durcis

III.4.5.1. Essai de résistance à la compression

La résistance à la compression des éprouvettes a été déterminée à 28, 90 et 180 jours, conformément à la norme NF EN 196-1[110]. Des moules de dimensions 40 x 40 x 160 mm ont été utilisés pour évaluer la résistance à la compression. Les spécimens ont été positionnés entre deux plaques métalliques au centre de la machine, comme illustré dans la figure III.6, de manière à ce que la charge soit appliquée perpendiculairement aux faces des plaques.

La charge a été appliquée de manière continue et uniforme, sans choc. Pendant cet essai, le maximum de la charge supportée par chaque spécimen a été enregistré. La résistance à la compression a été calculée en divisant la charge maximale obtenue par la surface de la section transversale de l'éprouvette. Six éprouvettes ont été testées pour chaque type de béton, et donc les valeurs moyennes de la résistance à la compression issues de trois éprouvettes ont été prises en compte.



Figure III.6 : Dispositif de rupture en compression

III.4.5.2. Essai de traction par flexion

La résistance à la flexion, qui mesure la capacité d'un matériau à résister à la déformation sous une charge de flexion, est évaluée conformément à la norme EN 196-1[110]. Le dispositif de flexion trois points, illustré dans la figure III. 7, est composé de deux rouleaux espacés de 100 mm, sur lesquels est placée une éprouvette prismatique de dimensions 40x40x160 mm. Un troisième rouleau est équidistant des deux premiers et transmet une force F_f concentrée.

Six spécimens de chaque type de mélange ont été testés à l'âge de 28, 90 et 180 jours pour évaluer leur résistance à la flexion.



Figure III.7 : L'appareil de l'essai de flexion (3 points).

III.4.5.3. Essai de retrait

Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques conformément à la norme NF P 15-433 [111]. Après démoulage à 24 heures, trois éprouvettes par composition ont été placées dans un rétractomètre (Figure III. 8) équipé d'un comparateur permettant de mesurer le retrait. Les éprouvettes ont été conservées à l'air libre à une température de 25 à 30 °C. La variation de la longueur d'une éprouvette 4 x 4 x 16 cm³ par rapport à sa longueur initiale.

Pour déterminer la mesure du retrait dans cette étude, trois éprouvettes identiques ont été utilisées pour chaque composition et la moyenne a été calculée sur la base d'un programme prédéfini comprenant des mesures à 3, 7, 14, 21, 28, 60 et 90 jours.



Figure III.8: Rétractomètre

III.4.5.4. Densité et porosité par absorption d'eau des bétons

Les densités apparentes des bétons ont été mesurées à l'aide d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4 cm x 4 cm x 16 cm, conformément à la norme EN 1015-10 [112]. Ensuite, ces échantillons prismatiques ont été utilisés pour déterminer la porosité par absorption d'eau des bétons.

III.4.5.5. Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'observation de la microstructure du béton a été effectuée au moyen de la microscopie électronique à balayage (MEB).

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché d'abord à justifier le choix et la nature des matériaux utilisés, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation du sable de dunes et des granulats issus du béton recyclé. Par la suite, notre objectif est de présenter chaque élément constitutif du béton de sable étudié, en détaillant les méthodes employées pour caractériser chaque composant, en veillant à suivre les normes applicables. Nous avons abordé également les méthodes de formulation du béton, puis nous avons examiné les tests de caractérisation des bétons à l'état frais et durci.

Chapitre IV

Résultats et discussion

Résultats et discussion

IV.1. Introduction

L'étude des mécanismes physiques à l'origine du développement des propriétés des matériaux à base de ciment, tels que les bétons de sable et les bétons, dès les premiers stades de durcissement, représente un défi complexe. Cependant, la mesure de ces paramètres à un stade précoce revêt un intérêt considérable pour anticiper le comportement structurel [113, 114]. Ainsi, divers dispositifs sont disponibles pour surveiller les propriétés des bétons dès le moment de la prise, voire avant.

Les méthodes non destructives et destructives sont fréquemment employées pour étudier l'évolution des matériaux. Le comportement du béton est défini à partir de données expérimentales. Ce chapitre présente plusieurs compositions de bétons qui ont été testées afin de développer une compréhension approfondie des mécanismes physiques, mécaniques et rhéologiques à court et à long terme.

L'objectif de ce travail de recherche était d'évaluer l'impact de l'utilisation de granulats recyclés (sable recyclé (SR) et poudre des fines recyclées (PFR)) sur les propriétés d'un béton de sable à base de sable de dunes et de sable alluvionnaire sur les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques des bétons à l'état durci.

Les effets de l'ajout de sable recyclé et de la poudre fine recyclée sur les propriétés, incluant la résistance à la compression et à la flexion, le retrait de séchage, la perte en poids, la densité apparente et la porosité du béton de sable de dunes et alluvionnaire, sont exposés et discutés.

IV.2. Propriétés des sables utilisés

IV.2.1. Propriétés physiques

Ce travail repose sur l'utilisation de matériaux locaux provenant du sud de l'Algérie, en particulier le sable de dunes de la région de Ain beida dans la wilaya de Ouargla. Les résultats de la caractérisation physique de ce sable sont présentés dans le tableau IV.1, tandis que la courbe d'analyse granulométrique est illustrée dans la figure IV.1.

Les résultats révèlent que le sable de dune utilisé est très fin, présentant une granulométrie serrée et discontinue ($C_u = 1,9$, $C_c = 0,98$), avec une dimension maximale des gros grains de 0,5 mm et un diamètre des particules fines d'environ 0,04 mm. Son module de

finesse est de 1,04. De ce fait, il est recommandé de corriger la composition granulair e du sable de dunes pour se conformer aux normes spécifiées, et c'est dans ce contexte que le sable recyclé a été utilisé.

Le sable recyclé (0/4 mm) est obtenu par concassage et tamisage des déchets de béton. Ses caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau IV.1, avec la courbe d'analyse granulométrique illustrée dans la figure IV.1. Ce dernier est grossier avec une granulométrie uniforme ($C_u = 7,8$) et un étalement modéré ($C_c = 1,98$). Son module de finesse est de 3,05 et sa valeur équivalente est de 80,50 %.

Le tableau IV.1 met en évidence une absorption d'eau significativement plus élevée pour le sable recyclé par rapport au sable de dunes. Cette différence s'explique par la porosité accrue résultant de la présence de ciment dans le sable recyclé, ainsi que des fines issues du concassage des déchets de béton avec une proportion élevée ($> 5\%$) et une surface spécifique très élevée.

Le sable de dunes a été corrigé en ajoutant du sable recyclé. Des tests ont été réalisés pour déterminer les ratios nécessaires entre le sable de dunes et le sable recyclé pour la fabrication du béton de sable. Les résultats conduisent à l'adoption des pourcentages suivants : 60% SD + 40% SR et 50% SD + 50% SR, avec des valeurs de module de finesse respectives de 2,30 et 2,34, qui répondent aux exigences de la norme NFP 18-541, qui spécifie que le module de finesse du sable dans la plage autorisée doit être compris entre 2,2 et 2,8.

En ce qui concerne l'absorption, les résultats du tableau IV.1 montrent que le types de sables utilisés, à savoir le sable de dunes et le sable alluvionnaire, présentent une capacité d'absorption acceptable. La norme XP P 18-540 [115] recommande que le coefficient d'absorption A_b soit inférieur à 6 % pour les granulats destinés à la fabrication des bétons. Cependant, le sable recyclé montre une absorption supérieure à celle du sable de dunes. Malgré cela, la densité apparente et absolue des sables corrigés reste acceptable car elle est supérieure à celle du sable de dunes. L'équivalent de sable des sables corrigés indique également que les deux sables sont propres, avec un équivalent de sable ES de 86,8% et 85,8%, respectivement.

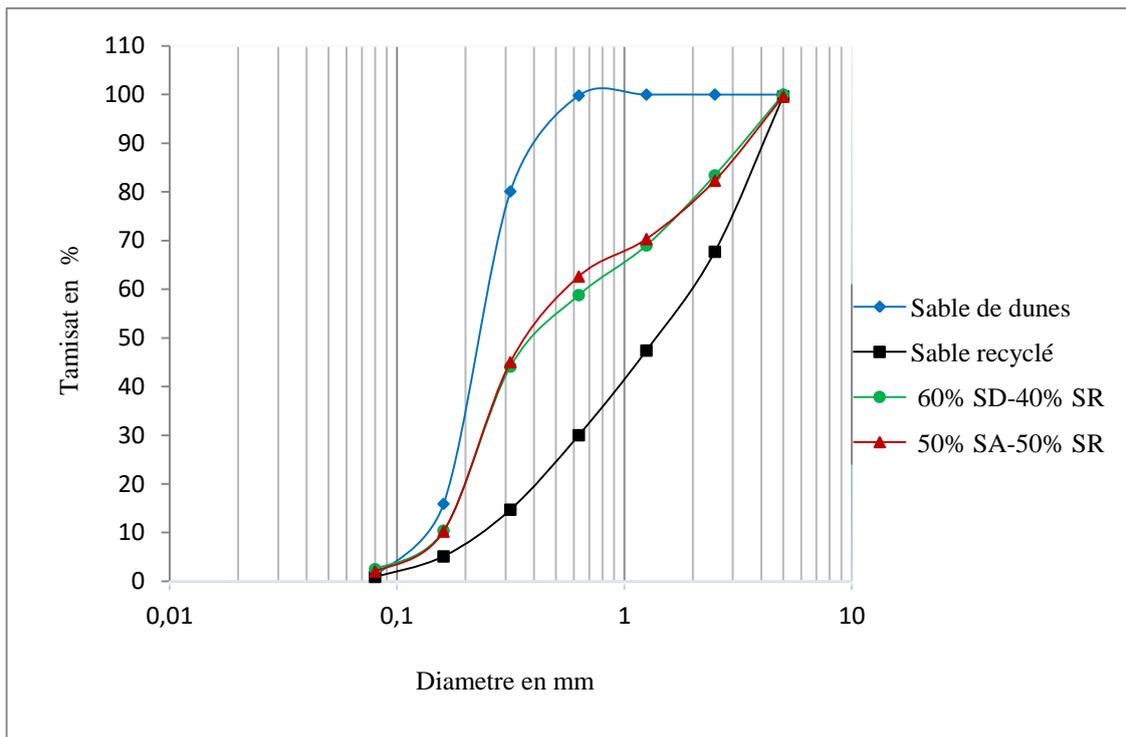


Figure IV.1. Distribution granulométrique des sables utilisés

Tableau IV.1. Propriétés physiques des sables utilisés.

	Sable de dunes (SD)	Sable recyclé (SR)	Sables corrigés	
			60% SD + 40% SR	50% SD + 50% SR
Densité absolue (g/cm ³)	2,67	2,50	2.66	2.58
Densité apparente (g/cm ³)	1,63	1.5	1.58	1,57
Absorption de l'eau (%)	3,00	8,20	5.08	5.60
Module de finesse	1,04	3,05	2,30	2,34
Equivalent de sable (%)	91,20	80,50	86.8	85.8

IV.2.2. Propriétés morphologiques

La figure IV.2 présente des micrographies électroniques à balayage du sable de dunes à un grossissement de 200 micromètres. La surface rugueuse qui entoure les particules de sable de dunes suggère une origine fluviale. Ces particules sont de forme sphérique et plus arrondies que les grains éoliens typiquement associés au sable de dunes [116, 117].

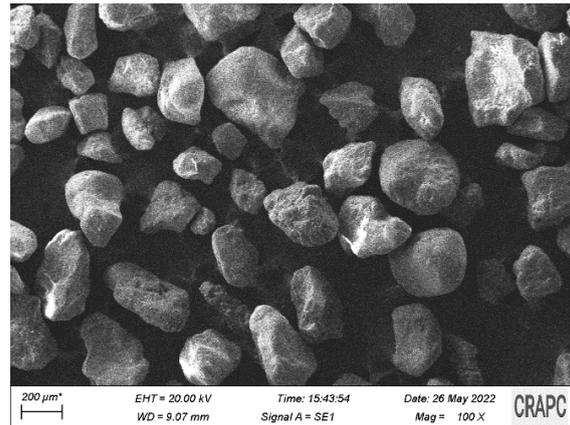


Figure IV.2 : Image micrographique électronique à balayage du sable de dunes

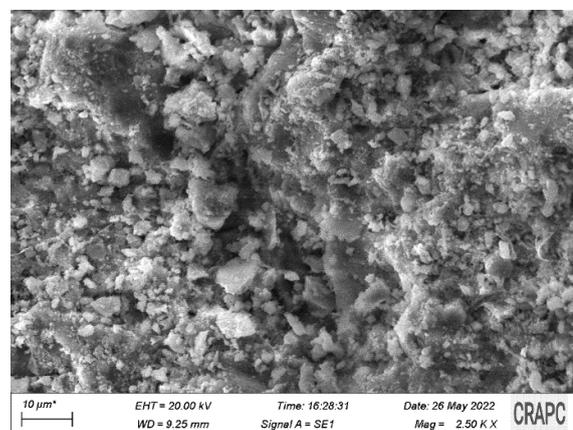
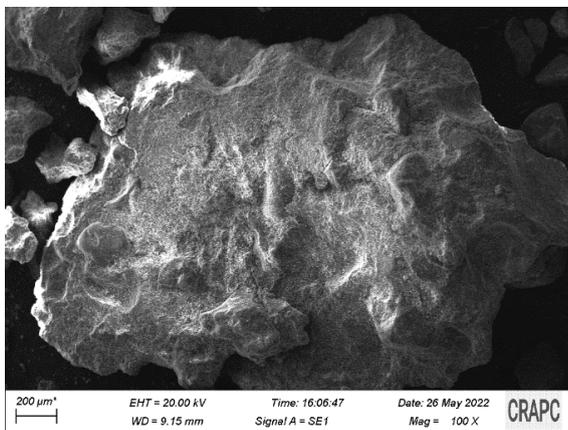
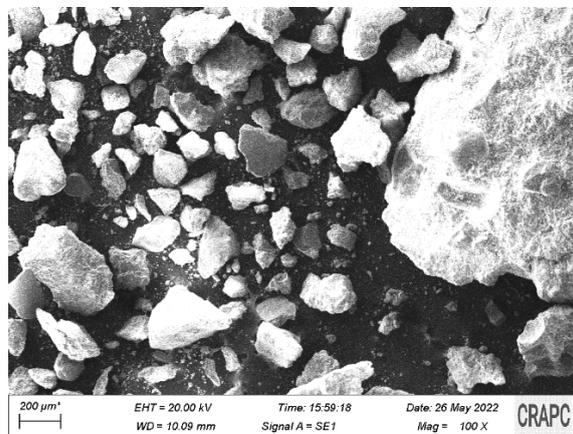


Figure IV.3 (a,b et c) : Images micrographique électronique à balayage du sable recyclé

Les figures IV.3a, b et c présentent les micrographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable recyclé (SR). On remarque que la forme des agrégats de SR est irrégulière, avec certaines particules plus anguleuses, exhibant des bords et des coins bien définis. Cette caractéristique pourrait être bénéfique en termes de remplissage des pores dans la matrice cimentaire. En observant la figure IV.3, on peut également noter que la

texture de surface des grains de SR est extrêmement poreuse et rugueuse. Cette texture peut contribuer à une augmentation de la surface associée à l'interface entre les agrégats et l'ancien mortier.

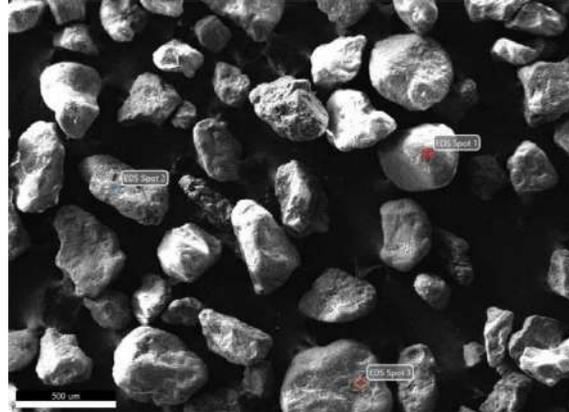


Figure IV.4. EDS du sable de dunes

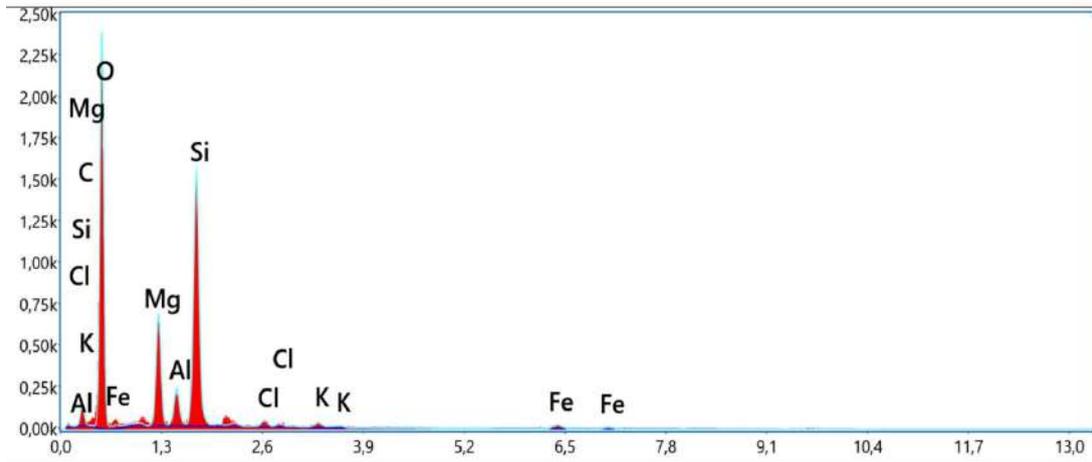


Figure IV.4 (a) EDS du sable de dunes pour le point 1

Tableau IV.2 (a) Résultats quantitatifs des composants du sable de dunes pour le point 1

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	8.70	13.29	6.51	16.38	0,0151	1.0764	0.1615	1.0000
O K	54.00	61.90	159.89	8.13	0,2037	1.0305	0.3660	1.0000
MgK	10.34	7.80	55.43	7.02	0,0552	0.9522	0.5589	1.0038
AlK	3.37	2.29	18.91	8.81	0,0188	0.9170	0.6041	1.0061
SiK	20.72	13.53	138.29	5.04	0,1368	0.9371	0.7032	1.0016
ClK	0.78	0.40	4.05	15.41	0,0057	0.8730	0.8248	1.0069
K K	0.70	0.33	3.31	23.29	0,0057	0.8687	0.9241	1.0135
FeK	1.39	0.46	3.39	15.40	0,0121	0.7883	1.0088	1.0871

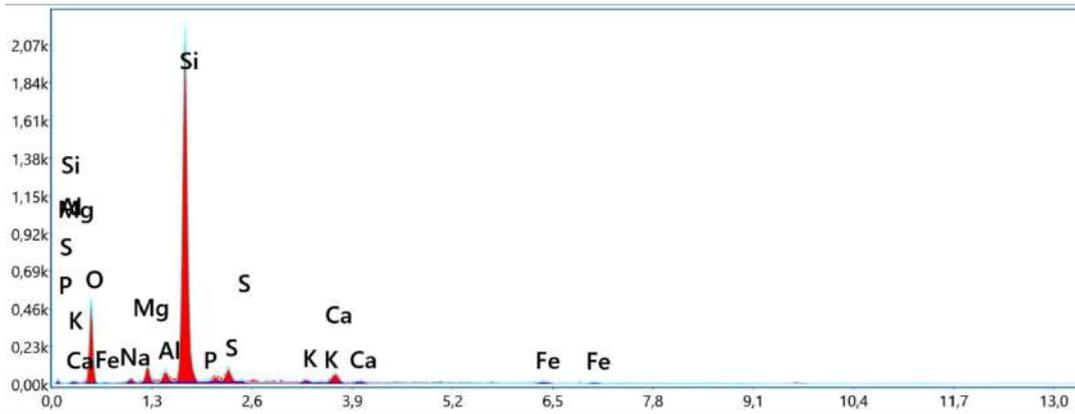


Figure IV.4 (b) EDS du sable de dunes pour le point 3

Tableau IV.2b. Résultats quantitatifs des composants du SD pour le point 3

Élément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	32.75	46.90	33.21	10.48	0,0897	1.0682	0.2563	1.0000
NaK	1.26	1.25	2.16	21.25	0,0056	0.9718	0.4539	1.0031
MgK	2.77	2.61	7.96	9.91	0,0168	0.9887	0.6104	1.0055
AlK	2.06	1.75	6.75	10.75	0,0142	0.9524	0.7190	1.0095
SiK	49.74	40.57	186.93	3.67	0,3919	0.9736	0.8076	1.0020
P K	0.71	0.53	1.36	19.20	0,0035	0.9353	0.5324	1.0034
S K	4.00	2.85	8.89	11.41	0,0242	0.9539	0.6316	1.0036
K K	1.18	0.69	2.53	27.56	0,0092	0.9034	0.8523	1.0132
CaK	3.55	2.03	6.75	12.41	0,0295	0.9200	0.8920	1.0110
FeK	1.98	0.81	2.26	19.84	0,0170	0.8208	0.9912	1.0549

Figure IV.4. EDS du SD dispersion d'énergie (EDS) de la surface du sable de dunes (SD). L'analyse révèle une quantité significative de silice (49,74 %), une petite quantité de calcium (3,55 %) et des pourcentages faibles d'autres oxydes tels que Al_2O_3 (2,06 %) et Fe_2O_3 (1,98 %) (tableau IV.2a et b). Ces résultats indiquent que le sable étudié est principalement composé de silice, avec la présence de quelques oxydes mineurs qui pourraient être considérés comme des impuretés.

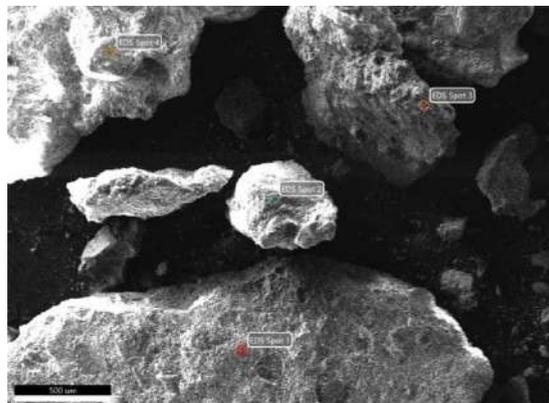


Figure IV.5. EDS du sable recyclé

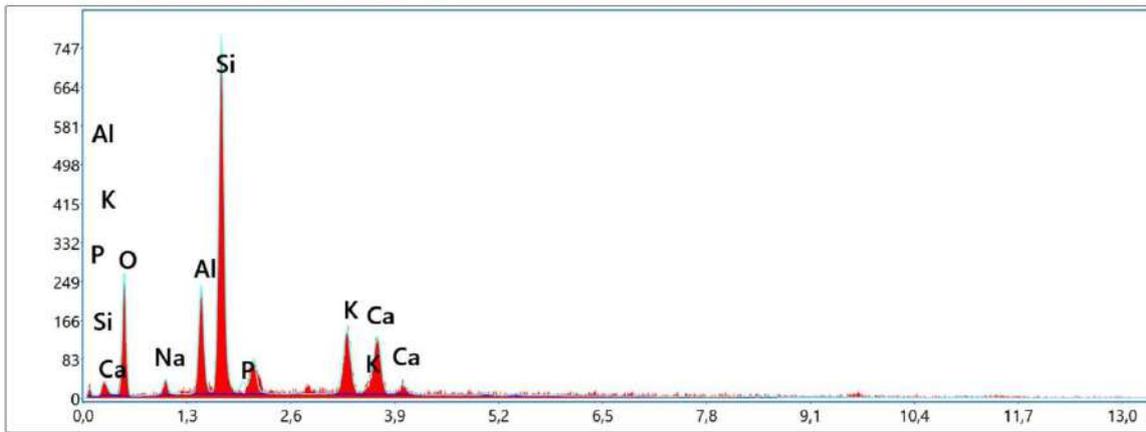


Figure IV.5 (a) EDS du sable recyclé Point 2

Tableau IV.3 (a) Résultats quantitatifs des composants du sable recyclé pour le point 2

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	35.02	50.88	17.15	11.91	0,0700	1.0750	0.1860	1.0000
NaK	2.33	2.35	2.39	18.84	0,0093	0.9781	0.4069	1.0025
AlK	9.12	7.86	19.43	7.03	0,0617	0.9588	0.7008	1.0066
SiK	30.10	24.91	68.12	5.12	0,2152	0.9802	0.7268	1.0035
P K	1.52	1.14	2.19	11.35	0,0086	0.9417	0.5994	1.0056
K K	10.40	6.18	15.76	7.91	0,0866	0.9098	0.8982	1.0193
CaK	11.51	6.68	14.55	7.47	0,0955	0.9265	0.8904	1.0059

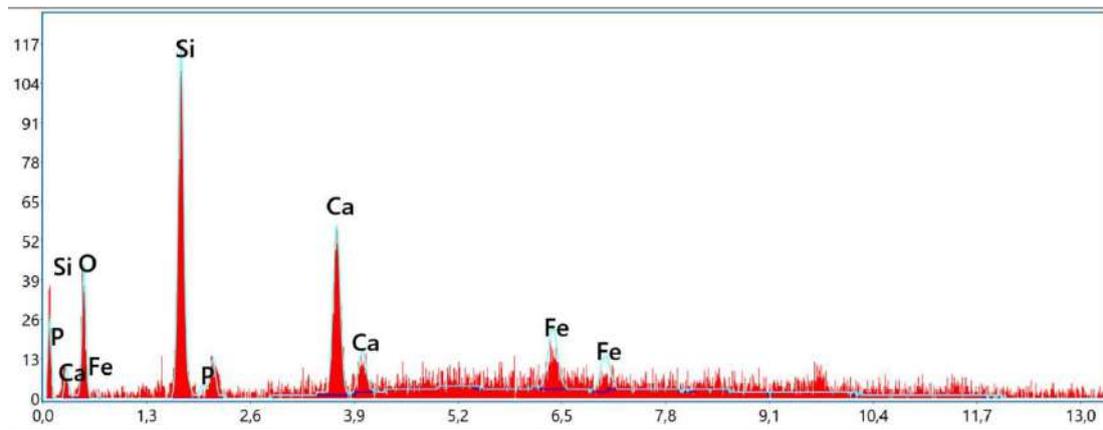


Figure IV.5 (b) EDS du sable recyclé Point 4

Tableau IV. 3 (b) Résultats quantitatifs des composants du sable recyclé pour le point 4

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	29.94	50.07	2.90	16.62	0,0605	1.1067	0.1826	1.0000
SiK	23.77	22.64	10.43	7.59	0,1684	1.0118	0.6980	1.0033
P K	1.24	1.07	0.38	16.80	0,0076	0.9724	0.6257	1.0055
CaK	24.59	16.41	6.71	7.49	0,2249	0.9582	0.9418	1.0139
FeK	20.46	9.80	3.01	14.09	0,1742	0.8568	0.9777	1.0166

Une analyse de la surface du sable recyclé (SR) par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) (Figure IV.5 a et b) a révélé la présence de silicium (30,10 %), de calcium (11,51 %) et d'aluminium (9,12 %). Ces quantités peuvent varier d'un point à l'autre, probablement en relation avec l'origine du béton de base démolé. La présence d'une ancienne couche de mortier attachée aux particules de SR pourrait expliquer ces différences. Ces résultats indiquent que le SR contient une quantité significative de matériau cimentaire. Ces observations sont cohérentes avec des études antérieures [118, 119].

IV.3. Propriétés des bétons de sable de dunes à l'état frais

IV.3.1. Consistance des bétons de sable

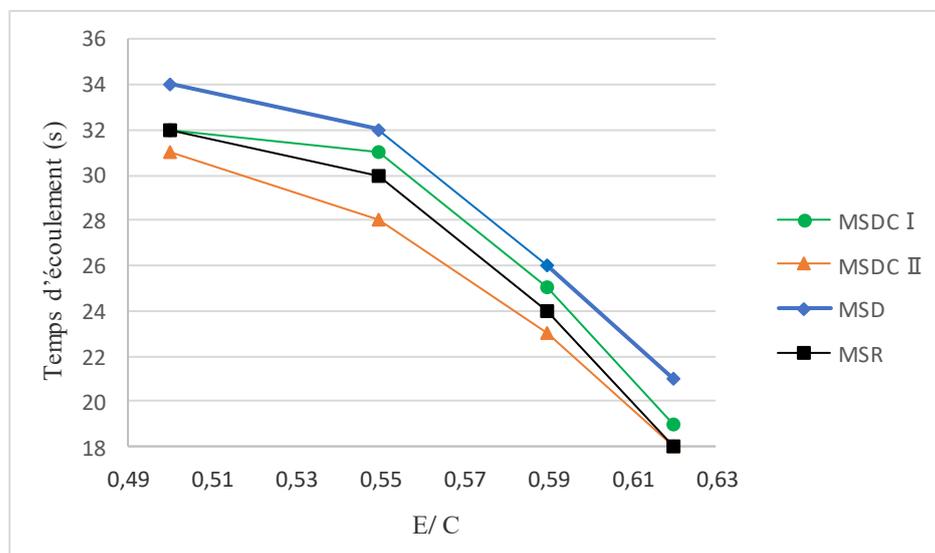


Figure IV.6. Temps d'écoulement LCPC des bétons de sable en fonction du rapport E/C.

Le test a été réalisé conformément à la norme européenne EN 1015-3. La norme spécifie que le temps d'écoulement pour un mortier ou un béton de sable de consistance plastique doit être compris entre 20 et 30 secondes. L'essai de consistance mesure la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une fluidité spécifique du béton de sable frais (figure IV.6).

Les résultats indiquent que les bétons contenant du sable recyclé ont une demande en eau plus faible que ceux basés sur du sable de dunes à 100 %. L'incorporation du sable recyclé (SR) à des pourcentages de 40 %, 50 % et 100 % réduit la teneur en eau requise en raison de l'effet de remplissage. Les particules fines des agrégats recyclés remplissent les vides entre les particules de sable plus grandes, ce qui entraîne une diminution de la teneur en eau requise pour le mélange [18]. Certains déchets peuvent réduire l'ouvrabilité en raison de leur

absorption d'eau [122]. Toutefois, l'effet de remplissage contrebalance ces effets et entraîne une diminution de la teneur en eau.

L'ensemble des bétons ont le même rapport volumétrique et donc la même teneur en ciment. Après l'incorporation de granulats recyclés, le rapport eau/ciment diminue. La diminution des besoins en eau et la diminution du rapport eau/ciment qui en résulte peuvent suggérer une amélioration des performances mécaniques du béton [121]. Cependant, il convient de noter que les bétons contenant 100 % de SR ont nécessité plus d'eau pour atteindre la même consistance que les bétons de sable contenant 40 % et 50 % de SR. L'augmentation des fines a amélioré la plasticité des bétons, ce qui est cohérent avec les résultats de Silva et al [122], Braga et al [21] et Oliveira et al [123]. Ces auteurs ont observé que l'augmentation de la quantité de granulats fins diminuait le besoin en eau pour obtenir la même consistance.

L'augmentation du rapport eau-ciment observée dans le béton à base de 100 % de sable de dune peut être attribuée à la valeur plus faible du module de finesse du sable de dune. Cette affirmation est cohérente avec les résultats de recherche d'Al-Harthy et al. et Belferrag et al. [124, 7], à savoir que lorsque la teneur en sable de la dune dépasse 50 %, l'ouvrabilité diminue. De même, Abu Seif [125] a rapporté que l'ouvrabilité du béton de dunes est satisfaisante lorsque le rapport ciment/sable est d'au moins 1:2 et que la teneur en sable de dune ne dépasse pas 70 % du volume total de granulats fins.

Afin d'éliminer l'effet de l'eau sur le retrait des bétons étudiés, nous avons maintenu le même rapport eau/ciment de 0.59 pour les bétons de sable de dunes, et un rapport de 0.53 pour les autres mélanges.

IV.2.3. Propriétés mécaniques des bétons de sable de dunes

IV.2.3.1. Résistance à la compression

La figure IV.7 montre l'évolution de la résistance à la compression des mélanges au cours du temps. La résistance à la compression des bétons fabriqués à partir de 100% de sable recyclé (MSR) et de 100% de sable de dunes (MSD) est significativement plus faible que celle des bétons à base de sable corrigé (MSDC I et MSDC II) par les pourcentages suivants : 60% SD+40% SR et 50% SD+50% SR respectivement.

Parmi les bétons, celui fabriqué avec 100 % de sable recyclé (MSR) présente la résistance à la compression la plus faible. La diminution de la résistance est attribuée à la forte absorption d'eau et à la porosité causée par la nature des agrégats recyclés. Malešev et al [126]

ont mené une étude sur les propriétés du béton durci avec différents pourcentages de remplacement du GBR et ont constaté que la résistance diminuait avec l'augmentation de la teneur en GBR.

Les faibles valeurs de résistance enregistrées pour le béton 100 % sable de dunes, par rapport aux bétons MSDC I et MSDC II, sont attribuées à l'augmentation de la surface des granulats fins qui nécessitent plus de ciment pour couvrir la surface des granulats. Penacho et al [127] ont également rapporté des résultats similaires.

À 28 jours, la résistance à la compression des mélanges MSDC I et MSDC II a augmenté de 29,14 % et 36,14 % respectivement, par rapport aux mélanges MSD. La résistance à la compression continue d'augmenter au-delà de 28 jours, en particulier pour le mélange MSDC I, avec une augmentation de 56,25 % et 63,69 %, et une augmentation de 43,18 % et 50 % pour MSDC II par rapport aux mortiers MSD respectivement à 180 jours.

L'augmentation de la résistance des bétons MSDC I et MSDC II peut être attribuée à l'effet de correction du sable de dunes par du sable recyclé provenant de déchets de béton. Il a été découvert que le sable de dunes est très fin et à une surface spécifique élevée par rapport au mélange du sable de dunes et du sable recyclé. Ce sable recyclé réduit la surface spécifique du mélange et augmente la compacité du béton de sable durci par l'effet de remplissage. Par conséquent, la rigidité de la structure du béton augmente.

L'augmentation observée après 28 jours pour les bétons MSDC I et MSDC II est attribuée au durcissement interne en cours en présence d'eau interstitielle dans la matrice du béton, qui est dérivée d'agrégats recyclés. Les caractéristiques d'absorption d'eau des agrégats recyclés indiquent qu'ils absorbent plus d'eau que les agrégats naturels. La quantité d'eau interstitielle contribue à la formation de silicate de calcium hydraté supplémentaire pendant l'hydratation des particules de ciment dans la matrice nouvelle/ancienne et la réaction pouzzolanique [121].

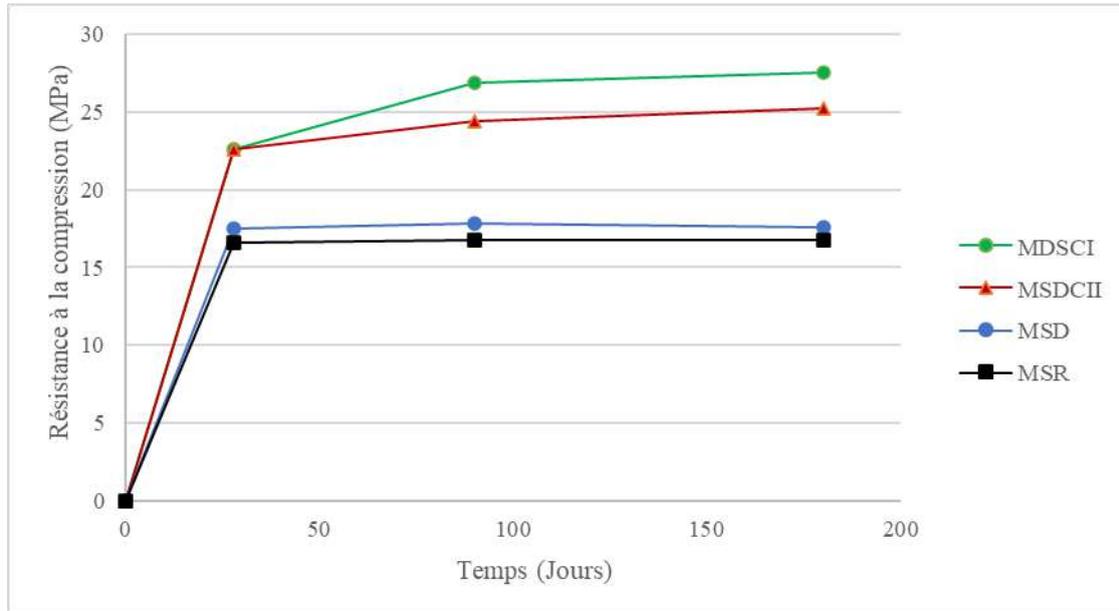


Figure VI.7. Résistance à la compression des mélanges MSDC I, MSDC II, MSD et MSR.

IV.2.3.2. Résistance à la flexion

La figure IV.8 présente la résistance à la flexion des différents bétons après 28, 90 et 180 jours. Les résultats sont la moyenne de trois essais. Il est évident que la résistance à la flexion des bétons contenant 40 % et 50 % de sable recyclé a augmenté à 28 jours par rapport au béton témoin (MSD). Entre 28 et 180 jours, la résistance à la flexion des bétons MSDC I, MSDC II et MSD a légèrement augmenté d'environ 3,34 %, 5,45 % et 8,75 %, respectivement. Cependant, le MSR a montré une diminution de 10,34 % par rapport à la résistance de 28 jours. Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de remplissage. La correction de la taille des particules conduit à des sables plus homogènes, et la présence éventuelle de ciment non hydraté complète l'hydratation lors de la préparation de nouveaux mortiers. Les agrégats fins remplissent les vides entre les gros agrégats de sable, augmentant ainsi la compacité du béton [121].

Par conséquent, on peut noter que l'incorporation d'agrégats recyclés et la correction granulométrique du sable de dunes améliorent la performance mécanique du béton de sable de dunes. Ainsi, la résistance à la flexion augmente pour le mélange MSDC I de 71,42 % et 87,5 %, et pour le béton de sable MSDC II de 57,14 % et 71,87 % par rapport aux bétons MSD respectivement à 28 jours. La résistance à la flexion continue d'augmenter jusqu'à 180 jours avec 63,15 % et 113,8 % pour MSDC I et 52,63 % et 100 % pour MSDC II par rapport à MSD et MSR respectivement. Le MSDC I donne les meilleurs résultats.

À partir de la figure IV.8, on peut constater une légère diminution de la résistance à la flexion de 28 à 180 jours pour le mélange MSR, où cette diminution des forces était liée à des microfissures internes aux éprouvettes. On peut donc noter que l'incorporation de granulats recyclés avec le sable de dunes confère aux bétons de meilleures performances mécaniques.

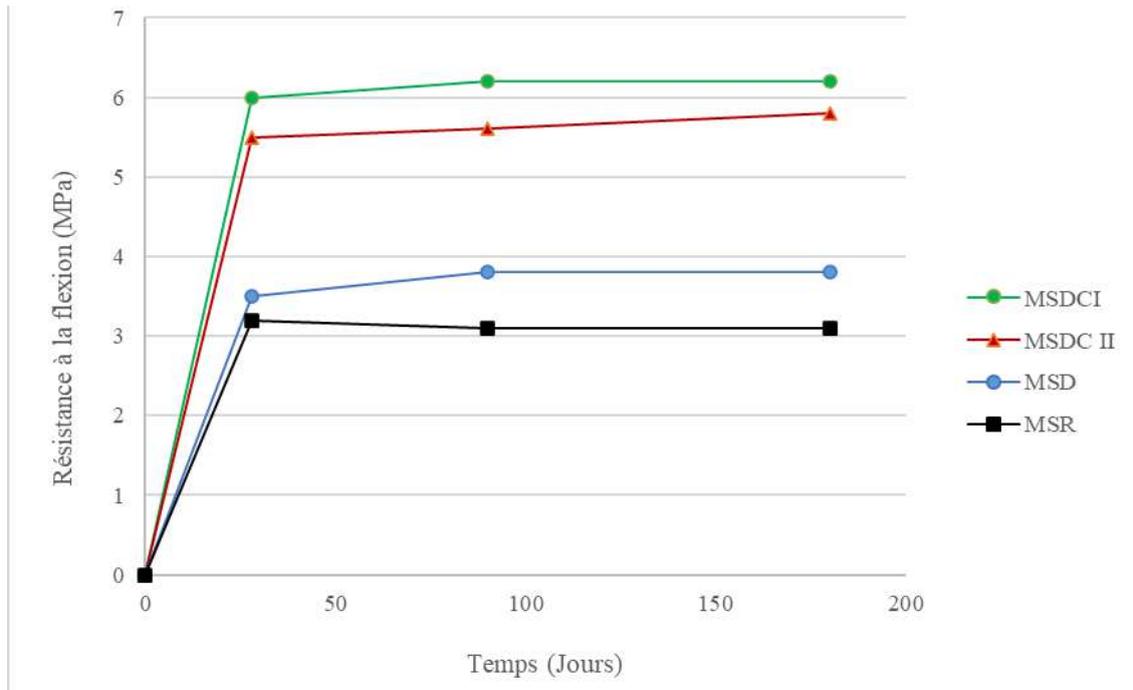


Figure. IV.8. Résistance à la flexion des mélanges MSDC I et MSDC II, MSD et MSR.

IV.2.4. Propriétés physiques des bétons de sable de dunes

IV.2.4.1. Porosité et densité apparente

La figure IV.9 illustre la relation inverse entre la porosité due à l'absorption d'eau et la densité dans différents types de mélanges étudiés. Plus la densité augmente, plus la porosité diminue. Les résultats montrent également que les bétons MSD ont une augmentation de porosité de 2,4 % et 4,41 %, tandis que les mélanges MSR ont une augmentation de 6,6 % et 8,76 % par rapport aux bétons de sable MSDC I et MSDC II. Cette augmentation est attribuée à la surface spécifique plus élevée du sable de dunes et du sable recyclé.

Plusieurs chercheurs, dont Bendimerad et al [130] et Pedro et al [129], ont observé et démontré que l'utilisation de sable de démolition dans la production de béton génère de nombreux pores. De plus, Bravo et al [130] ont rapporté que l'augmentation de la porosité du béton de sable recyclé (MSR) est due à la nature du sable de démolition, qui augmente le pourcentage de vides dans la composition, conduisant à une augmentation significative de la

porosité. Selon Alexandroudou et al [131], une liaison insuffisante entre les agrégats recyclés et la pâte de ciment entraîne une augmentation de la porosité du béton.

La densité sèche apparente des bétons de sable, préparés avec des pourcentages variables de 0%, 40%, 50% et 100 % de SR (Fig. IV.9), indique une augmentation de la densité pour ceux contenant du GBR par rapport au béton témoin (MSD). De plus, le béton préparé avec 100 % de sable recyclé (MSR) a enregistré la densité la plus faible. L'augmentation de la densité des bétons MSDC I et MSDC II, préparés avec SD et SR, est attribuée au réarrangement de la structure granulaire entre le sable de dunes et le sable recyclé. Cela se produit parce que les microéléments du sable de dunes remplissent les espaces entre les grains du sable de démolition, donnant un matériau plus compact et des densités plus élevées, par conséquent, diminuant la porosité des bétons.

Plusieurs études sont arrivées à la même conclusion. Jessus et al. [121] ont démontré que le mortier fabriqué avec 20 % de granulats de béton recyclés présentait une porosité inférieure de 10 % à celle du mortier de référence. Farinha et al. [132] ont observé une tendance similaire avec l'incorporation de déchets sanitaires.

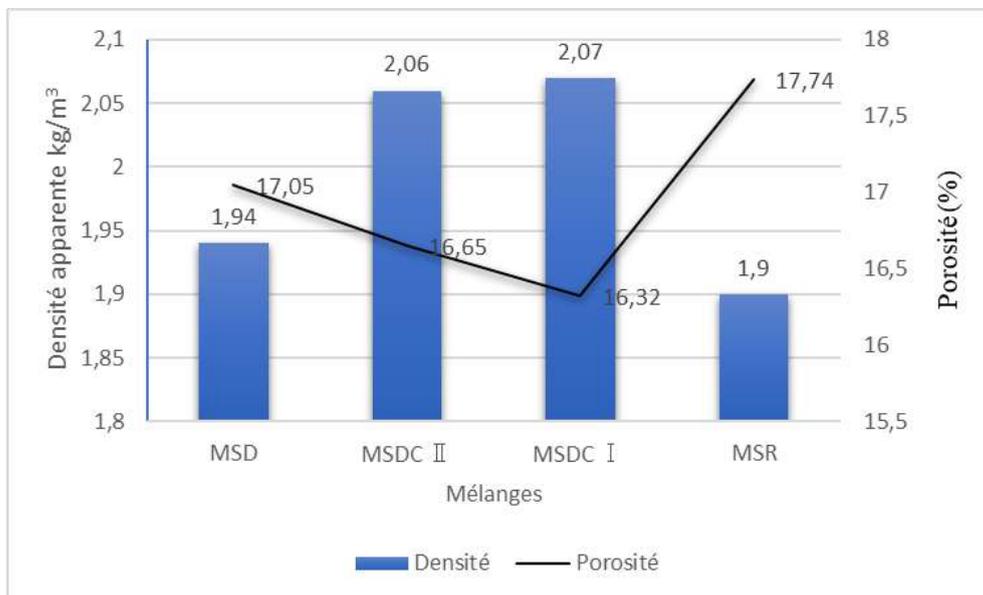


Figure IV.9. Densité et porosité en fonction de l'âge des bétons MSDC I, MSDC II, MSD et MSR.

IV.2.4.2. Perte en poids

La Figure IV.10 illustre la perte de poids des bétons de sable étudiés après 90 jours de cure. Il est noté que les mélanges MSDC I et MSDC II ont connu une perte de poids plus significative que le mélange MSD. Cette disparité s'explique par le fait que les mélanges MSD présentent une surface spécifique plus importante, entraînant une consommation accrue d'eau pendant la prise. Cela minimise la perte de poids par rapport aux mélanges à base de sable corrigé.

La nature poreuse des déchets de béton dans les échantillons contenant du sable recyclé conduit à la formation de vides à travers des microfissures, induisant ainsi une perte d'eau et une réduction du poids du béton durci. La perte de masse augmente proportionnellement avec le pourcentage de sable recyclé, et le béton à base de sable recyclé subit une perte de masse plus marquée que les autres mélanges. Cette augmentation de la perte de masse est vraisemblablement attribuable à la présence d'eau provenant du béton source (béton usagé), qui s'évapore et entraîne une perte supplémentaire.

Selon Li et al. [133], le sable recyclé était saturé avant d'être incorporé au mélange, et cette eau s'évapore lors du séchage du béton, engendrant une perte de masse supplémentaire.

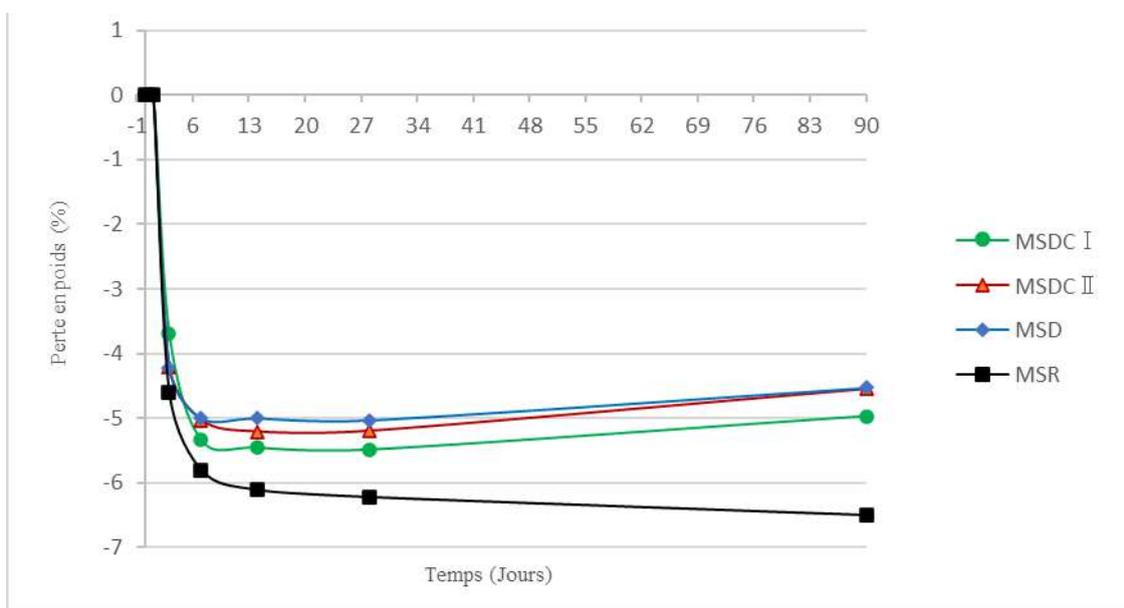


Figure IV.10. Perte de poids en fonction de l'âge pour les mélanges MSDC I, MSDC II, MSD et MSR.

IV.2.5. Propriétés rhéologiques des bétons de sable de dunes (retrait de séchage)

La Figure IV.11 présente le comportement du retrait de séchage des mélanges contenant du sable de dune et des granulats de béton recyclé. Les résultats révèlent que les bétons de sable MSDC I et MSDC II présentent des comportements similaires, avec une augmentation rapide du retrait de séchage à partir d'un jeune âge, suivi d'une stabilisation après 28 jours, en particulier pour les mélanges MSD et MSR. Ces variations dimensionnelles coïncident avec la perte d'eau par évaporation [134].

Plusieurs études antérieures [135, 7, 20, 136] ont indiqué un retrait élevé pour les mixtures MSD et MSR. La Figure IV.11 montre que la correction granulométrique réduit le phénomène de retrait de séchage. À 90 jours, la diminution du retrait de séchage pour les mixtures MSDC I et MSDC II par rapport au béton de sable de dunes et au béton de sable recyclé est de 57,82 % et 65,56 % pour le MSDC I, et de 57,14 % et 65,56 % pour le MSDC II, respectivement.

La réduction du retrait s'explique par la correction de la taille des grains du sable de dunes grâce à l'utilisation de sable recyclé, améliorant ainsi son module de finesse. Belferrag et al. [7] ont également constaté que la correction de la granulométrie du sable de dunes par l'ajout de sable de rivière a un effet positif sur le phénomène de retrait de séchage.

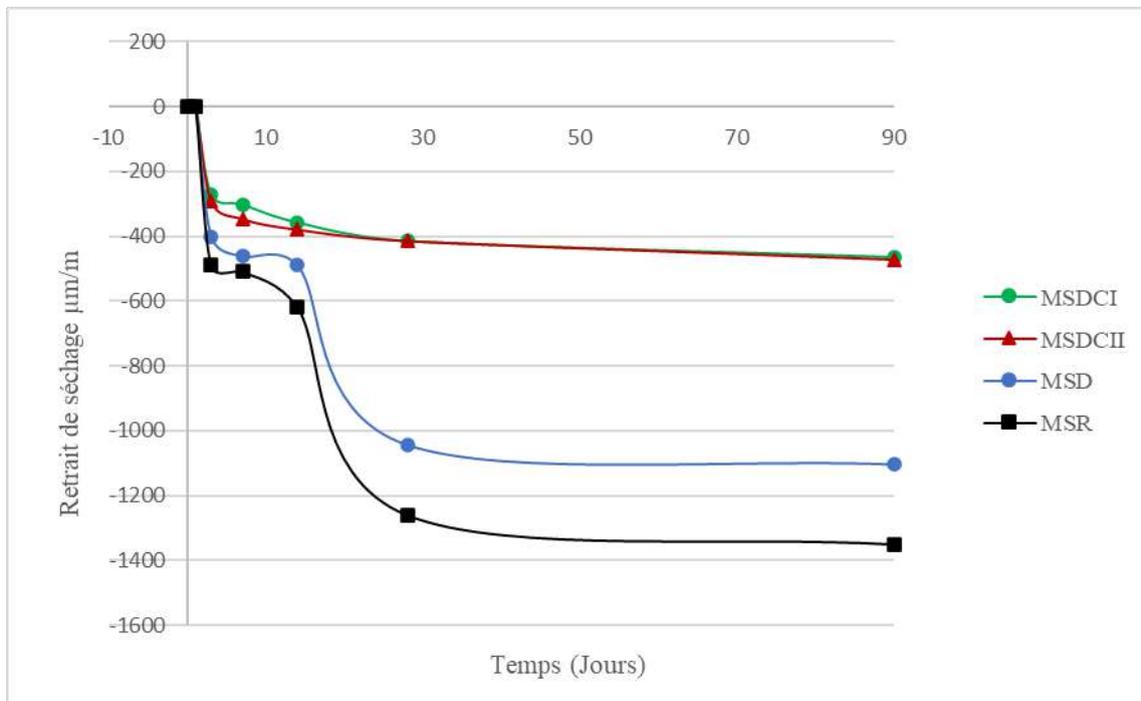


Figure IV.11. Retrait en fonction de l'âge des mélanges MSDC I, MSDC II, MSD et MSR.

IV.2.6. Observations par MEB des bétons de sable étudiés

Les Figures IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15 exposent les images issues de la Microscopie Électronique à Balayage (MEB) des quatre mélanges à l'étude. Ces visualisations confirment les résultats obtenus au cours des expériences précédentes. Les Figures IV.12 et IV.13 révèlent que les bétons MSDC I et MSDC II présentent une cohésion supérieure et moins de fissures que les autres, apparaissant homogènes et dépourvus de vides. En revanche, le béton composé à 100 % de sable de dunes (Fig. IV.14) semble afficher une concentration en ciment plus faible. L'échantillon présente plusieurs cas de grains déchirés, suggérant une concentration en ciment réduite conduisant à une adhérence médiocre. De plus, la forme arrondie des grains de sable de dunes pourrait avoir un impact négatif sur l'adhérence.

La Figure IV.15 (d) montre que le béton élaboré à partir de 100 % de sable de démolition présente des fissures et des pores, expliquant en partie la réduction de la résistance mécanique et l'augmentation du retrait observés dans le béton fabriqué avec du sable recyclé.

On peut conclure que la correction de la distribution granulométrique a un effet positif sur l'amélioration des propriétés du béton à base de sable de dunes étudié

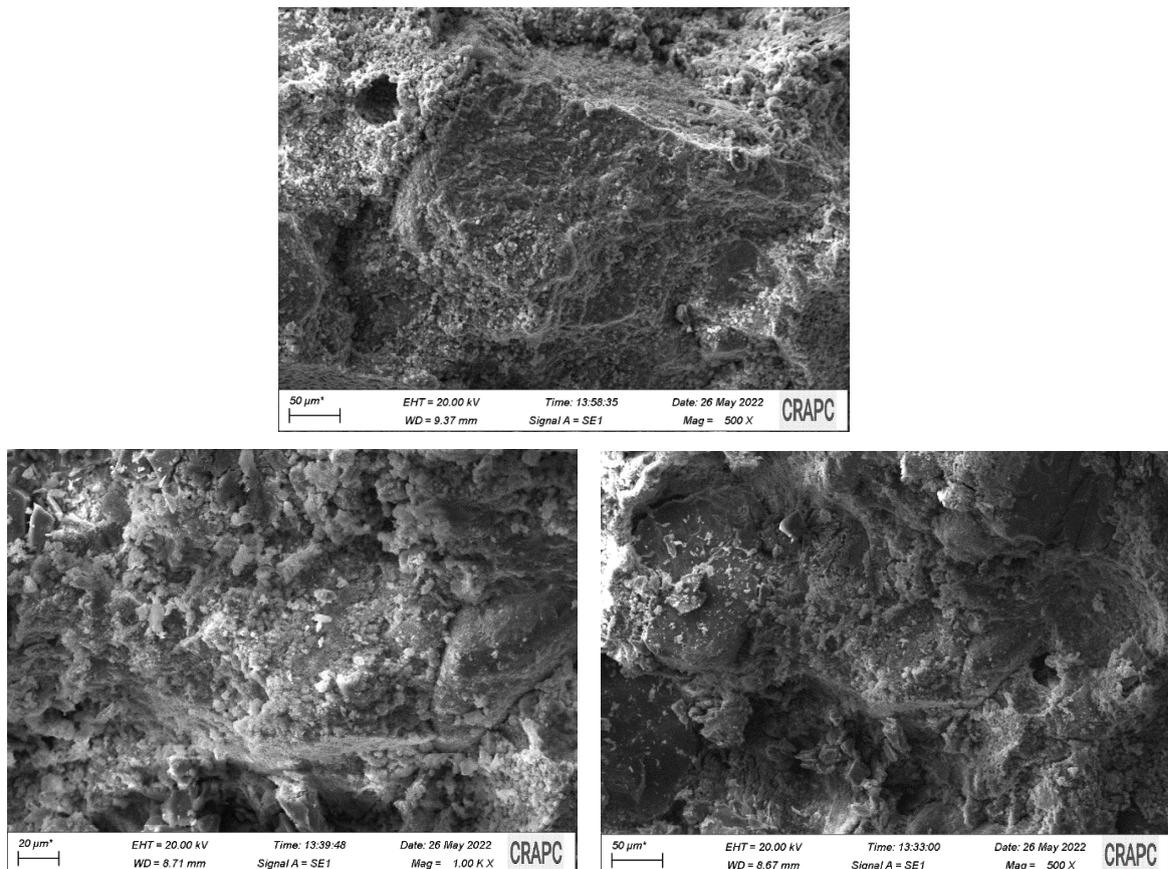


Figure IV.12 (a,b et c) Image par MEB du mélanges MSDC I

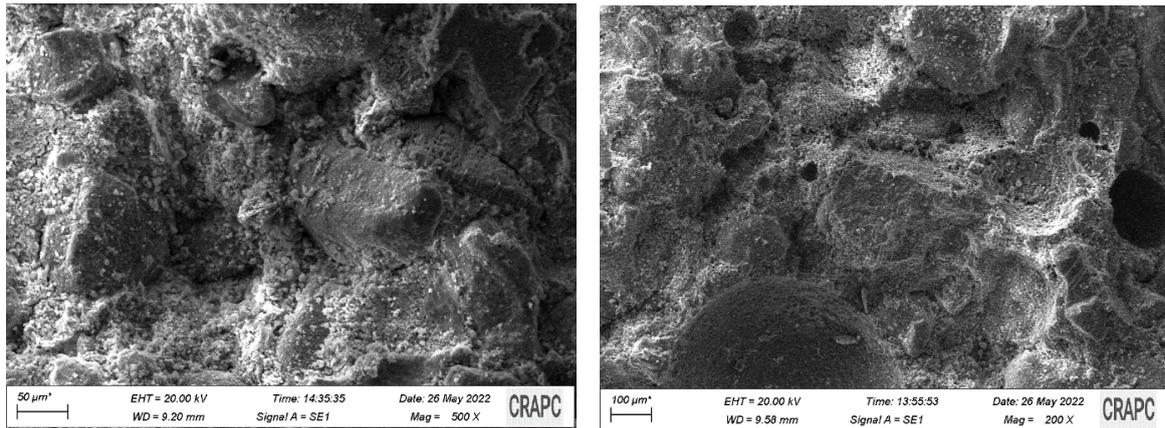


Figure IV.13 (a et b) Image par MEB du mélange MSDC II

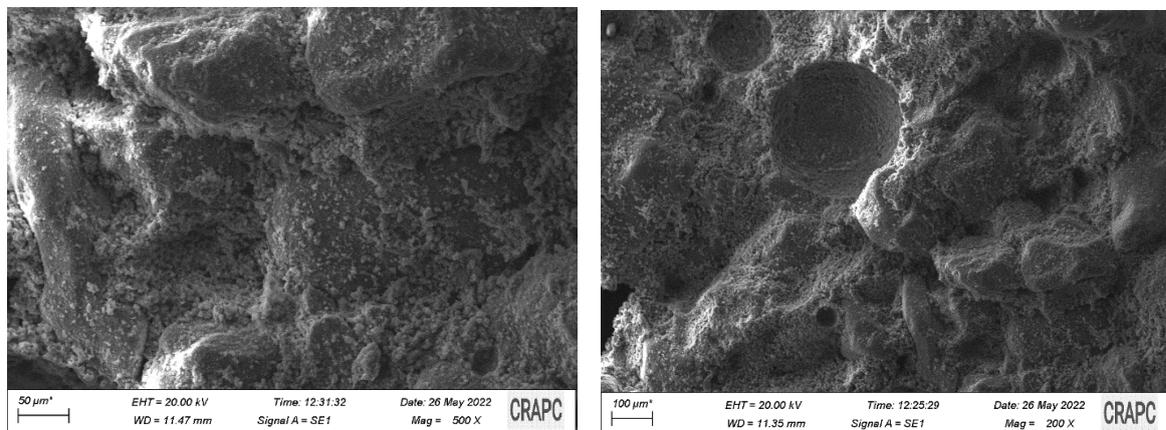
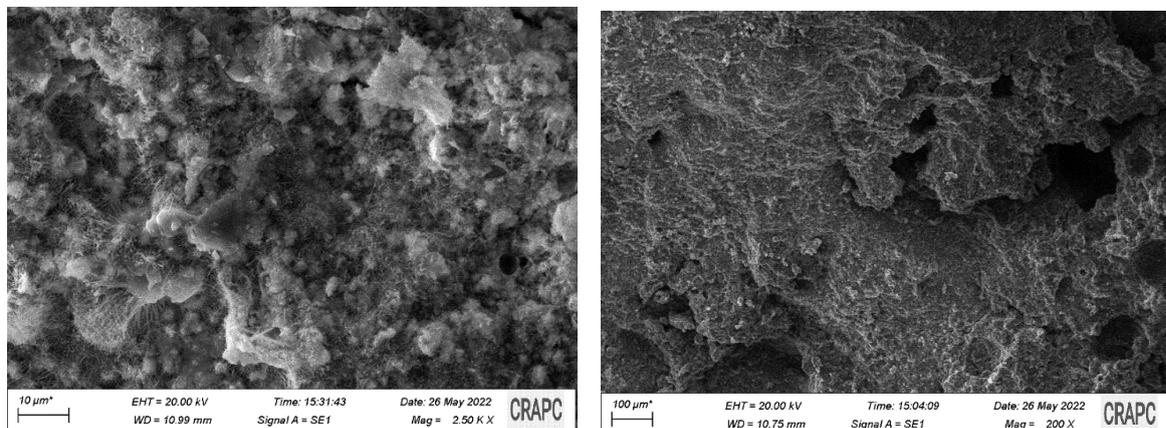


Figure IV.14 (a et b) Image par MEB du mélange MSD



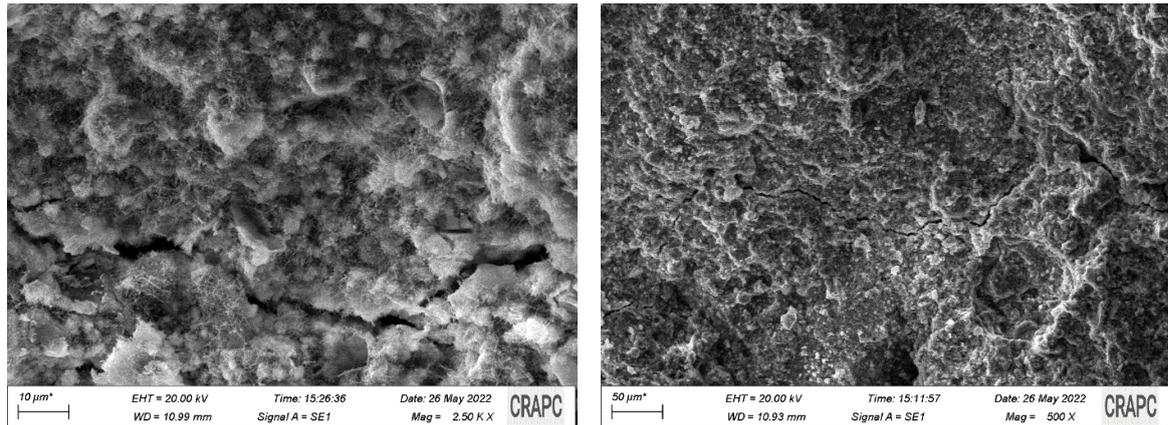


Figure IV.15 (a,b,c et d) Image par MEB du mélange MSR.

IV.3. Etude de l'effet de sable recyclé et poudre des fines de granulats recyclés sur les propriétés du béton de sable alluvionnaire

IV.3.1. Propriétés physiques des sables utilisés

Dans cette section de l'étude, deux types de sable ont été utilisés : le sable recyclé (0/4 mm), obtenu par le concassage de déchets de béton suivi du tamisage, et le sable alluvionnaire (SA) provenant de la carrière de Hassi Sayah, située dans la région de Ouargla (Algérie).

La figure IV.16 illustre la distribution granulométrique de chaque type de sable utilisé, comprenant le sable alluvionnaire (SA), le sable recyclé (SR), le sable composé d'un mélange de 85 % SA + 15 % SR, ainsi que le sable composé de 75 % SA + 25 % SR.

Le tableau IV.4 présente les résultats des propriétés physiques du sable alluvionnaire et du sable recyclé. Ces données révèlent que le sable alluvionnaire affiche des propriétés acceptables.

Tableau IV.4. Propriétés physiques des sables utilisés

	Sable	Sable	Sables corrigés	
	alluvionnaire (SA)	recyclé (SR)	85% SA + 15% SR	75% SA + 25% SR
Densité absolue (g/cm ³)	2,52	2,50	2,51	2,50
Densité apparente (g/cm ³)	1.47	1,63	1,57	1,6
Absorption de l'eau (%)	0.6	8,20	///	///
Module de finesse	2.60	3,36	2,78	2,80
Équivalence sable (%)	73	80,50	///	///

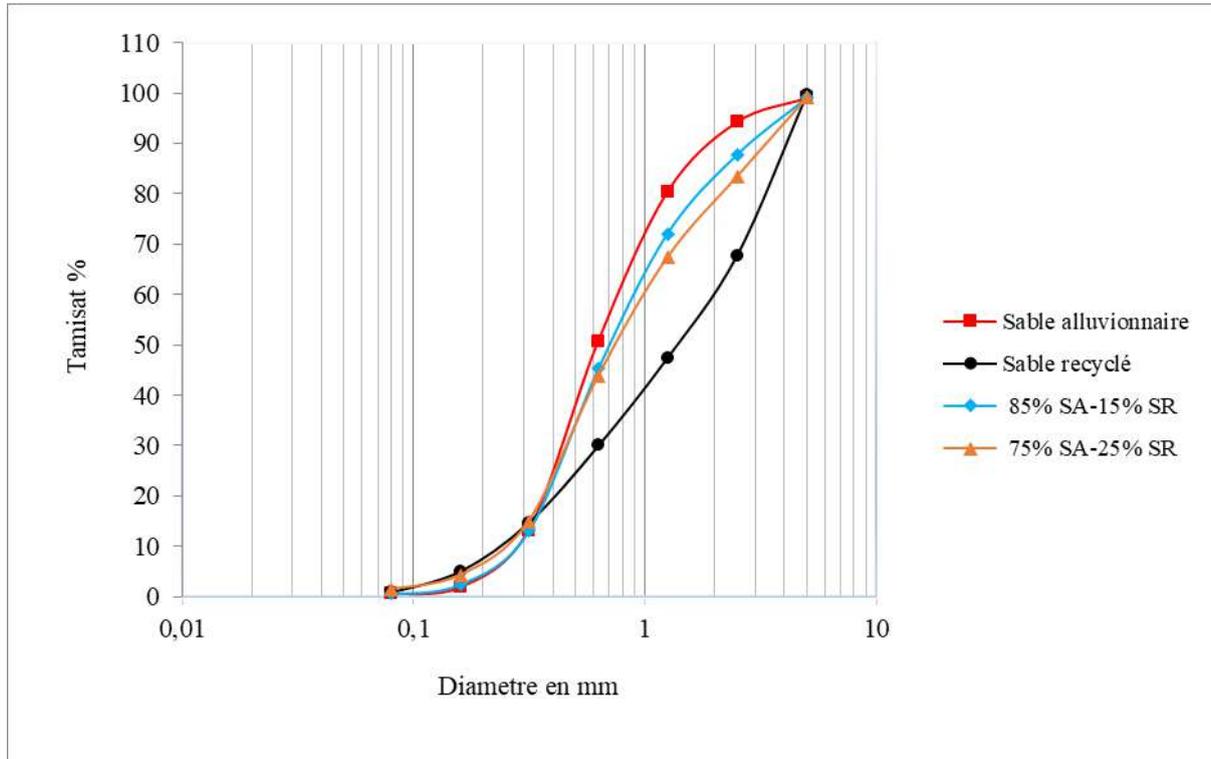


Figure IV.16. Distribution granulométrique des sables utilisés

Le tableau IV.4 expose les résultats, indiquant que l'absorption d'eau du sable recyclé est plus élevée que celle du sable alluvionnaire. Cette disparité s'explique par la porosité accrue résultant de la présence de ciment dans le sable recyclé, ainsi que des fines issues du concassage des déchets de béton. Ces fines présentent une proportion élevée (> 5 %) et une surface spécifique très élevée.

IV.3.2. Propriétés de poudre des fines

IV.3.2.1. Propriétés physiques

Le tableau IV.5 présente les propriétés physiques des fines, y compris les surfaces spécifiques et les densités absolues, en les comparant à un matériau de référence, le ciment CPJ-CEM II. Pour le reste de cette étude, notamment lors de l'analyse de la formulation du béton, nous supposons que les fines ne présentent pas de porosité.

Tableau IV.5. Densité absolue et surface spécifique du PFR et du CPJ-CEM II utilisés.

	Ciment portland	Poudre Fines recyclées
Densité absolue ρ_{abs} (g/cm ³)	3.10	2.43
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3240	6520

La surface spécifique de Blaine des particules fines excède celle du ciment CPJ-CEM II. Bien que le processus ne soit pas optimisé, le concassage et le broyage combinés sont toujours considérés comme efficaces pour produire des matériaux hautement pulvérulents. Cela est attribuable à l'effet de fracturation progressive qui se produit lorsque les matières premières, souvent riches en calcaire et en ciment, passent à plusieurs reprises à travers les mâchoires du concasseur.

Ce processus ne semble pas altérer la représentativité des fines par rapport au matériau d'origine, étant donné que la densité absolue reste pratiquement constante. Le tableau IV.5 indique que les particules de déchets, composées de ciment hydraté et de silice (sable), présentent une porosité plus élevée ($2,43 \text{ g/cm}^3$) que le ciment Portland ($3,10 \text{ g/cm}^3$). Diverses études suggèrent des valeurs distinctes pour la masse spécifique des différentes fractions de déchets de béton. Corinaldesi et al. [137] rapportent des valeurs comprises entre 2,29 et 2,38 g/cm^3 , Favaretto et al. [138] citent $2,42 \text{ g/cm}^3$, et Evangelista et al. [139] trouvent des valeurs entre 2,53 et 2,62 g/cm^3 . Ces variations peuvent résulter de la variabilité des déchets et du type de traitement. Evangelista et al. [89] ont également signalé que l'adhésion des particules de mortier est influencée par d'autres constituants.

IV.3.2.2. Caractéristiques chimiques

Des analyses qualitatives ont été réalisées par Microscopie Électronique à Balayage, couplée à des analyses chimiques ponctuelles par EDS, dans le but de caractériser la poudre des fines recyclées afin d'évaluer leur potentiel de valorisation. Les résultats de la composition chimique par l'EDS de la poudre des fines recyclées utilisée dans cette étude sont présentés dans la Figure IV.17 (a et b).

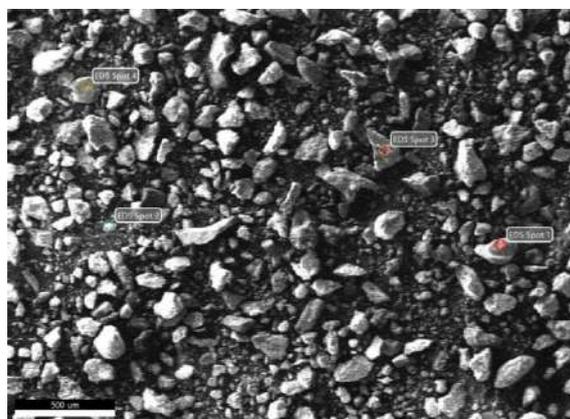


Figure IV.17. EDS des PFR

Point 2

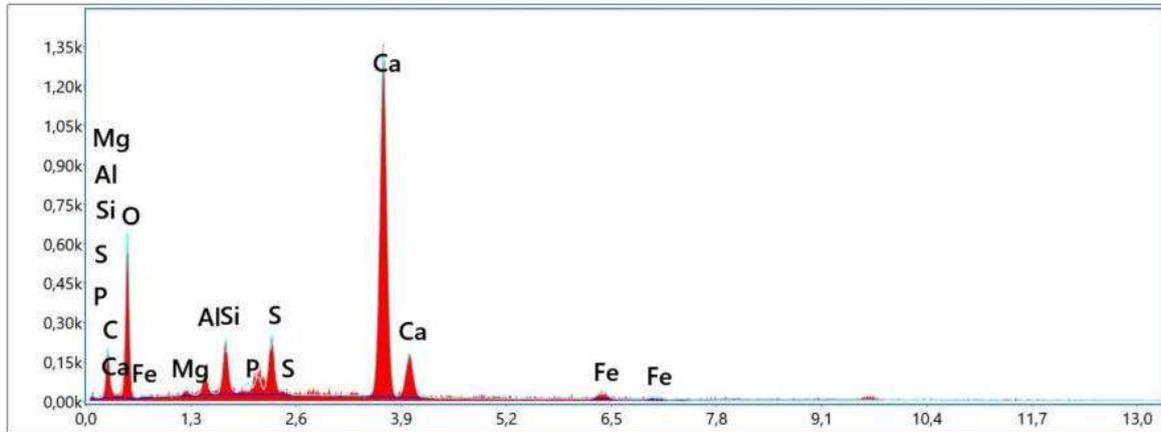


Figure IV.17(a) EDS des PFR pour le point 2

Tableau IV.6 (a). Résultats des quantités des composants pour le point 2

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	7.19	13.15	8.66	13.74	0,0230	1.1101	0.2885	1.0000
O K	41.76	57.36	40.26	11.59	0,0587	1.0647	0.1320	1.0000
MgK	0.51	0.46	2.04	27.95	0,0023	0.9863	0.4623	1.0026
AlK	1.35	1.10	6.90	12.45	0,0079	0.9502	0.6102	1.0045
SiK	2.88	2.25	18.05	8.44	0,0205	0.9715	0.7269	1.0068
P K	0.63	0.45	3.39	10.39	0,0048	0.9335	0.8006	1.0113
S K	3.82	2.62	21.85	6.87	0,0321	0.9521	0.8709	1.0150
CaK	39.68	21.75	153.00	2.23	0,3613	0.9189	0.9862	1.0045
FeK	2.19	0.86	4.40	17.23	0,0179	0.8205	0.9711	1.0296

Point 3

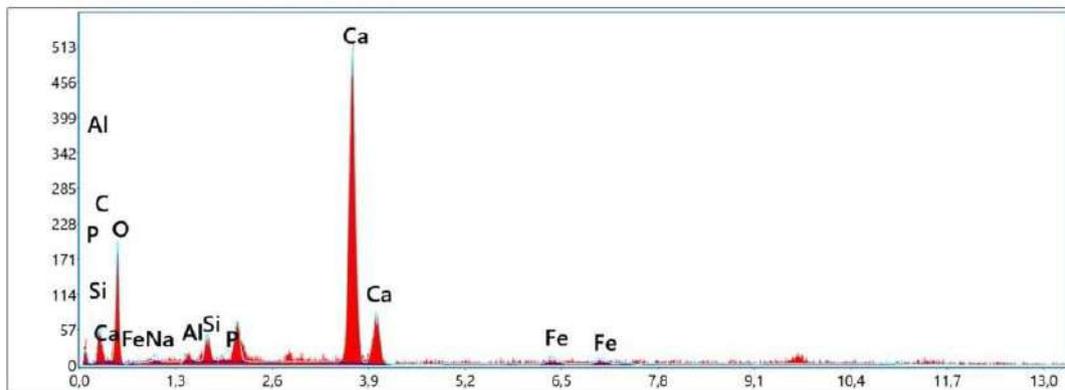


Figure IV.17(b) EDS des PFR pour le point 3

Tableau IV.6 (b). Résultats des quantités des composants pour le point 2

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	5.19	9.78	2.68	17.72	0,0216	1.1155	0.3731	1.0000
O K	42.03	59.49	12.71	12.98	0,0562	1.0702	0.1250	1.0000
NaK	1.11	1.10	0.76	38.11	0,0032	0.9743	0.2970	1.0012
AlK	0.80	0.67	1.31	25.27	0,0045	0.9554	0.5931	1.0043
SiK	1.86	1.50	3.81	14.07	0,0131	0.9768	0.7166	1.0068
P K	0.87	0.63	1.53	9.18	0,0066	0.9387	0.8016	1.0110
CaK	45.80	25.88	59.21	2.62	0,4243	0.9241	0.9980	1.0040
FeK	2.35	0.95	1.56	19.59	0,0192	0.8254	0.9667	1.0272

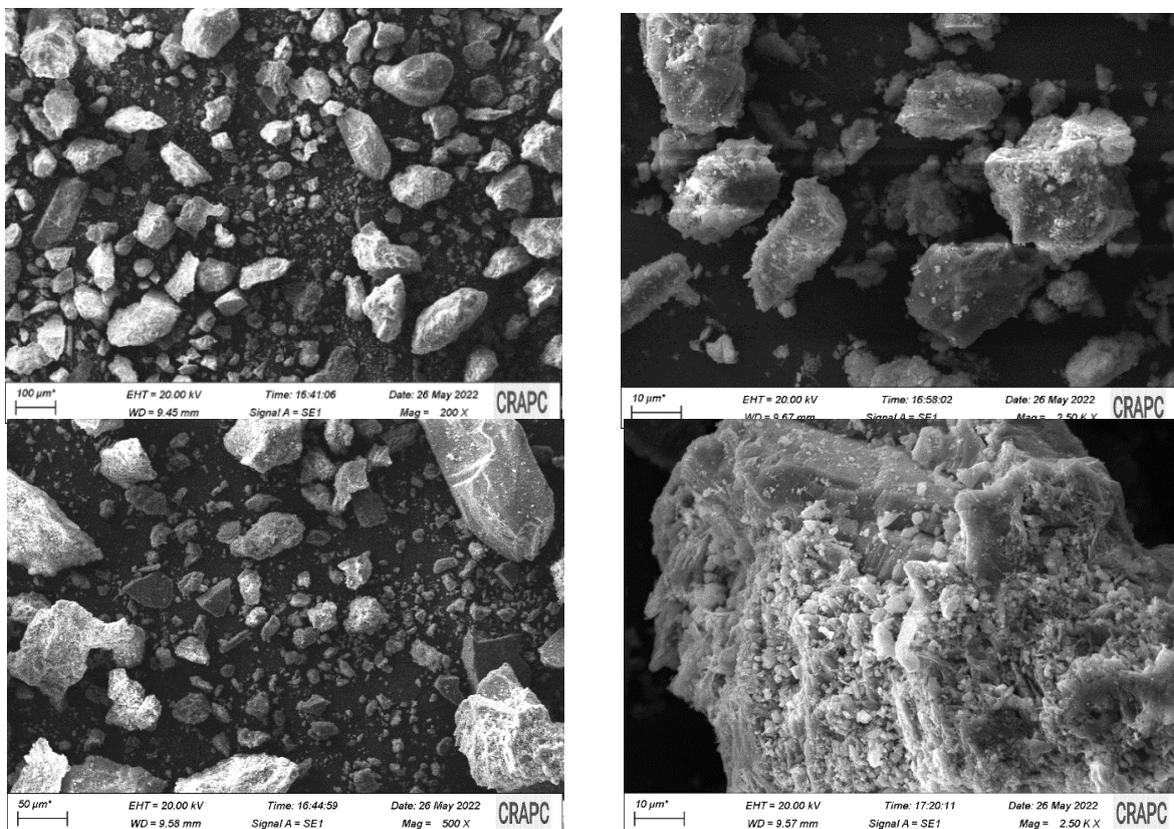


Figure IV.18 (a,b,c et d). Images MEB par le mode électron rétrodiffusé et les analyses EDS des PFR

Les Figures IV.18 (a,b,c et d) présentent respectivement l'image MEB et l'analyse EDS de la poudre de fines recyclées (FPR). La texture des FPR révèle une différence de taille des fines due à l'effet du concassage et du broyage des granulats de béton recyclés (GBR). Les PFR contiennent des éléments cimentaires tels que l'ettringite et la portlandite, formant ainsi des hydrates. La présence de ciment non hydraté dans la masse des granulats recyclés est responsable de ces éléments [140]. Des études ont également montré que la fraction fine des

granulats recyclés contient du clinker anhydre résiduel, qui peut être récupéré par broyage [141]. Le clinker anhydre résiduel représente environ 24 % [142]. Bien que la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ soit également présente, l'intensité du pic principal de la calcite éclipse les autres phases cimentaires hydratées, qui sont minoritaires dans cet échantillon.

La composition chimique révèle que les poudres de fines recyclées (PFR) sont riches en éléments tels que le calcium (45,80 %), une quantité presque équivalente à celle présente dans le ciment Portland. On observe également la présence de quelques oxydes mineurs pouvant être considérés comme des impuretés. La remarquable présence de phases anhydres résiduelles constitue un aspect intéressant, suggérant que ce matériau pourrait ne pas être inerte en présence d'eau après concassage. Ces résultats confirment et justifient notre choix d'utiliser les PFR en tant que substitut au ciment dans notre étude.

IV.3.3. Propriétés des bétons de sable alluvionnaire avec et sans SR et PFR à l'état frais

IV.3.3.1. Consistance des bétons de sable

Le test a été réalisé selon la norme, visant à calibrer la teneur en eau à être ajoutée au mélange. Les résultats sont présentés dans la figure IV.19. À mesure que le taux d'incorporation augmentait, il est apparu que moins d'eau était nécessaire pour donner au mélange la cohérence cible, car les vides préalablement remplis d'eau étaient occupés par les très fines particules de béton (effet filler). Une amélioration significative de l'ouvrabilité s'est produite pendant le mélange à mesure que le taux d'incorporation augmentait, indiquant que la taille, la forme et la texture des particules sont pertinentes pour cette propriété à l'état frais et justifient une diminution du rapport eau/ciment.

Les fines particules améliorent la cohésion interne du mélange. La relation inverse a été détectée par [143], qui ont conclu que l'ajout de différents types de fines augmente la nécessité de mélanger l'eau pour obtenir une maniabilité acceptable. Cependant, il convient de préciser que le pourcentage de fines incorporées mentionné dans cette référence est bien plus élevé (entre 20 et 40 %) que celui testé au maximum dans cette étude.

Almeida [144], qui a testé l'incorporation d'éléments fins issus de coulis de pierre dans la production de béton, a conclu que, pour des pourcentages d'incorporation inférieurs à 15 %, il y avait moins besoin d'eau de gâchage, puisque la maniabilité du béton a été améliorée en ajoutant les très fins granulats. Pan et al. [144] ont également montré qu'après avoir remplacé

20 % de ciment Portland par des cendres de boues d'épuration (un matériau recyclé pouvant être utilisé dans le mortier de ciment comme la pouzzolane), l'ouvrabilité du mortier augmentait avec la finesse.

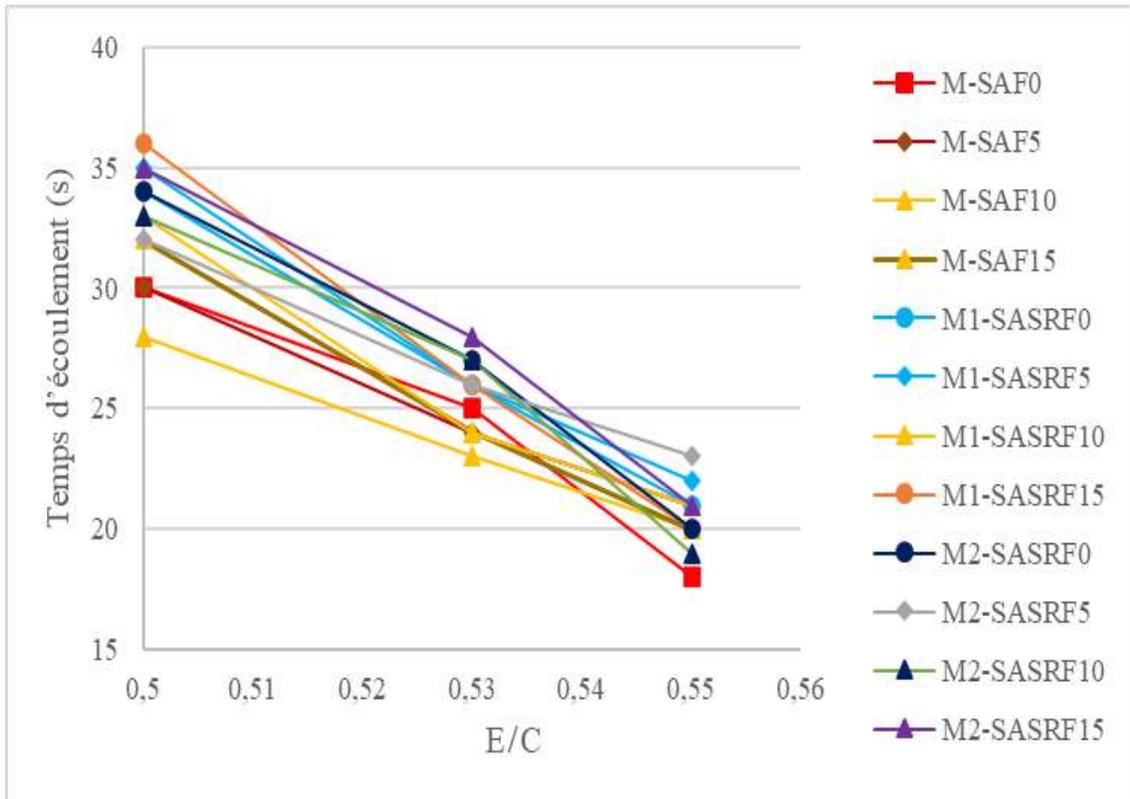


Figure IV.19. Temps d'écoulement en (s) LCPC des bétons de sable en fonction du E/C

De manière générale, les études précédentes semblent souligner une tendance à l'amélioration de l'ouvrabilité avec une incorporation croissante des fines de granulats de béton recyclé (GBR), mais cela dépend bien sûr de la nature du GBR.

En revanche, Angelim et al. [145] ont estimé qu'il était nécessaire d'augmenter la quantité d'eau de gâchage pour obtenir l'ouvrabilité ciblée lorsqu'ils utilisaient des taux d'incorporation de fines compris entre 20 % et 40 %. Ainsi, on peut conclure qu'il existe une tendance à l'amélioration de l'ouvrabilité avec l'incorporation de fines, mais cette tendance est sensible à leur nature [146].

IV.3.4. Caractéristiques des mortiers de sable alluvionnaire avec et sans SR et PFR à l'état durcis

IV.3.4.1. Résistance à la compression

IV.3.4.1.1. Résistance à la compression des témoins

La Figure IV.20 présente la résistance à la compression des échantillons M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0 en fonction du temps. Après 28 jours de cure, la résistance à la compression des trois mélanges était d'environ 45,1 MPa, 42,2 MPa et 36,3 MPa, respectivement. Le mélange M-SA a présenté une résistance plus élevée que les mélanges M1-SASRF0 et M2-SASRF0, avec des augmentations de 6,43 % et 19,51 %, respectivement.

La diminution de la résistance des bétons contenant des sables recyclés (SR) par rapport au mélange témoin peut s'expliquer par le fait que la présence de granulats de béton recyclé (GBR) augmente la porosité du mélange.

Ces observations concordent avec celles de [147], qui ont noté dans leurs travaux que les mélanges avec incorporation de déchets présentent une résistance à la compression réduite par rapport aux mélanges sans incorporation. À 90 jours, le schéma de résistance à la compression a changé, le mélange M1-SASRF0 affiche une diminution de résistance de 7,95 % par rapport au M-SAF0, tandis que le mélange M2-SASRF0 a présenté une légère augmentation de la résistance de 1,04 % par rapport au M-SAF0. Cette légère augmentation de la résistance du M2-SASRF0 par rapport au M-SAF0 peut s'expliquer par le fait que le sable recyclé, riche en particules de diamètres compris entre 0,08 mm et 0,63 mm et contenant du ciment anhydre, réagit à long terme en présence d'eau pour former de nouveaux hydrates par des réactions pouzzolaniques, ayant un effet positif sur la résistance [121].

De plus, l'effet de remplissage des vides de ces fines particules de sable recyclé minimise le pourcentage des pores. D'autre part, l'augmentation de la résistance est probablement due à la nature des granulats recyclés et à la résistance du béton de démolition qui produit ces granulats. En outre, le sable recyclé se caractérise par des particules ayant une forme angulaire plus prononcée, une surface rugueuse et une plus grande porosité, assurant ainsi une forte adhérence avec la pâte de ciment [148, 149].

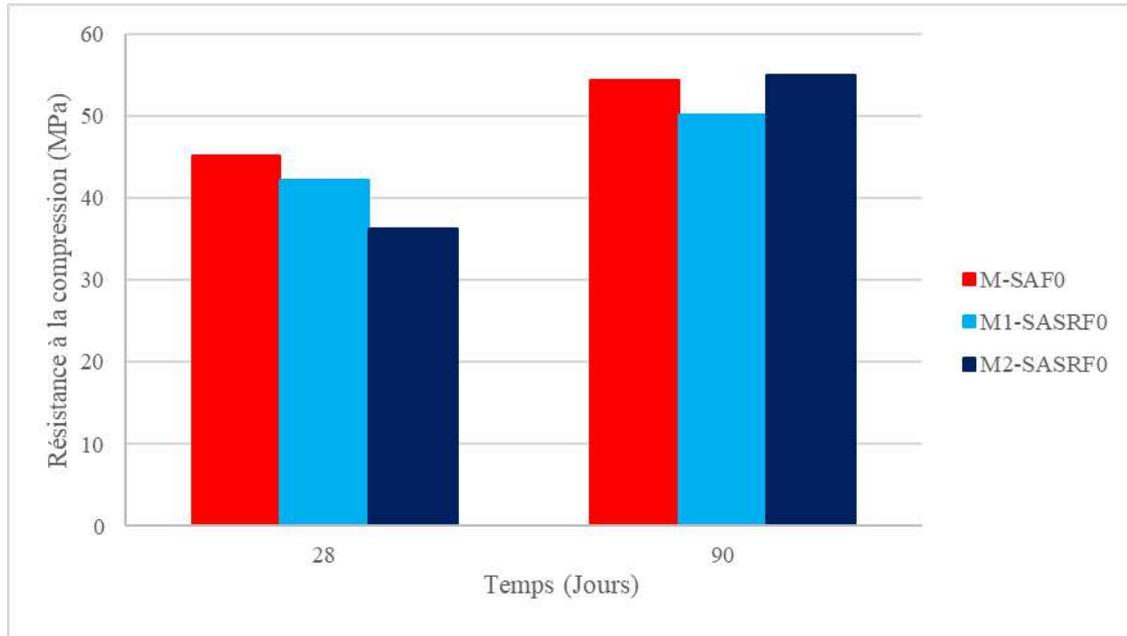


Figure IV.20. Résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons (sans ajout de PFR) M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.

IV.3.4.1.2. Résistance à la compression des bétons de sable avec et sans PFR

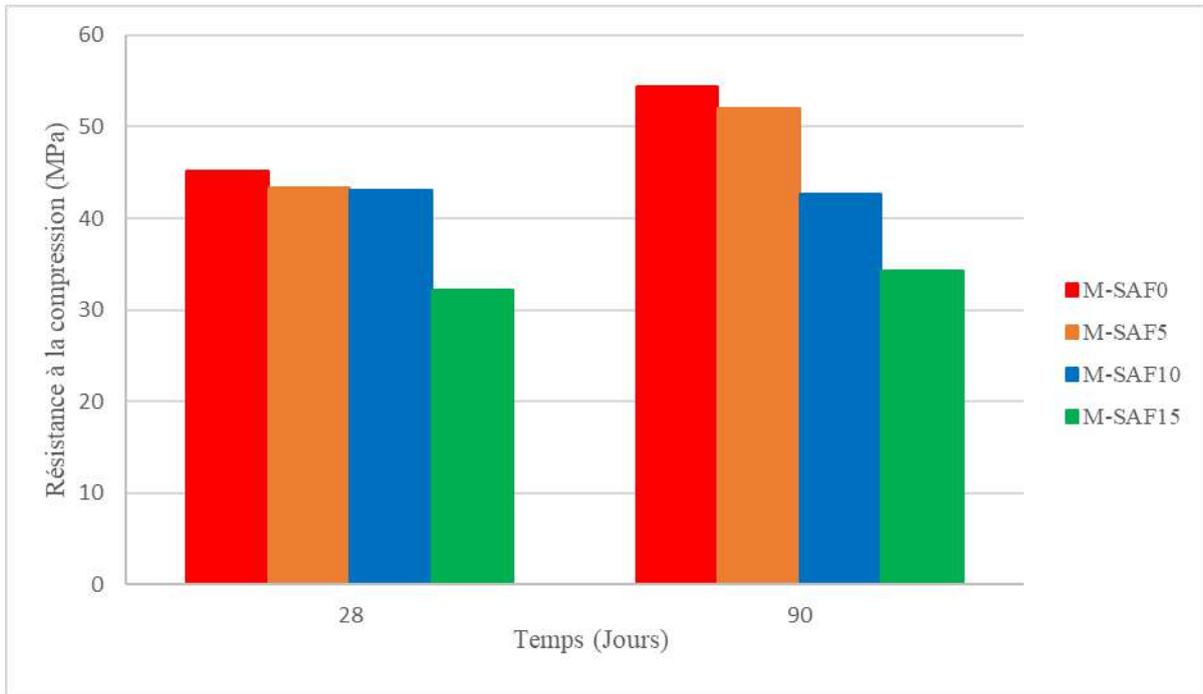
Les résultats de la résistance à la compression des bétons de sable préparés avec différents sables, et avec des teneurs en ciment Portland remplacé par de la poudre fine de déchets de béton de démolition (PFR), sont présentés dans la figure IV.21. Ces résultats indiquent une diminution de la résistance à la compression dans tous les types de bétons étudiés par rapport au béton témoin sans aucun remplacement (0 %).

Les figures IV.21 (a, b, c et d) montrent que le remplacement du ciment Portland par la poudre fine de déchets de béton de démolition a entraîné une réduction de la résistance à la compression par rapport aux bétons sans aucun remplacement (0 %). Il est important de noter que les bétons témoins M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0 présentent des résultats de résistance supérieurs aux bétons à base de PFR. Cependant, les bétons produits présentent toujours une résistance acceptable pour l'usage auquel ils sont destinés. Ces résultats soutiennent l'utilisation des fractions fines de granulats de béton recyclé (GBR) comme substituts de ciment pour des raisons économiques et environnementales.

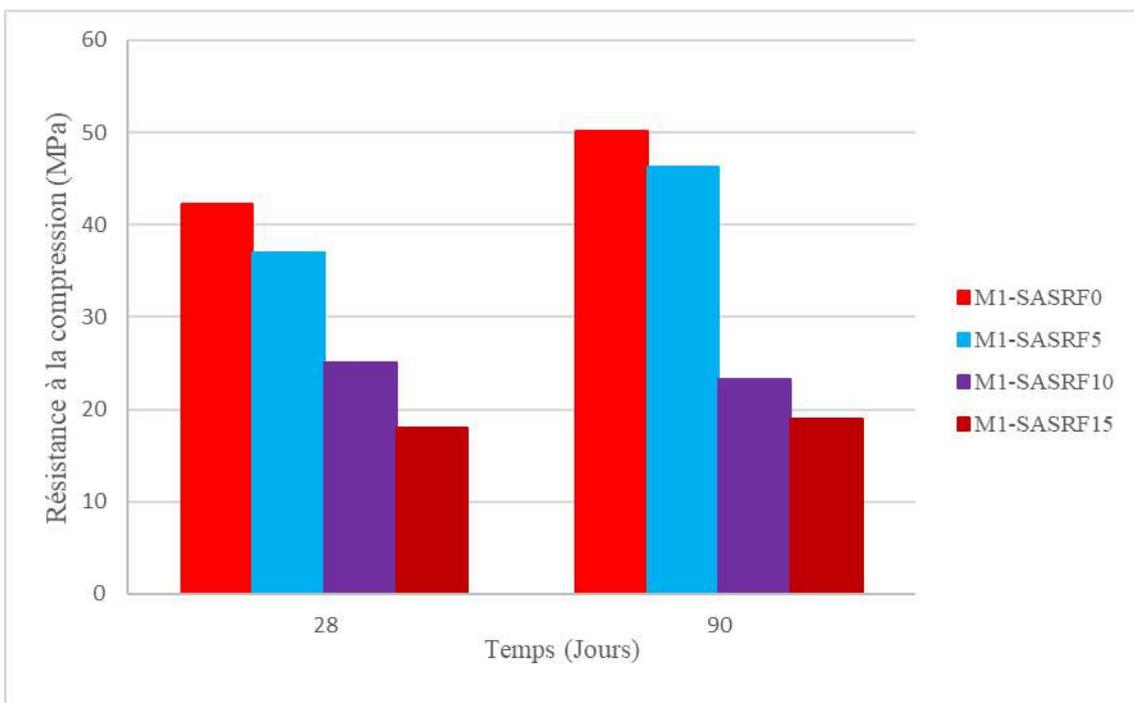
La figure IV.21 a montré la résistance des bétons de sable M-SAF0 avec et sans ajout de PFR à 28 et 90 jours. La résistance des mélanges M-SAF5, M-SAF10 et M-SAF15 a diminué de 3,97 %, 4,43 % et 28,82 % respectivement à 28 jours par rapport au béton témoin M-SAF0.

La figure IV.21b montre une diminution similaire de la résistance du mélange M1-SASRF0.

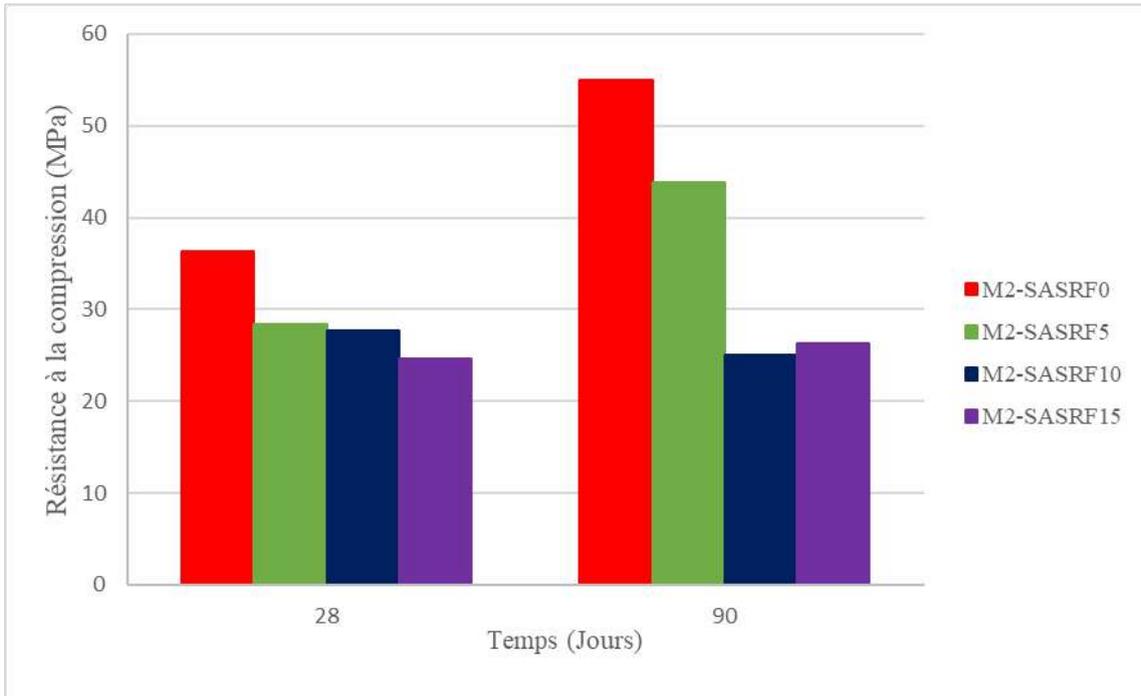
(85 % SA-15 % SR) à 28 jours par rapport aux mélanges M1-SASRF5, M1-SASRF10 et M1-SASRF15. Les différences de pourcentage entre eux sont respectivement de 18,12 %, 44,3 % et 60,24 %. La figure IV.21c illustre la diminution de la résistance du mortier M2-SASR (75 % SA-25 % SR) par rapport aux mortiers M2-SASRF5, M2-SASRF10 et M2-SASRF15 à 28 jours, qui est de 37,1 %, 38,62 % et 45,28 %, respectivement.



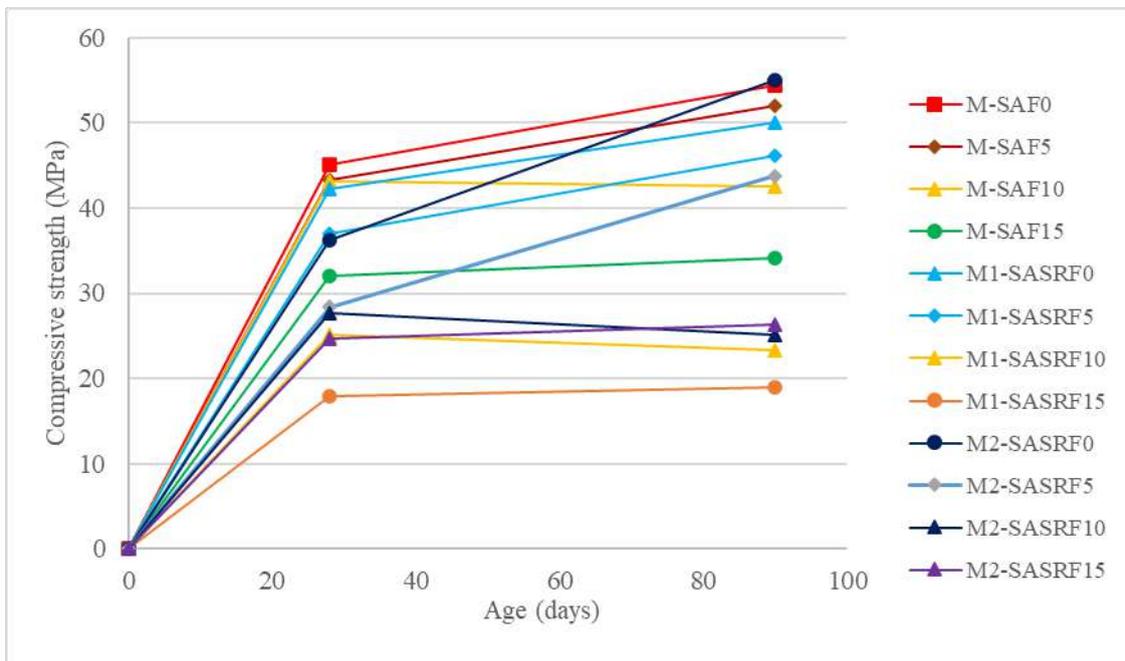
a) M-SAF0 avec et sans PFR



b) M1-SASRF0 avec et sans PFR



c) M2-SASRF0 avec et sans PFR



d) Résistance à la compression des mélanges étudiés

Figure IV.21 (a,b,c et d). Résistance à la compression des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.

IV.3.4.2. Résistance à la flexion

IV.3.4.2.1. Résistance à la flexion des bétons témoins

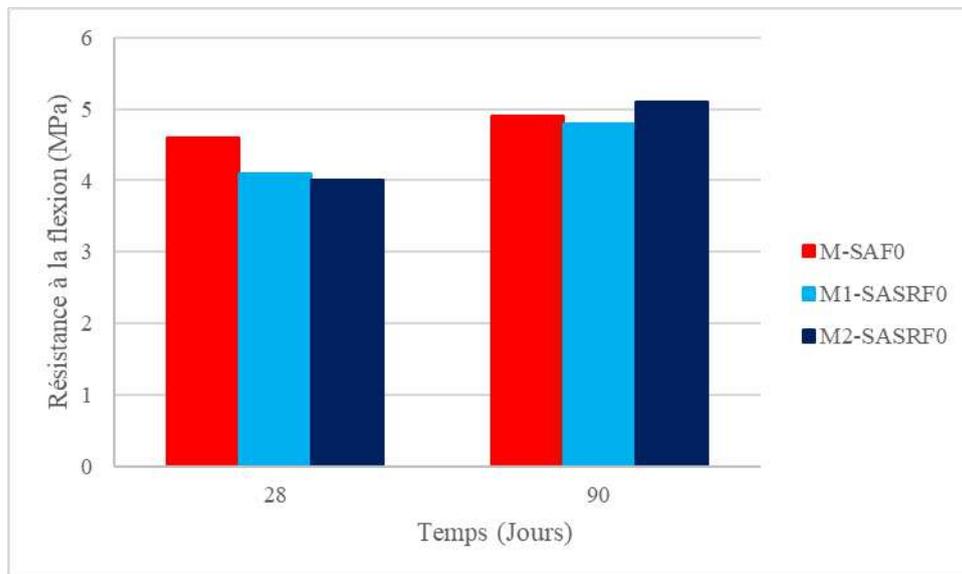


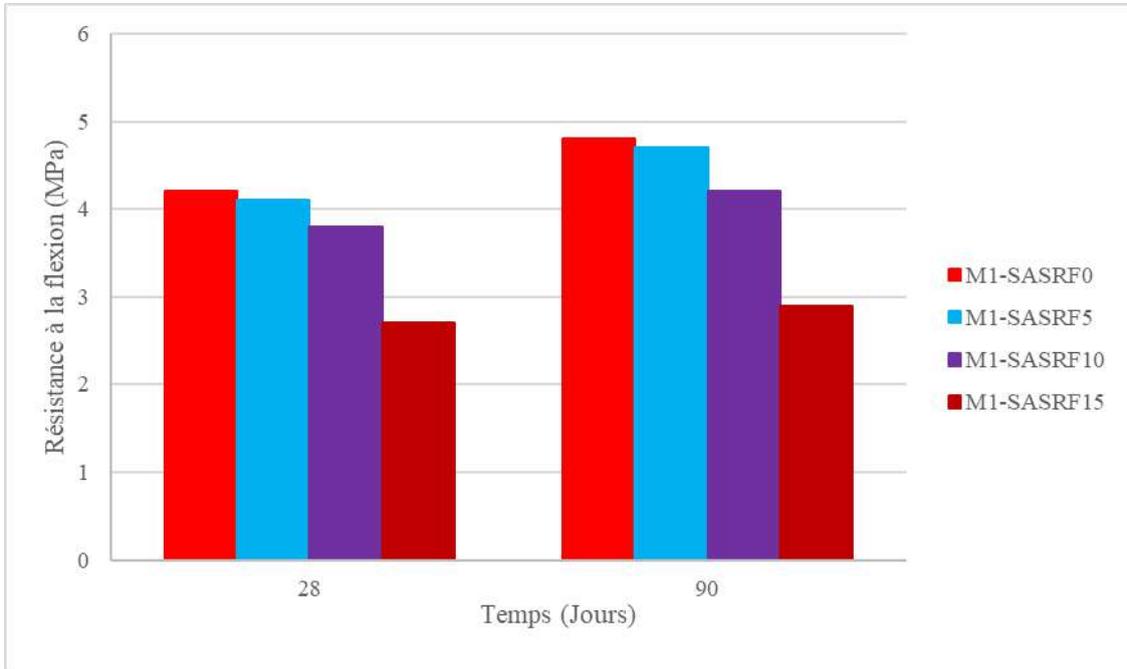
Figure IV.22. Résistance à la flexion en fonction de l'âge des bétons de sable (Sans ajout de PFR) M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.

La figure IV.22 présente les résultats montrant une légère diminution de la résistance à la flexion à 28 jours lorsque le taux de remplacement du sable naturel par du sable recyclé augmente. Cette diminution est d'environ 8,69 % et 17,39 % pour les mortiers M1-SASRF0 et M2-SASRF0, respectivement, par rapport au béton de contrôle M-SAF0. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à cette différence. Le sable recyclé contient généralement une quantité importante de particules fines, dont la taille est inférieure à 0,63 mm. Ces particules ont une surface spécifique élevée, ce qui peut fortement influencer la demande en eau du sable recyclé et affecter considérablement le rapport eau/ciment (E/C).

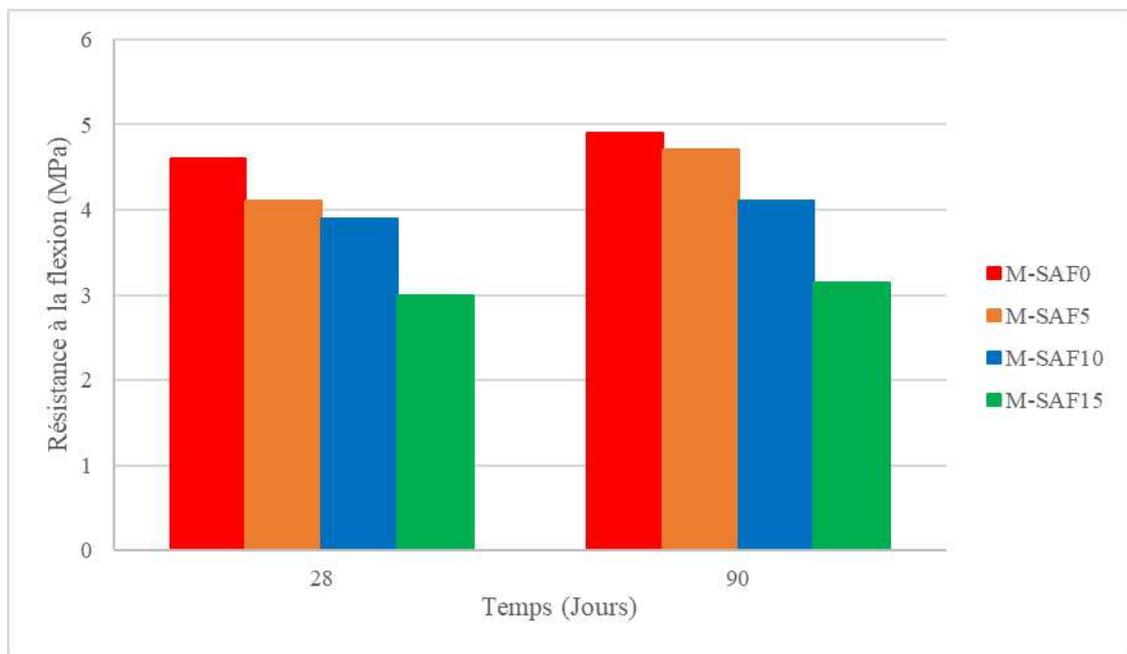
De plus, une grande quantité de particules fines peut perturber le gamissage granulaire pendant le mélange, entraînant une réduction de la résistance [150, 151]. Cette diminution de la résistance peut également être due à une microfissuration interne des échantillons [152].

À 90 jours, on observe une tendance différente par rapport à 28 jours. Alors qu'il y a toujours une diminution de la résistance à la flexion dans le mortier M1-SASRF0, il y a une augmentation de 2,61 % de la résistance pour le mortier M2-SASRF0 par rapport au mélange MSAF0. La probable raison de cette amélioration de la résistance est due à la présence de constituants anhydres du ciment qui n'ont pas encore subi d'hydratation [153-154]. Ainsi, les fines du sable recyclé réduisent les microfissures en les remplissant et en consommant de l'eau interstitielle pendant l'hydratation du ciment non hydraté.

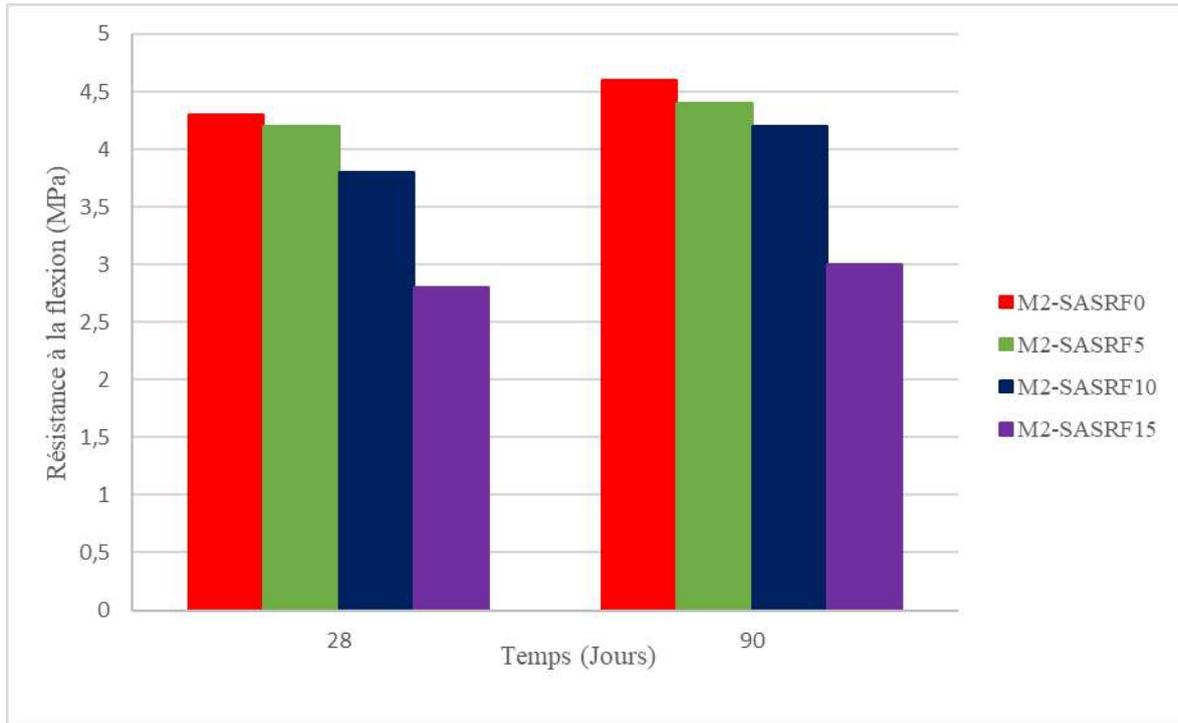
IV.3.4.2.2. Résistance à la flexion des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR



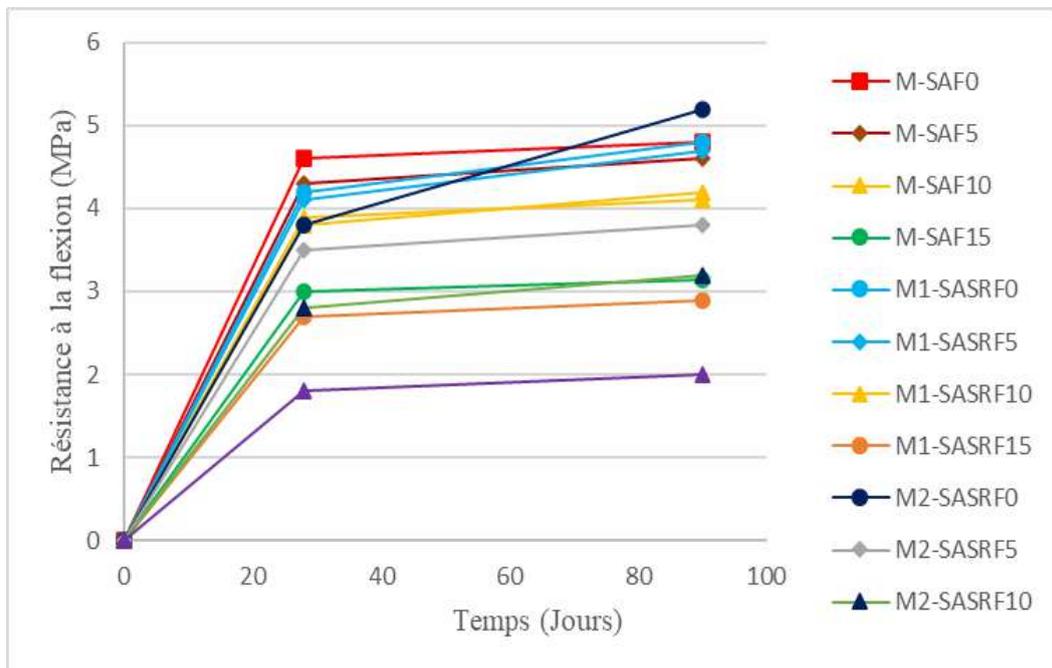
a) M-SAF0 avec et sans PFR



b) M1-SASRF0 avec et sans PFR



c) M2-SASRF0 avec et sans PFR



d) Résistance à la flexion des mélanges étudiés

Figure IV.23 (a,b,c et d) Résistance à la flexion des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.

Les figures IV.23 (a, b, c et d) illustrent l'évolution de la résistance à la flexion des bétons de sable étudiés, avec et sans poudre de fines recyclées (PFR). On observe que l'ajout de PFR comme substitut de ciment dans le béton a entraîné une diminution de la résistance à la flexion, indépendamment du type de béton de sable et du pourcentage de PFR ajouté. Cette diminution à 28 jours était de 4,34 %, 15,22 % et 34,78 % pour les mélanges M-SAF5, M-SAF10 et M-SAF15, respectivement, par rapport au mélange M-SAF0.

La résistance à la flexion des mélanges M1-SASRF5, M1-SASRF10 et M1-SASRF15 a diminué de 2,38 %, 9,52 % et 35,71 % respectivement, par rapport à M1-SASRF0, comme le montre la figure IV.23 (a). De même, les résistances à 28 jours des bétons M2-SASRF5, M2-SASRF10 et M2-SASRF15 étaient inférieures à celles du mélange M2-SASRF0 de 7,89 %, 26,3 % et 50 % respectivement. La même tendance des résultats a été obtenue à 90 jours, où l'on observe une diminution de la résistance des bétons de sable avec PFR par rapport aux bétons sans PFR (témoins). Ainsi, d'après les résultats présentés dans la figure IV.23 (d), tous les mélanges avec et sans PFR donnent une résistance inférieure à celui de M-SAF0, montrant l'effet négatif des PFR sur le béton de sable alluvionnaire.

Cependant, les résultats obtenus sont proches du mortier témoin dans plusieurs mélanges, tels que M-SAF5, M1-SASRF5, M1-SASRF10 et M2-SASRF5, qui présentent une légère réduction significative de la résistance à la flexion par rapport au mélange M-SAF0. Ces résultats suggèrent qu'il est possible d'utiliser jusqu'à 10 % de PFR dans le béton sans compromettre sa résistance à la flexion.

IV.3.4.3. Perte en poids

IV.3.4.3.1. Perte en poids des bétons de sable témoins

La figure IV.24 présente la perte en masse des bétons témoins. La perte de masse du béton diminue à mesure que la teneur en sable recyclé augmente. Cette diminution est principalement due aux changements de la teneur en eau dans les vides capillaires. Le sable recyclé a un coefficient d'absorption d'eau plus élevé (8,3 %) que le sable alluvionnaire (0,58 %). Une partie de l'eau de gâchage sera absorbée par le sable, variable en fonction de la proportion de sable. Une quantité constante d'eau sera utilisée pour l'hydratation du ciment, et la quantité variable restante contribuera à la formation de vides capillaires mixtes [6].

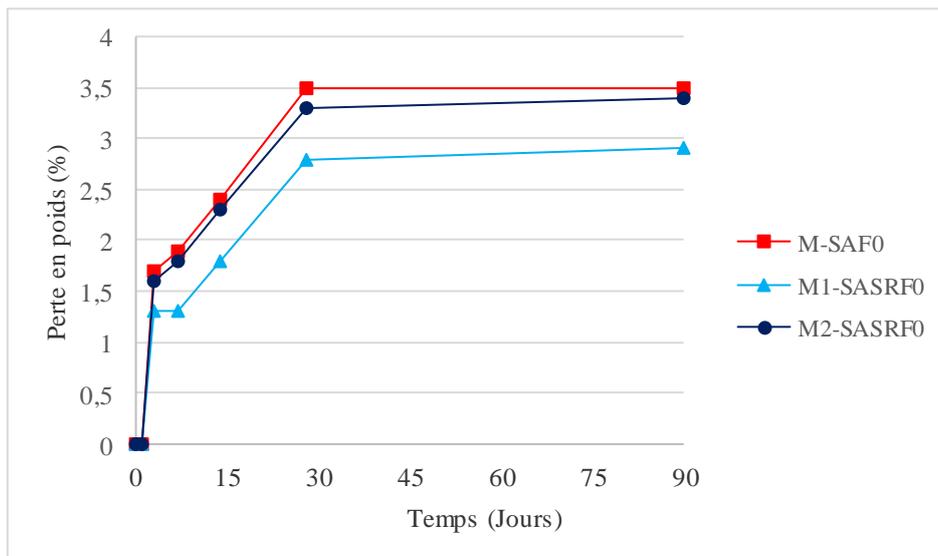
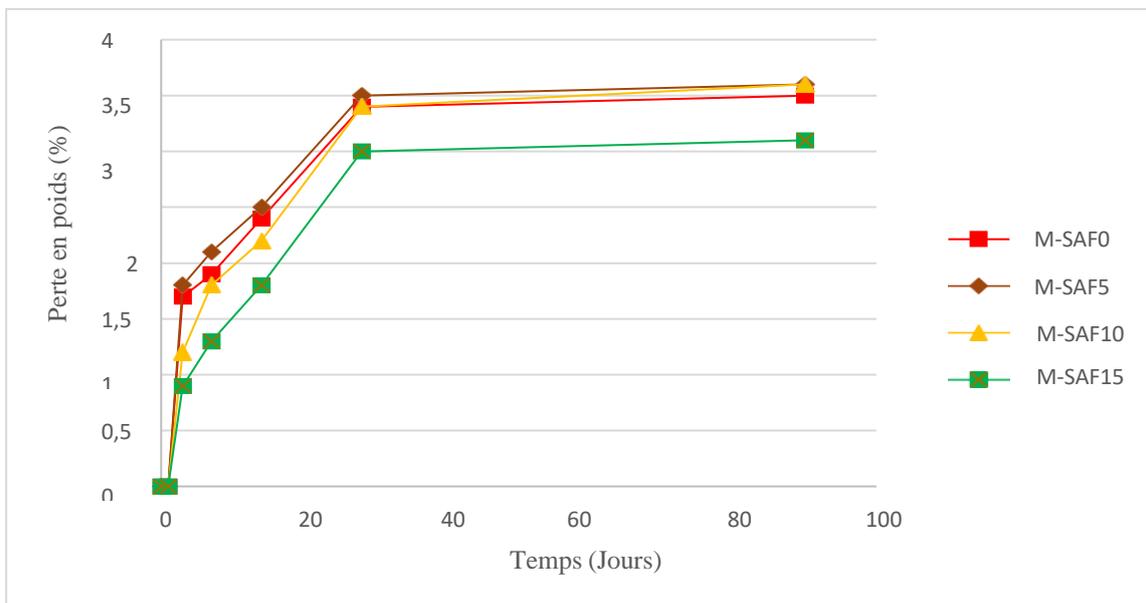
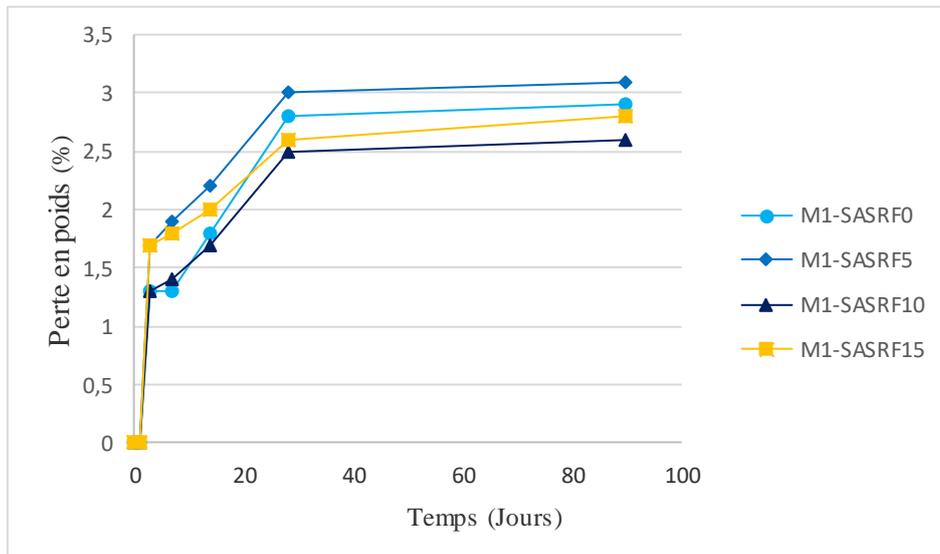


Figure IV.24. Perte en poids en fonction de l'âge des bétons de sable sans ajout de PFR M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.

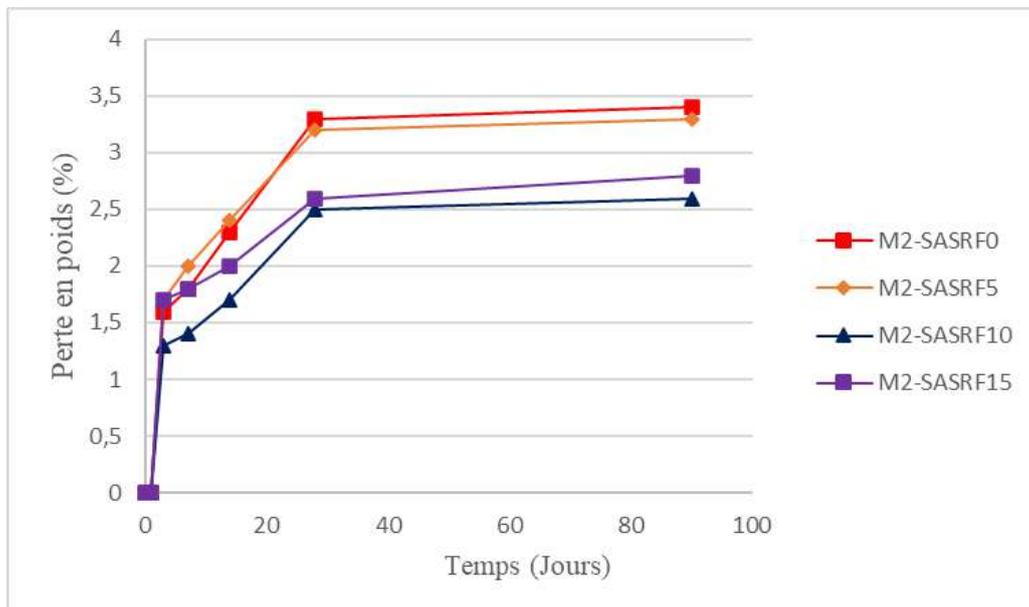
IV.3.4.3.2. Perte en poids des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR



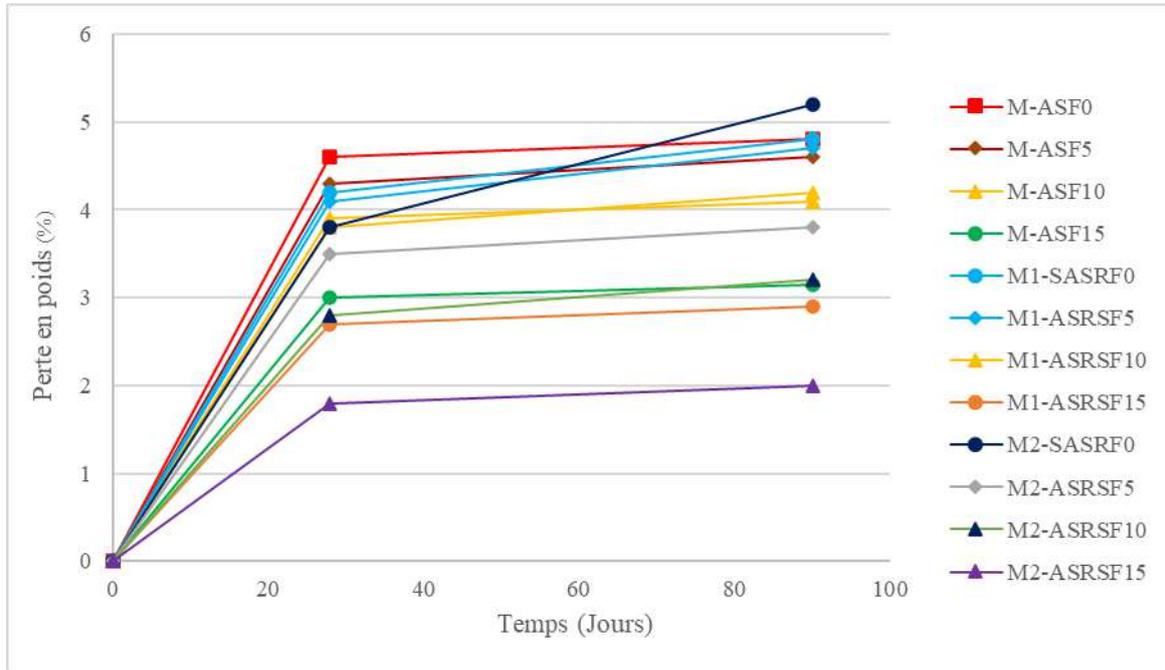
(a) M-SAF0 avec et sans PFR



b) M1-SASRF0 avec et sans PFR



c) M2-SASRF0 avec et sans PFR



d) Perte en poids des mélanges étudiés

Figure IV.25 (a,b,c et d) Perte en poids des mélanges avec et sans ajout de PFR en fonction du temps.

Lorsque la proportion de sable recyclé dans le mélange augmente, l'absorption d'eau augmente également, tandis que la quantité d'eau dans les vides capillaires diminue. Il en résulte une réduction de la perte de masse. Plus la quantité de sable recyclé dans le mélange est élevée, plus le volume des vides capillaires est faible.

L'évolution de la perte de masse des bétons de sable, avec et sans ajout de PFR, après séchage et durcissement est illustrée dans les figures IV.25 (a, b, c et d). La perte de masse augmente de manière exponentielle avec le temps de séchage, rapide au début et tendant à se stabiliser par la suite.

De plus, l'ajout de PFR diminue la perte de masse pour la plupart des bétons étudiés dans cette section. Contrairement à plusieurs études indiquant que l'incorporation de taux élevés de GBR augmente la perte de masse du béton, cette étude ne montre pas la même tendance, car nous ne dépassons pas 25% du SR et 15% de PFR. Cette amélioration de la perte de masse enregistrée peut s'expliquer par le remplacement du ciment par les PFR. La finesse élevée de ces derniers joue un rôle de remplissage des vides interstitiels, entravant la sortie de l'eau et conduisant à une évaporation réduite des bétons, se traduisant par une diminution de la perte de poids par rapport aux bétons témoins.

La figure IV.25 montre clairement que tous les bétons de sable présentent des valeurs de perte de poids inférieures à celui du mélange M-SAF0 (témoin). Le rapport E/C, un facteur crucial influant sur la perte de masse du béton de sable, indique que les bétons contenant du SR et du PFR ont un E/C élevé par rapport au béton de sable alluvionnaire M-SAF0 (témoin). Cette différence est due à la demande en eau élevée des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Dans cet effet, la présence de PFR consomme rapidement l'eau du mélange pendant le durcissement, minimisant la quantité d'eau restant dans les pores, ce qui se traduit par une diminution de l'évaporation d'eau.

Avec l'augmentation du rapport granulats fins/grossiers, la perméabilité à l'air et le facteur E/C effectif du béton à base de SR et SA diminuent. La densité du mortier augmente avec l'âge de durcissement, tandis que sa porosité à l'eau et son absorption d'eau capillaire diminuent [153,154], traduisant ainsi une amélioration de la perte de masse de ces bétons.

IV.3.4.4. Densité apparente sèche et porosité des bétons de sable

IV.3.4.4.1. Densité apparente sèche et porosité des bétons de sable alluvionnaire témoins

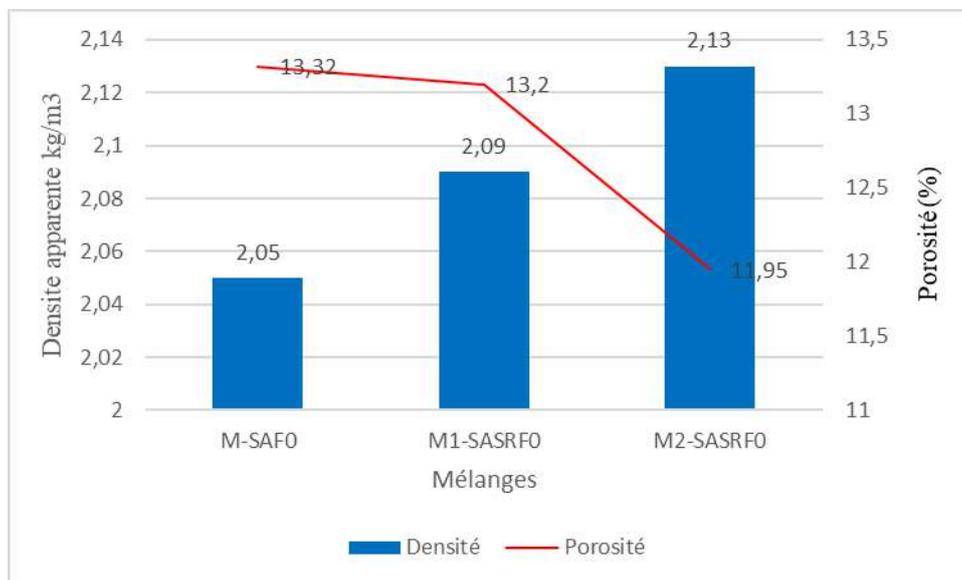


Figure. IV.26. Densité et porosité en fonction de l'âge des bétons de sable M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0

Trois spécimens de chaque type de béton de sable ont été durcis pendant 90 jours et testés immédiatement après. Les résultats de la densité et de la porosité des bétons étudiés à 28 jours sont présentés sur la figure IV.26. Une augmentation de la densité apparente a été détectée dans les bétons durcis, et à mesure de l'incorporation du SR, cette augmentation est

de l'ordre de 2,95 % et 4,92 % respectivement pour les mélanges M1-SASRF0 et M2-SASRF0 par rapport au mélange à base de sable alluvionnaire (témoin).

D'après ces résultats, la présence de SR augmente la densité apparente sèche des mélanges M1-SASRF0 et M2-SASRF0 par rapport au mélange M-SAF0. Ceci est dû à un effet de remplissage, la densité apparente sèche augmente à mesure que la teneur en SR augmente. Contrairement à la porosité, qui montre une diminution avec l'incorporation du SR, cette amélioration de la densité et de la porosité observée dans les bétons M1-SASRF0 et M2-SASRF0 par rapport au M-SAF0 (témoin) est due à l'effet de remplissage des vides par les grains de SR.

Ainsi, les fines < 63 mm contenues dans le SR jouent le rôle de remplir les petits pores, ce qui se traduit par une amélioration de la densité et, bien sûr, une amélioration de la porosité du béton de sable alluvionnaire. Plusieurs auteurs tels que Silva et al. [122], Braga et al. [20], Oliveira et al. [123], Farinha et al [130], et Jessus 2019 [121] ont constaté que l'incorporation de déchets de béton diminue également la porosité. Ces auteurs ont découvert que le coefficient de capillarité le plus faible correspondait au pourcentage d'incorporation le plus élevé de déchet.

IV.3.4.4.1. Densité apparente sèche et porosité des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR

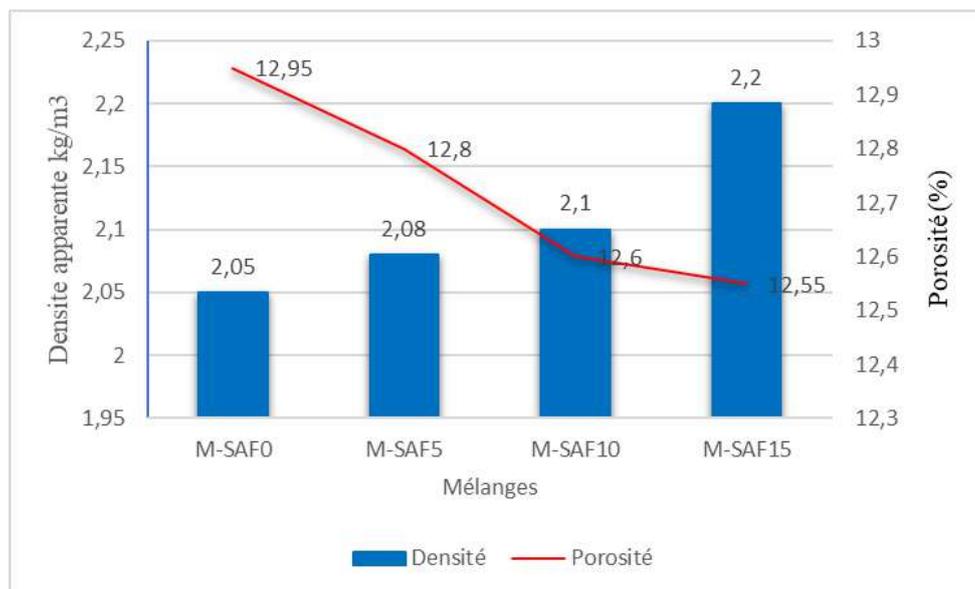


Figure IV.27 (a) Densité et porosité de mélange M-SAF0 avec et sans PFR

L'évolution de la densité et de l'absorption du béton de sable alluvionnaire avec et sans PFR est illustrée dans la figure.IV.27 (a) Tout comme pour l'incorporation du SR, une augmentation de la densité apparente et une diminution de la porosité ont été détectées dans le béton durci, à mesure de l'incorporation des PFR. Dans ce cas, on peut expliquer cette amélioration des deux propriétés étudiées par le fait que la partie des vides du béton non occupée par le sable est remplie par les fines recyclées, qui sont plus petites.

Ainsi, à mesure que le taux de remplacement augmente, il y a moins de vides initialement occupés par l'eau, et le béton devient plus compact. En accord avec ces résultats, Ishikawa [155] a découvert qu'une teneur plus élevée en particules passant à travers un tamis de 0,150 mm contribue à diminuer la teneur en air, à mieux emballer les particules du mélange, et donc à augmenter la densité apparente. Tout comme pour le béton frais, l'effet filler prévaut sur l'effet de densité apparente inférieure des fines de béton par rapport au sable, pour la plage de taux d'incorporation testée.

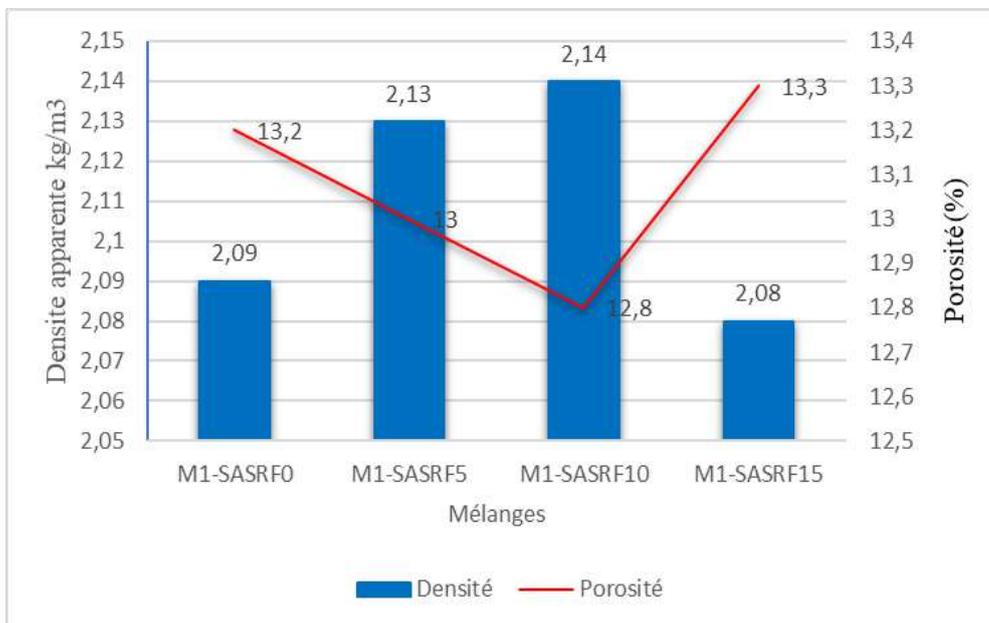


Figure IV.27 (b) Densité et porosité de mélange M1-SASRF0 avec et sans PFR

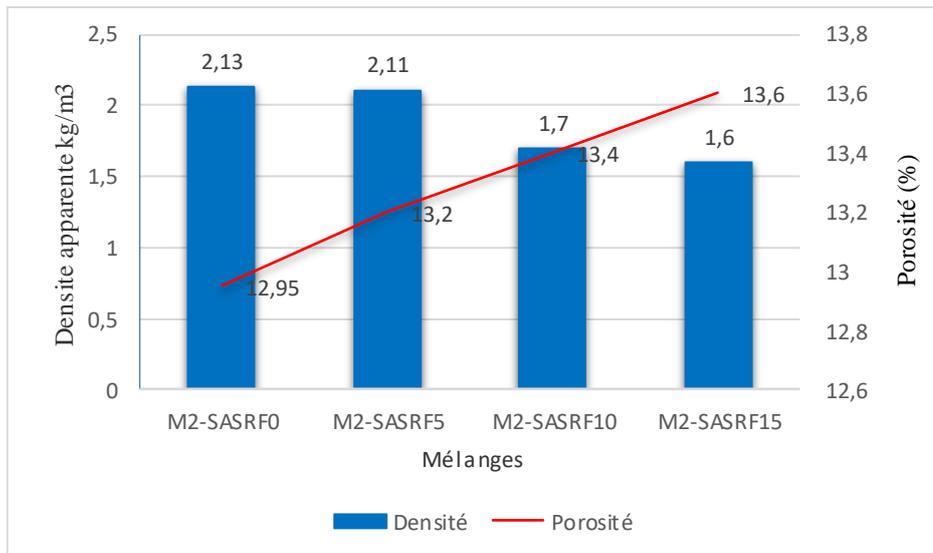


Figure IV.27 (c) Densité et porosité de mélange M2-SASRF0 avec et sans PFR

L'influence des PFR sur la densité et la porosité des bétons à base de sable mélangé est légèrement différente par rapport au béton ordinaire (témoin), car on observe une augmentation de la densité de l'ordre de 1.91 % et 2.39 %, respectivement, pour le mélange M1-SASR avec l'incorporation de 5 % et 10 % de fines, et une diminution de 0.47 % de la densité avec 15 % de fines.

On constate qu'au-delà de 10% de fines, il y a un effet négatif sur la densité et ainsi sur la porosité du mortier. Cela peut s'expliquer par la quantité supplémentaire de fines qui crée des vides entre les gros grains de sable, entraînant une augmentation de la porosité et une diminution de la densité.

Pour le mélange M2-SASR, on remarque d'après les résultats présentés dans la figure IV.27 (b) que l'incorporation des fines diminue la densité et augmente la porosité de ce dernier pour tous les taux de remplacement. La diminution est de l'ordre de 0.93 %, 20.18 % et 24.88 %, respectivement, pour l'incorporation de 5 %, 10 %, et une augmentation de porosité de l'ordre de 1.93 %, 3.47 %, et 5 %, respectivement. On constate que la présence de fines en quantité élevée conduit à une diminution de la densité et à une augmentation de la porosité, puisque le mortier M2-SASR contient plus d'éléments fins que les autres mortiers.

IV.3.4.5. Retrait de séchage des bétons de sable alluvionnaire

IV.3.4.5.1. Retrait de séchage des bétons de sable alluvionnaire témoins

Le retrait est une propriété qui dépend du temps, tout comme le fluage, mais dans ce cas, aucune charge n'est nécessaire pour que la déformation se produise dans le béton, [160]. Le rétrécissement se divise en quatre types : retrait plastique, autogène, de séchage et de carbonatation. Étant la cause la plus courante des fissures formées dans le béton, son intérêt sur le plan structurel est croissant.

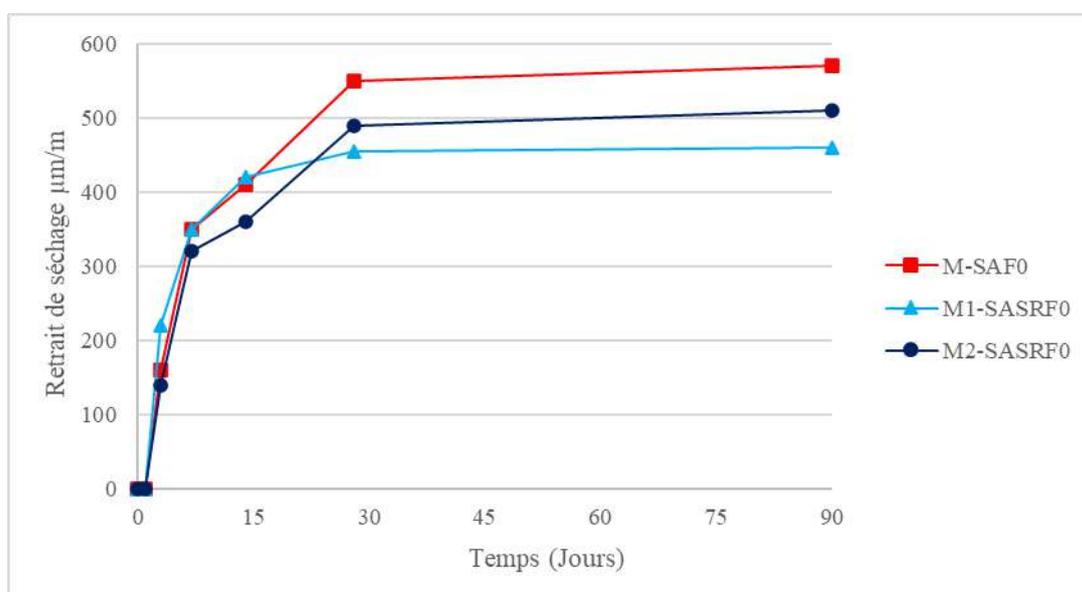


Figure IV.28. Retrait de séchage en fonction de l'âge des bétons de sable (sans ajout de PFR) M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0.

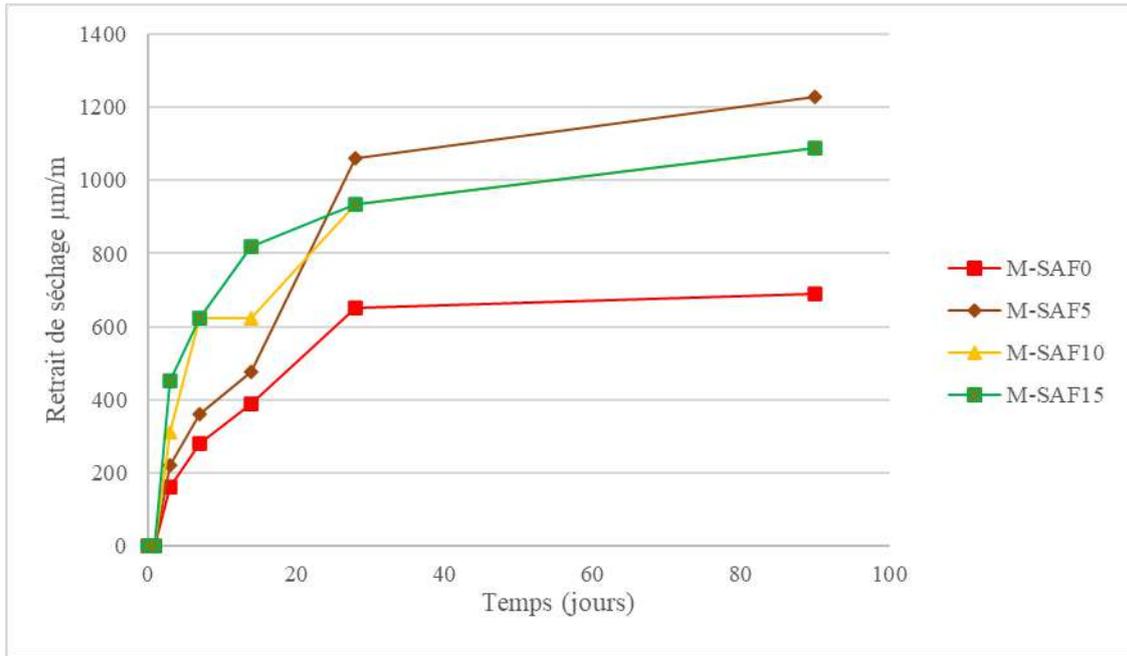
Le retrait de séchage des mortiers M-SAF0, M1-SASRF0 et M2-SASRF0 sans PFR (témoins) est présenté dans la figure IV.28. Les mélanges sont similaires pendant le temps de prise, ce qui se traduit par une augmentation du retrait de séchage en fonction du temps, avec une plus grande importance dans les 28 premiers jours en raison de l'évaporation de l'eau. Au-delà de cette période, une légère augmentation est observée dans tous les types de bétons étudiés, des résultats similaires à ceux observés dans l'étude de [137]. Cependant, les résultats obtenus montrent une diminution du retrait pour les bétons de sable alluvionnaire mélangé avec du sable recyclé M1-SASRF0 et M2-ASRSF0 par rapport aux bétons fabriqués avec 100 % de sable alluvionnaire M-SAF0.

Ces diminutions sont respectivement de l'ordre de 17,27 % et 10,90 % à 28 jours, et de l'ordre de 19,30 % et 7,02 % à 90 jours. Des observations similaires ont été faites dans les travaux de [137,], qui ont constaté que l'ajout d'AR avait un effet positif sur le retrait. Par conséquent, le mélange M1-ASRS0 présente le retrait le plus faible par rapport au M2-ASRSF0. L'augmentation du retrait lors de l'incorporation de 25 % de SR (M2-ASRSF0) par rapport au mélange incorporant 15% M1-ASRSF0 est due à la présence d'une grande quantité de SR, qui augmente le rapport E/C lors du mélange. Dans le même contexte, Dhir, Obe et al., [156] ont déclaré qu'avec un niveau de remplacement de 20 % de ACR, le retrait du béton n'a pas été influencé de manière significative. Cependant, lorsque le taux a été augmenté à 100 % d'ACR grossier, le retrait a augmenté de 20 % à 50 %. Malgré cela, le retrait du M2-SASRF0 reste inférieur à celui du M-SAF0. On peut donc conclure que l'incorporation de SR jusqu'à 25 % améliore le retrait du béton de sable alluvionnaire.

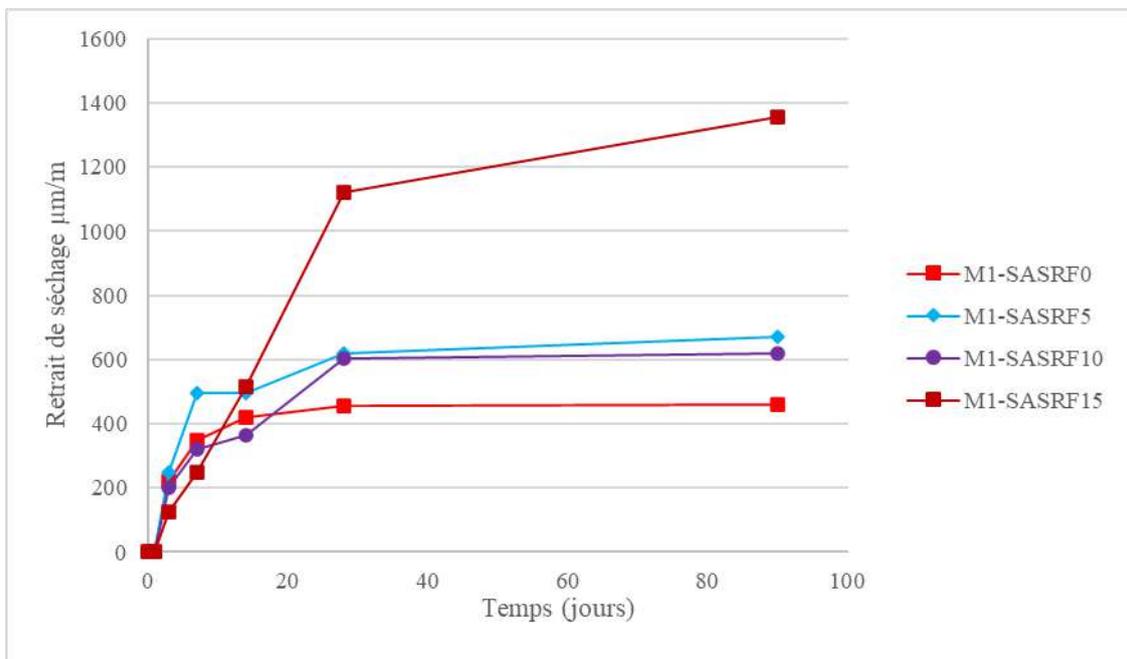
IV.3.4.5.2. Retrait de séchage des bétons de sable alluvionnaire avec et sans PFR

La figure 14 (b, c, d et e) montre que l'incorporation jusqu'à 10 % de PFR a un effet positif sur le retrait. Les mortiers M1-SASRF5 et M1-SASRF10 présentent une diminution du retrait par rapport au mortier M-SA (témoin), avec des réductions de 4,61 % et 6,92 % à 28 jours, et de 2,9 % et 10,14 % à 90 jours, respectivement. Cependant, au-delà de 10 % de PFR, une augmentation du retrait par rapport au béton M-SA est observée.

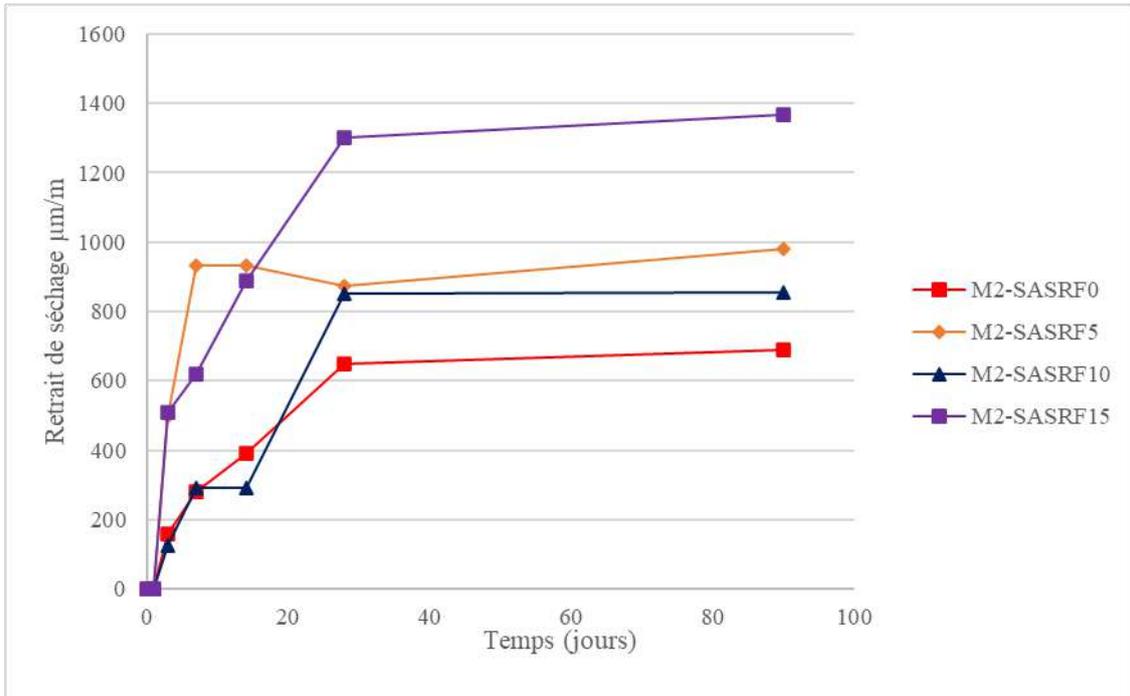
La probable raison de l'amélioration du phénomène de retrait réside dans l'effet de remplissage des vides interstitiels avec des PFR, créant ainsi une microstructure très dense qui limite les microfissures et les mouvements internes des bétons de sable alluvionnaire. Cela s'explique également par la présence de matériau cimentaire non hydraté, qui, en réagissant avec l'eau, forme des hydrates, induisant un durcissement interne à long terme qui limite le phénomène de retrait. En résumé, ces résultats indiquent que l'ajout jusqu'à 10 % de PFR a un impact positif sur le retrait du béton de sable alluvionnaire.



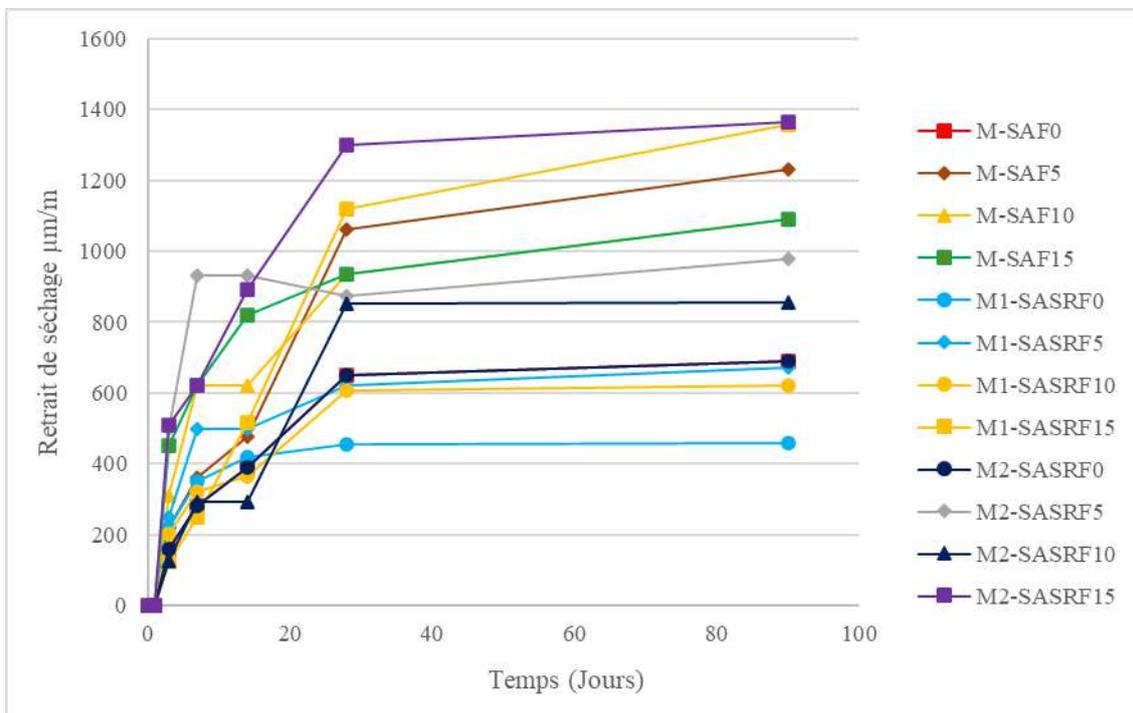
(a) M-SAF0 avec et sans PFR



(b) M1-SASRF0 avec et sans PFR



(c) M2-SASRF0 avec et sans PFR



d) Retrait des mélanges étudiés

Figure IV.29 (a,b,c et d) Retrait de séchage des mélanges avec et sans ajout de poudre fine en fonction du temps.

IV.3. Conclusion

L'analyse exhaustive des résultats des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes permet de mettre en évidence les points essentiels de ce chapitre :

- -Le sable dunaire étudié est caractérisé par une granulométrie très fine et discontinue, ce qui nécessite une correction de sa granulométrie ;
- Les bétons élaborés à partir de 100 % de sable de dunes nécessitent une quantité d'eau plus élevée en raison de leur faible module de finesse ;
- L'ouvrabilité du béton diminue avec l'augmentation du taux de sable de dunes ;
- Les sables corrigés à partir du mélange de sable de dunes et de sable recyclé montrent une amélioration du module de finesse par rapport à 100% de sable de dunes ;
- L'incorporation de granulats recyclés améliore les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton de sable de dunes étudié ;
- La perte de masse des mortiers de sable corrigé est élevée par rapport au mortier composé à 100% de SD ;
- Le béton à base de 100 % SR présente une faible performance mécanique, ainsi qu'un retrait et une perte en poids élevés par rapport aux autres mélanges étudiés.
- L'incorporation de sable recyclé dans le béton de sable alluvionnaire entraîne une légère diminution de la résistance mécanique à court terme. Cependant, le remplacement de 25% de sable recyclé par du SA conduit à une augmentation de la résistance mécanique à long terme grâce au ciment non hydraté ;
- L'incorporation de sable recyclé dans le béton de sable alluvionnaire montre des effets positifs sur la densité apparente, la porosité, le retrait et la perte en poids ;
- L'utilisation de poudre fine de granulats recyclés (PFR) dans le béton, en tant que substitution partielle du ciment, conduit à une diminution de la résistance mécanique.

Cependant, cette diminution est faible pour des taux de remplacement n'excédant pas 15 %. La substitution de ciment Portland par PFR montre une amélioration de la densité apparente, de la porosité, du retrait et de la perte en poids des bétons étudiés.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif initial de notre étude était de répondre à une double approche de l'utilisation des granulats recyclés (sable et fines) issus des déchets de la démolition dans les matériaux cimentaires. Notre recherche a apporté des réponses dans un contexte économique et environnemental visant à réduire l'impact environnemental du stockage des déchets, ainsi que l'extraction de matières naturelles non renouvelables et leur utilisation dans la construction.

Le but de ce projet est d'étudier dans un premier temps les effets de la correction granulométrique du sable de dune et de l'ajout de sable recyclé provenant de béton brisé démolé sur les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques du béton de sable. Ainsi, après une série d'expérimentations, du sable recyclé (SR) a été utilisé pour modifier le sable des dunes (SD), et deux proportions ont finalement été retenues, à savoir : 60%SD+40%SR et 50%SD+50%SR. Les paramètres utilisés dans cette étude comprennent l'ouvrabilité, la densité apparente, la porosité, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le retrait.

En deuxième lieu, une substitution du ciment Portland par la poudre des fines recyclées (PFR) avec les pourcentages suivants 5 %, 10 %, et 15 % a été effectuée, étudiant ainsi leur effet sur le béton à base de sable alluvionnaire (SA) et de sable recyclé (SR), avec deux proportions à savoir : 85% SA + 15% SR et 75% SA + 25% SR.

L'étude de l'ensemble des résultats concernant les caractéristiques mécaniques et rhéologiques des bétons étudiés a permis de dégager les principales conclusions de ce travail :

- Les essais sur béton frais se concentrent sur les mesures d'ouvrabilité à l'aide du test d'ouvrabilité LCL. Cette dernière montre que le temps d'écoulement du mélange augmente avec l'augmentation de la teneur en sable de dunes ;
- Un béton composé à 100% de sable de dunes consomme plus d'eau qu'un mélange à base de sable modifié car sa granulométrie est très fine ;
- Utiliser du sable recyclé pour corriger la granulométrie du sable des dunes, ce qui a un effet positif sur l'amélioration des propriétés physiques (module de finesse).
- La perte en poids est plus importante pour les bétons réalisés avec un sable de dunes corrigé avec un sable recyclé comparativement au béton de sable de dunes ;

- La correction granulométrique du sable recyclé par du sable alluvionnaire a eu un effet positif sur l'amélioration de la caractéristique physique (module de finesse) ;
- L'incorporation de sable recyclé dans le mélange du béton de sable alluvionnaire a légèrement réduit la résistance mécanique des bétons étudiés ;
- Le mélange contenant 25 % de sable recyclé a montré une meilleure résistance à la compression à long terme (90 jours) par rapport au mélange 100 % SA ;
- L'incorporation de SR et de PFR dans le mélange du béton de sable alluvionnaire a légèrement réduit la résistance mécanique des bétons étudiés ;
- L'incorporation de SR avec des pourcentages de 15 % et 25 % dans le béton de sable alluvionnaire a montré une amélioration du retrait par rapport au mélange 100% SA ;
- L'incorporation de PFR avec des pourcentages de 10 % dans le béton de sable alluvionnaire a montré une amélioration de densité ;
- Les mélanges contenant 15 % de SR et 5 % et 10 % de PFR présentent un meilleur retrait que les autres mélanges ;
- L'ajout de 15 % de sable recyclé et de 10 % de PFR donne des résultats positifs, encourageant l'utilisation de déchets de béton recyclé comme substitut au sable et au ciment, pour des raisons à la fois économiques et environnementales dans le contexte de la valorisation des déchets de construction.

Dans une perspective globale, l'étude suggère que l'intégration de granulats et de fines recyclées dans la formulation des matériaux cimentaires peut contribuer à des pratiques constructives plus durables, réduisant ainsi l'empreinte environnementale tout en préservant la qualité des structures.

Ces résultats offrent des perspectives prometteuses pour l'industrie de la construction, incitant à poursuivre la recherche et le développement dans le domaine des matériaux recyclés pour une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]: **PN Recybéton.** Etude de faisabilité. Projet R&D. (Recyclage complet des bétons).**2011.**
- [2]: **Xiao J.,** [An overview of study on recycled aggregate concrete in China]. (Construction and Building Materials). **2012a.**
- [3]: **Ulsen C.,** [Production of recycled sand from construction and demolition waste]. (Construction and Building Materials). **2013.**
- [4]: **Pacheco-Torgal.,**[Handbook of recycled concrete and demolition waste]. (Woodhead Publishing, Oxford). **2013.**
- [5]: **El Euch Khay S.,** [Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements]. (Construction and Building Materials). **2010.**
- [6]: **Belferrag A.,** [Improvement of the compressive strength of mortar in the arid climates by valorization of dune sand and pneumatic waste metal fibers]. (Construction and Building Materials). **2013.**
- [7]: **Belferrag A.,** [Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates]. (Construction and Building Materials). **2016.**
- [8]: **Taha R.,** [Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases]. (J Mater Civ Eng). **2002.**
- [9]: **Hu L.,** [Feasible use of cement treated crushed waste clay brick aggregate as road subbase]. (International Conference on Energy and Environmental Science). **2011.**
- [10]: **Brown AV.,** [Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement]. (Dissertation for the degree in Masters in Civil Engineering). Brigham Young University; **2006.**
- [11]: **Gabr AR.,** [Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction]. (J Mater Civ Eng). **2012.**
- [12]: **Papp WJ.,** [Behavior of construction and demolition debris in base and subbase applications]. (Recycled Materials in Geotechnical Applications). **1998.**
- [13]: **Lim S.,** [Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials]. (Journal of the Transportation Research Board). **2003.**

- [14]: **Guthrie WS.** [Selecting optimum cement contents for stabilizing aggregate base materials]. (Technical Report for the Texas Department of Transportation). **2002.**
- [15]: **Bazaz JB.** [Performance of concrete produced with crushed bricks as the coarse and fine aggregate]. (The Geological Society of London). **2006.**
- [16]: **Ainchil JP.** [Design and execution of soil cement layers with C&D materials]. (2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment). São Paulo, Brazil: RILEM Publications SARL **2009.**
- [17]: **Wong YD.** [Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt]. (Waste Manage). **2007.**
- [18]: **Agrela F.** [Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga]. (Resour Conserv Recy). Spain **.2012.**
- [19]: **Ebrahim Abu El-Maaty Behiry A.** [Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer]. (Ain Shams Engineering Journal). Egypt.**2013.**
- [20]: **Braga M.** [Incorporation of fine concrete aggregates in mortars]. (Construction and Building Materials).**2012.**
- [21]: **Possan E.** [CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: a case study]. (Construction and Building Materials). dos Santos, A.C.P **2017.**
- [22]:**Mehta P.K.** [Concrete- Microstructure-Properties- and Materials]. (McGraw,Hill Education). **2014.**
- [23]: **NOA A.** [Earth system research laboratory- Global monitoring division- Trends in atmospheric carbon dioxide]. (Earth Syst. Res. Lab). P **2020.**
- [24]: **Scrivener K-L.** [Future Cements Options for the future of cement]. (Indian Concr. J). **2014.**
- [25]: **Scrivener K-L.** [Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry]. (. Cement Concr. Res.). **2018.**
- [26]: **Ahmad J.** [Concrete with Partial Substitution ofWaste Glass and Recycled Concrete Aggregate]. (. Materials.). **2022.**
- [27]: **Abdeldjalil M.** [Application of a Granular Model to Identify the Particle Size of the Granular Mixtures of Concrete Based on Dune Sands]. (. Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates.). **2022.**
- [28]: **Song S.** [Flow liquefaction instability and the permissible range of fractional order of sand]. (. European Journal of Environmental and Civil Engineering.). dos Santos, A.C.P **2022.**
- [29]: **Khetab R.** [valorisation du sable de dune]. (. thèse de doctorat.). Alger. **2006.**

- [30]: **Azzouz H** [Etude des bétons à base des sables de dune]. (. mémoire de magister.). université de Biskra. **2009**
- [31]: **Mekhermeche A** [Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes]. (. mémoire de magister.). université de Ouargla. **2012**
- [32]: **Belkhiri H** [Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses]. (. Mémoire de Fin d'Etudes.). université de Djelfa. **2016**
- [33]: **Guermi L** [contribution à l'amélioration certaines caractéristiques du béton de structure a base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques]. (. mémoire de magister.). université de Ouargla. **2013**
- [34]: **Tsoar H.** [Types of aeolian sand dunes and their formation. In: Balmforth, N.J., Provenzale, A. (Eds.). (.Lecture Notes in Physics. Springer,..). **2001**.
- [35]: **Habes A.** [The geology of dune sand]. (. King Saud University, Department of Geology and Geophysics,..). Saudi Arabia. **2011**.
- [36]: **Iversen J.D.** [The effect of wind speed and bed slope on sand transport]. (. Sedimentology.). **1999**.
- [37]: **Lancaster N.** [Geomorphology of Desert Dunes]. (.Routledge.). **1995**.
- [38]: **Johnson P.E.** [Simple algorithms for remote determination of mineral abundances and particle sizes from reflectance spectra]. (.Journal of Geophysical Research.). **1992**.
- [39]: **Ghrefat H,A.** [Modeling grain size variations of aeolian gypsum deposits at White Sands]. (.using AVIRIS imagery- Geomorphology.). New Mexico **2007**.
- [40]: **Thomas D.S.G ..** [Analysis of linear dune sediment–form relationships in the Kalahari Dune Desert]. (.Earth Surface Processes and Landforms.).**1988**.
- [41]: **Aitt M,B,C.** [Desert dunes of the Kermit Sandhills, Winkler County, Texas]. (.Master Thesis,..). The University of Texas-USA **1969**.
- [42]: **Mckee E,D.** [Structures of dunes at White Sands National Monument- New Mexico - and a comparison with structures of dunes from other selected areas]. (.Sedimentology..).**1966**.
- [43]: **Jin B.H.:** [Engineering Characteristics of Concrete Made of Desert Sand from Maowusu Sandy Land. In Applied Mechanics and Materials..]. (.Trans Tech: Zurich, Switzerland,..). **2012**.
- [44]: **Westerholm M.** [Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars.]. (.Cem. Concr. Compos.,).. **2008**.

- [45]: **Lee, E.** [Effect of Dune Sand on Drying Shrinkage Cracking of Fly Ash Concrete.]. (.Appl. Sci.,).. **2022**.
- [46]: **Wille K.** [Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing]. (.Mater. Struct.,).. **2012**.
- [47]: **Ran Q.** [Adsorption Mechanism of Comb Polymer Dispersants at the Cement/Water Interface]. (.J. Dispers.). Sci. Technol **2010**.
- [48]: **Luo F.** [Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand]. (. Construction and Building Materials.). **2013**.
- [49]: **Krobba B.** [Formulation of a Repair Mortar Based on Dune Sand and Natural Microfibers. In Concrete Solutions]. (. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.). **2014**.
- [50]: **Wilmot T.** [Is Road Recycling A Good Community Policy].. **25 July 2004**.
- [51]: **Freedonia.** [World construction aggregates]..(Industry Study No. 2838): The Freedonia Group; **2012**.
- [52]: **EPA.** [Environmental Protection Agency]..(Available in: <http://www.epa.gov>), last accessed in December **2012**.
- [53]: **Eurostat.** Waste statistics in Europe. Available in: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>, last accessed in June 2013.
- [54]: **EU. DIRECTIVE 2008/98/EC** of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. European Union. 28 p.
- [55]: **Pacheco T** [Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework]. (. Construction and Building Materials.). Programme Horizon. **2020**
- [56]: **Hossain M.U** [Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA]. (. Resour. Conserv. Recycl).. **2016**
- [57]: **Christian Fischer and Mads Werge.** Eu as a recycling society, present recycling levels of municipal waste and construction and demolition waste in the eu. Working Paper ETC/SCP working paper 2/2009, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, **2009**.
- [58]: **Jesse A** [Sand mining at Poyang Lake, using landsat data from the U.S.]. (. NASA Earth Observ.).. **2016**
- [59]: **Lu J,X** [Synergetic recycling of waste glass and recycled aggregates in cement mortars. physical, durability and microstructure performance.]. (. Cement Concr. Compos.). **2020**.
- [60]: **Hansen TC.** [Recycling of Demolished Concrete and Masonry.]. (. UK: E & FN Spon). London. **1993**.

- [61]: **Brown AV.** [Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement]. (Dissertation for the degree in Masters in Civil Engineering..). Brigham Young University .**2006**.
- [62]: **Azam A.** [Geotechnical properties of blends of recycled clay masonry and recycled concrete aggregates in unbound pavement construction]. (J Mater Civ Eng).**2012**
- [63]: **Oner A.** [An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete]. (Cem Concr Compos).**2007**.
- [64]:**Huang CH.** [Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash]. (Construction and Building Materials)..**2013**
- [65]: **Serpa D.** [Concrete made with recycled glass aggregates: Mechanical performance]. (ACI Mater J)..
- [66]: **LNEC E471.**[Guide for the use of coarse recycled aggregates in concrete]. (National Laboratory of Civil Engineering). Portugal .**2006**.
- [67]: **DIN 4226** ..[Aggregates for mortar and concrete, Part 100: Recycled aggregates]. (Recycled aggregates. Deutsches Institut für Normungswesen (DIN)). **2002**.
- [68]: **JIS 5022.**[Recycled aggregate for concrete-class]. (M-Japan Standards Association).. Japan **2012**.
- [69]: **EN-12620**...[Aggregates for concrete]. (Comité Européen de Normalisation (CEN)).. (CEN), Brussels, Belgium; **2002**.
- [70]: **OT 70085.**[Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris. Objectif Technique]. (Instruction Technique- Eidgenossenschaft, Switzerland)..**2006**.
- [71]: **Queensland Method.**[Methods of sampling and testing aggregates].. (Queensland Standard).. Australia
- [72]: **Etxeberria M.** [Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete]. (Cem,Concr, Res).. Japan **2007**.
- [73]: **Kim S.** [Evaluation of the bond behavior of steel reinforcing bars in recycled fine aggregate concrete]. (Cem, Concr, Compos).. **2014**.
- [74]: **Lee S.** [Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack]. (Waste Manag).. **2009**.

- [75]: **Wegen G.** [Recycled construction and demolition waste as a fine aggregate for concrete. In Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction-Use of Recycled Concrete Aggregate]. (.Construction and Building Materials).. London November **1998**.
- [76]: **Song I,H.** [Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate]. (.Construction and Building Materials).. **2014**.
- [77]: **Chisholm D.** [Best Practice Guide for the Use of Recycled Aggregates in New Concrete]. (.Cement & Concrete Association). New Zealand-**2011**.
- [78]: **Solyman M.** [Classification of Recycled Sands and Their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures. Klassifizierung von Recycling-Brechsanden und Ihre Anwendungen Für Beton und Für Straßenbaustoffe 196]. (.Ph.D. Thesis). Kassel University Press, Kassel, Germany -**2005**.
- [79]: **Geng J.** [Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete.]. (.Construction and Building Materials). Kassel University Press, Kassel, Germany .**2013**.
- [80]: **Kim K.** [Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability.]. (.Construction and Building Materials)..**2013**.
- [81]: **Somna R.** [Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete.]. (.Cem, Concr, Compos)..**2012**.
- [82]: **Yaragal S, C.** [Performance studies on concrete with recycled coarse aggregates.]. (.Advances in Concrete Construction)..**2016**.
- [83]: **Pereira P.** [Structural Concrete with Incorporated Recycled Concrete Fine Aggregates: Influence of Superplasticizers on the Mechanical Behaviour.]. (.Master's Thesis, Instituto Superior Técnico). Lisbon- Portugal.**2010**.
- [84]: **Bogas A.** [Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates.]. (.J. Clean. Prod)..**2016**.
- [85]: **Ramos D.** [reeze Thaw Resistance of Concrete Produced with Fine Recycled Concrete Aggregates]. (.Master's Thesis). Universidade de Lisboa/Instituto Superior Técnico. - Portugal- **2014**.
- [86]: **Mukai T.** [Fundamental Study on Bond Properties between Recycled Aggregate Concrete and Steel Bars]. (.Cement Association of Japan). Japan - **1978**.
- [87]: **Silva R.** [Use of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes in the Production of Structural Concrete]. (.Ph.D. Thesis). Universidade de Lisboa, - Portugal - **2015**.

- [88]: **Khatib M.** [Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate]. (.Cem. Concr. Res.). Universidade de Lisboa, - Portugal - **2005**.
- [89]: **Evangelista L.** [Incorporation de fines de béton de démolition dans la fabrication de mortier par substitution du ciment.]. (. Conférence : 31ème Rencontre). Université de Cachan Cachan **2014**.
- [90]: **Katz A.** [Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.]. (.Cem. Concr.). Universidade de Lisboa, -**2003**.
- [91]: **Ahmed S.** [Properties of concrete containing recycled fine aggregate and fly ash. In Proceedings of the Concrete]. (.Conference, Perth.). Australia, - **2011**.
- [92]: **Sagoe-Crentsil.** [Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled coarse aggregate]. (.Cem, Concr, Res.), - **2001**.
- [93]: **Poon C.S.** [Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete]. (.Mater. Struct.), - **2006**.
- [94]: **Oliveira M.B.**[The influence of retained moisture in aggregate from recycling on the properties of new hardened concrete]. (.Waste Manage.). - **1996**.
- [95]: **Poon C.S.**[Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete]. (.Cem. Concr. Res). - **2004**.
- [96]: **Tabsh S, W.**[Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete]. (.Construction and building materials). - **2009**.
- [97]: **Li Z.**[Internal curing effect of saturated recycled fine aggregates in early-age mortar]. (.Cem. Concr. Compos). - **2020**.
- [98]: **Han Y.D.**[Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs]. (.Construction and building materials). - **2014**
- [99]: **Neville A,M.**[Properties of Concrete, fifth ed., Pearson]. (.Pearson, Harlow England). - New York- **2011**
- [100]: **Silva R.V.**[Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete- a review]. (.Construction and building materials). - **2015**
- [101]: **Tam V,W,Y.**[Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete.]. (.Construction and building materials). - **2015**
- [102]: **Knaack, A.M.**[Creep and shrinkage of normal-strength concrete with recycled concrete aggregates.]. (.ACI Mater). - **2015**

- [103]: **NFP (18-404)** [Creep and shrinkage of normal-strength concrete with recycled concrete aggregates.]. (.Normes française). - **2015**
- [104]: **Gorisse F.** [Essai et contrôle des bétons.]. (.Edition Eyrolles). Paris - **1978**
- [105]: **NF P (18-555)**.. [Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.]. (.Normes française). - **1990**
- [106]: **NF P (18-560)**.. [Analyse granulométrique]. (.Normes française). - **1990**
- [107]: **NF P (18-598)**.. [Equivalent de sable]. (.Normes française). - **1991**
- [108]: **NF EN (1097-6)**.. [Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau]. (.Normes française). - **2014**
- [109]: **NF EN (196-6)**.. [Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau]. (.Méthodes d'essai des ciments : Partie 6.Normes française). - **2012**
- [110]: **EN (196-1)** ,[détermination des résistances mécaniques]. (.Méthodes d'essai des ciments : Partie 1.Normes française). - **2006**
- [111]: **NF P (15-433)** ,[Détermination du retrait et du gonflement]. (.Méthodes d'essais des ciments). - **1994**
- [112]: **EN P (1015-10)** ,[Determination of dry bulk]. (Methods of test for mortar for masonry, Part 10,European Standard). - **1994**
- [113]: **Tailhan J.L.**,[From local to global probabilistic modeling of concrete cracking]. (Ann. Solid Struct. Mech). - **2010**
- [114]: **Dal Pont S L.** [Modeling concrete under severe conditions as a mutli-phases material]. (Nucl. Eng. Des). - **2011**
- [115]: **XP P (18-540)** ,[Granulats, définitions, conformités, spécifications]. – **1997**.
- [116]: **Padmakumar G,P.** [Characterization of aeolian sands from Indian desert]. (.Eng Geol.). - **2012**
- [117]: **Vangala P.** [Effect. M.L. of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour]. (.Geotext. Geomembr.). - **2016**
- [118]: **Abreu V.** [The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete]. (.Construction and building materials.). - **2018**
- [119]: **Ferreira R,L,S.** [Evaluation of the physical-mechanical properties of cement-lime based masonry mortars]. (.Construction and building materials.). - **2018**
- [120]: **Carla W, M.** [Physical geology]. (.second edition, Wm.C.Brown.). USA - **1989**
- [121]: **Jesus S.** [Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste]. (.Construction and building materials.). - **2019**

- [122]: **Silva J.** [Incorporation of fine ceramics in mortars]. (*Construction and building materials.*). - **2009**
- [123]: **Oliveira R.** [Incorporation of fine glass aggregates in renderings]. (*Construction and building materials.*). - **2013**
- [124]: **Al-Harthy A,S.** [The properties of concrete made with fine dune sand]. (*Construction and building materials.*). - **2007**
- [125]: **Abu Seif E,S.** [Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand. Kharga oasis. western desert. Egypt: an experimental study]. (*Jordan Journal of Civil Engineering.*). – **2013b.**
- [126]: **Malešev M.** [Recycled concrete as aggregate for structural concrete production.]. (*Sustainability.*). – **2010.**
- [127]: **Penacho P.** [Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate.]. (*Cement & Concrete Composites.*). – **2014.**
- [128]: **Bendimerad A, Z.** [Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete.]. (*Construction and Building Materials.*). – **2016.**
- [129]: **Pedro D. Z.** [Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties.]. (*Construction and Building Materials.*). – **2017.**
- [130]: **Bravo M.** [Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants.]. (*Construction and Building Materials.*). **2015.**
- [131]: **Alexandridou, C.** [Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants.]. (*Journal of Cleaner Production.*). **2018.**
- [132]: **Farinha C.** [Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars.]. (*Construction and Building Materials.*). **2015.**
- [133]: **Li, Z.** [Drying shrinkage of mortar manufactured with recycled fine aggregate at vary initial saturation degree.]. (*Construction and Building Materials.*). **2020.**
- [134]: **Ledesma E, F.** [Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production.]. (*Journal of Cleaner Production.*). **2015.**
- [135]: **Guettala S.** [Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder.]. (*Construction and Building Materials.*). **2011.**

- [136]: **Wu B.** [Shrinkage behavior of recycled lump/aggregate concrete containing recycled sand from weathered residual soil of granite.]. (Construction and Building Materials.). **2023.**
- [137]: **Corinaldesi V.** [Use of rubble from building demolition in mortars.]. (Waste Manag). **2002.**
- [138]: **Favaretto P.** [Characterization and use of construction and demolition waste from south of Brazil in the production of foamed concrete blocks.]. (Appl. Sci). **2017.**
- [139]: **Evangelista L.** [Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste.]. (Construction and Building Materials). **2015.**
- [140]: **Prosek Z.** [Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete.]. (Resour. Conserv. Recycl). Université de Cachan Cachan **2020.**
- [141]: **Resende MM.** [Pathology of mortar renderings.]. (Technology of Production of Renderings, Department of Civil). Portuguese.
- [142]: **Bordy A.** [Cement substitution by a recycled cement paste fine: role of the residual anhydrous clinker.]. (Construction and Building Materials.). **2017.**
- [143]: **Almeida N.** [Reuse of slurry from dimension stone industry in concrete production.]. (Masters in Construction Dissertation.). University of Lisbon ..**2004.**
- [144]: **Pan S-C** ..[Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties.]. (Cement Concrete Res). University of Lisbon ..**2003.**
- [145]: **Angelim RR.**[Influence of the addition of limestone, siliceous and clayish fines in the properties of mortars and renderings.]. (V Brazilian Symposium of Mortars Technology). University of Lisbon ..**2003**
- [146]: **Ozalp F.**[Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes.]. (Construction and Building Materials)...**2016.**
- [147]: **Samiei R.R.** (Construction and Building Materials)...**2015.**
- [148]: **Corinaldesi V.** (Construction and Building Materials)...**2009.**
- [149]: **Wang J.**...[Recycled cement.]. (Construction and Building Materials)...**2018.**
- [150]: **Ma X.**...[Effect of Ground Waste Concrete Powder on Cement Properties. Advances in Materials Science and Engineering. Article.]. (Advances in Materials Science and Engineering)...**2013.**
- [151]: **Abreu V.**...[The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete.]. (Construction and Building Materials)...**2018.**

- [152]: **Torres-Gómez...**[The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete.]. (. Materials)...**2016**.
- [153]: **Basheer L.**[Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland.]. **2005**.
- [154]: **Guo H.**[Durability of recycled aggregate concrete – A review. Cement & concrete composites.].(Cement & concrete composites). **2018**.
- [155]: **Ishikawa P.**[Properties of bedding mortars produced with artificial sand for structural masonry.].(Masters dissertation in civil engineering). State University of Campinas - Brazil -**2003**.
- [156]: **Dhir Obe.**[Sustainable Construction Materials: Recycled Aggregates.].(Elsevier Science & Technology). State University of Campinas - Brazil -**2019**.

Annexes

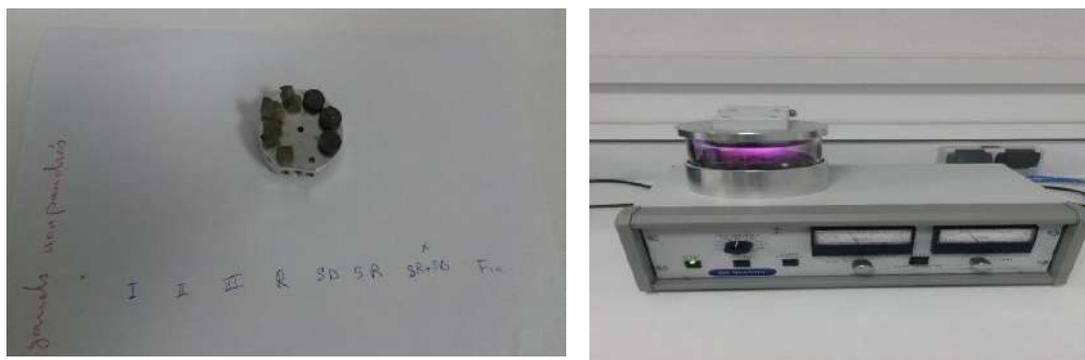
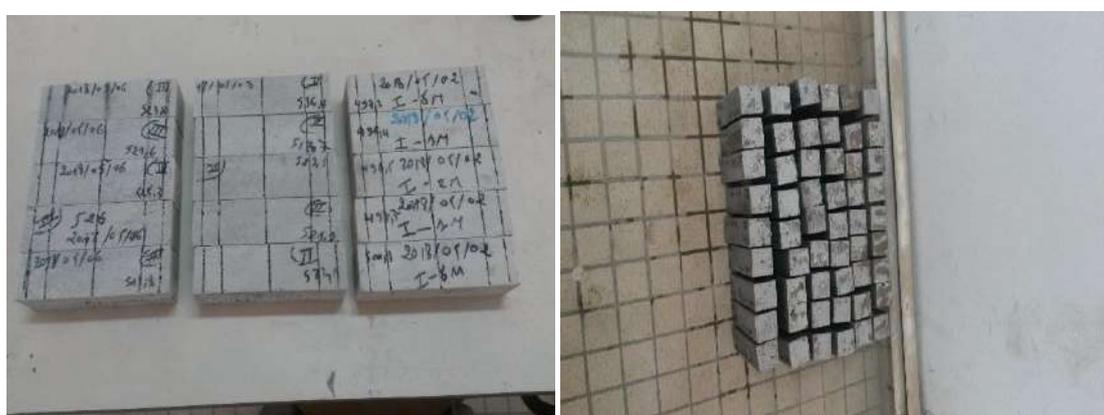


Photo 1-2: Préparation des échantillons pour l'essai MEB.

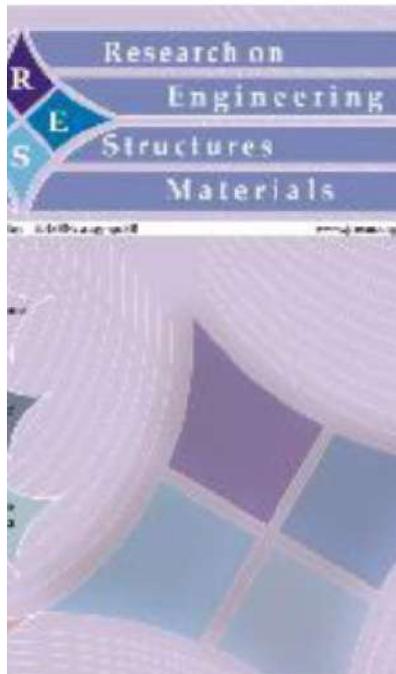


Photos 2-3: Conservation des éprouvettes.



Photo 3-4: Préparation des mélanges

Publication



The effect of using recycled materials (sand and fine powder) from demolished concrete waste in allu sand mortar

Samir Kennouche, Allaoua Belferrag, Djamel Samia Bouzouaid, Hachem Chaib

Online Publication Date: 30 August 2023

URL: <http://www.jresm.org/archive/resm2023.1>

DOI: <http://dx.doi.org/10.17515/resm2023.820>

Journal Abbreviation: *Res. Eng. Struct. Mater.*

Cite this article

Kennouche S, Belferrag A, Boutoutaou D, Bouzouaid S, Chaib H. The effect of using recycled materials (sand and fine powder) from demolished concrete waste in allu sand mortar. *Res. Eng. Struct. Mater.*, 2023; 9(4): 1309-1324.

Disclaimer

The opinions and statements expressed in the papers are on the responsibility of the authors and should not be regarded as those of the journal of Research on Engineering Structures Materials or its organization or related parties. The publishers make no warranty, explicit or implied, and no representation with respect to the contents of any article will be complete or accurate. The accuracy of any instructions, equations, or other information should be independently verified. The publisher and related parties shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly from the use of the content of this journal.