

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 aout 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie civil



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

Mémoire

Présenté

A

Université 20 Aout 1955 Skikda

Pour obtenir le titre de

Master

Spécialité

Génie Civil

Option

Matériaux en génie Civil

Par

Merdjia Amel

Thème

**Effets des taux de substitution en sables recyclés sur
les propriétés de béton de sable**

Soutenu le : 07/07/2026

Devant le jury composé de :

Président	Remeche Abdelkerim	MAA	Université de Skikda
Encadreur	Kherraf Leila	MCA	Université de Skikda
Examineur	Rezaiguia Nouha	MAA	Université de Skikda
Examineur	Boughamssa Wassila	MCB	Université de Skikda

Promotion 2025/2026



Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous.
Avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à Mme. KHERRAF Leila, mon encadrante, pour sa disponibilité, sa patience infinie et ses précieux conseils. Grâce à son accompagnement bienveillant, ses encouragements et ses orientations, j'ai pu structurer mes idées et les mettre en cohérence avec le cadre théorique acquis tout au long de mon cursus. Sa rigueur scientifique et ses remarques constructives ont été essentielles pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Mes sincères remerciements s'adressent tout particulièrement à Mr. REMECHE Abdelkrim président du jury, ainsi qu'à Mme REZAIGUIA Nouha et Mme BOUGHAMSSA Wassila et examinatrices, pour leurs remarques pertinentes et leurs suggestions constructives, qui contribueront assurément à améliorer la qualité de cette étude et à approfondir ma réflexion.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à tous les professeurs du Département de Génie Civil de l'Université de Skikda, qui m'ont transmis avec passion et dévouement leur savoir et leur expérience. Leur enseignement m'a permis d'acquérir les connaissances nécessaires pour franchir cette étape cruciale de mon parcours académique.

Enfin, je voudrais également remercier l'organisme LNHC (Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction) pour m'avoir permis d'effectuer mon stage pratique dans des conditions favorables. Un remerciement particulier à Mr. Abdelkrim Younes pour son accueil chaleureux, sa disponibilité et son accompagnement précieux tout au long de cette expérience, qui m'a permis d'approfondir mes connaissances pratiques et de mieux appréhender les aspects expérimentaux de ce mémoire.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chères parents pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

A mon mari pour son soutien, sa patience et ses précieux encouragements.

A mes chères filles DJINEN et ASSIL et à mes frères, à ma petite sœur MALEK ainsi qu'aux épouses de mes frères, que je considère comme mes propres sœurs pour leur présence, leurs encouragements constants.

A tous ma promotion de Génie Civil 2025/2026.

والصفحات السطر بين ليست مكانتهم ونعزهم نحبهم الذين ان
والقلب ذكراهم والذكرى سكوناهم فالقلب واعلى اجل مهم مقا ان
ينساهم لن

Amel

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Remerciement	/
Dédicase	/
Tables des matières.....	/
Liste des formules.....	/
Liste des figures.....	/
Liste des tableaux	/
Introduction générale.....	01
Chapitre 1 : Généralités sur le béton de sable et les fibres.....	03
1.1 Introduction.....	04
1.2 Le béton de sable.....	04
1.2.1 Définition	04
1.2.2 Historique du béton de sable	04
1.3 Les composants du béton de sable	05
1.3.1 Le sable	05
1.3.2 Le ciment	06
1.3.3 L'eau de gâchage	07
1.3.4 Les adjuvants	07
1.3.5 Les additions minérales	07
1.3.5.1. Filler calcaire	08
1.3.5.2 Laitier de haut fourneau	09
1.3.5.3 Fumée de silice	09
1.3.6 Les autres additions	09
1.3.6.1 Gravillons	09
1.3.6.2 Fibres	09
1.3.6.3 Colorants	09
1.3.7 Comparaison avec le béton ordinaire	09
1.4 Formulation du béton de sable.....	11
1.4.1 Approche théorique.....	12
1.4.1.1 Estimation du dosage en fines	12
1.4.1.2 Estimation du dosage en eau	13
1.4.2 Approche expérimentale	14
1.4.2.1 Estimation du dosage en eau	15
1.4.2.2 Estimation du dosage en sable	15
1.5 Caractéristiques du béton de sable.....	15

TABLE DES MATIERES

1.5.1 Maniabilité	15
1.5.2 Compacité	16
1.5.3 Comportement mécanique	16
1.5.3.1 Résistance à la compression	16
1.5.3.2 Résistance à la traction	17
1.5.3.3. Module d'élasticité	17
1.5.4 Retrait	17
1.6 Durabilité	18
1.6.1 Attaques chimiques	18
1.6.1.1 Attaques acides	18
1.6.1.2 Attaques par les sels	19
1.6.2.1 Chlorures	19
1.6.2.2 Sulfates	20
1.7 Domaines d'application du béton de sable.....	20
1.8 Avantages du béton de sable.....	21
1.9 Inconvénients du béton de sable.....	21
1.10 Généralités sur les fibres.....	21
1.10.1 Définition	21
1.10.2 Types des fibres	22
1.10.3 Domaines d'application des fibres.....	22
1.10.4 Fibres métalliques	23
1.10.5 Différents formes géométriques des fibres métalliques	24
1.10.6 Rôle des fibres	24
1.11 Conclusion.....	25
Chapitre 2 : Valorisation des déchets de construction et de démolition.....	26
2.1 Introduction.....	27
2.2 Définition des déchets.....	27
2.3 Origines de production des déchets.....	27
2.4 Classification des déchets selon leur nature.....	28
2.5 Les déchets dans le domaine du génie civil.....	28
2.5.1 Définition des déchets de construction et déconstruction.....	29
2.5.2 Sources de production des déchets de construction et déconstruction	29
2.5.3 Classification des déchets de construction et déconstruction	29
2.5.4 Enjeux environnementaux et économiques	30

TABLE DES MATIERES

2.5.5 Gestion des déchets de construction et déconstruction	31
2.5.5.1 Les étapes de gestion des déchets de construction et déconstruction	31
A. Tri à la source	31
B. Stockage temporaire	31
C. Transport et traçabilité	31
D. Traitement et valorisation	32
E. Élimination	32
2.5.6 Méthodes de valorisation	32
a. Réemploi	33
b. Réutilisation	33
c. Recyclage	33
d. Valorisation énergétique	33
2.5.7 Différents types de déchets valorisés dans le génie civil	33
2.5.7.1 Déchets de chantier (déblai)	33
2.5.7.2 Déchets de démolition	33
2.5.7.3 Béton recyclé.....	34
2.5.7.4 Asphalte recyclé	34
2.5.7.5 Plâtre recyclé.....	34
2.5.7.6 Verre recyclé	34
2.5.7.7 Bois recyclé	34
2.5.7.8 Métaux ferreux et non ferreux.....	34
2.5.7.9 Matériaux composites et plastiques.....	35
2.5.7.10 Terre et matériaux excavés.....	35
2.5.7.11 Déchets industriels non dangereux	35
2.5.7.12 Cendres volantes et laitiers de haute fourneau.....	35
2.5.7.13 Déchets de carrières et mines	35
2.6 Cas de notre étude.....	35
2.6.1 Déchets de céramique sanitaire	36
2.6.1.1 Définition	36
2.6.1.2 Procédé de fabrication	36
2.6.1.3 Propriétés chimiques	37
a. Stabilité chimique.....	37
b. Résistance à la corrosion	37
c. Résistance à l'oxydation	37

TABLE DES MATIERES

d. Inertie chimique	38
2.6.1.4 Propriétés physiques des matériaux céramiques.....	39
a. Densité	39
b. Porosité.....	39
c. Propriétés de surface	39
2.6.2 Déchets de plâtre	39
2.6.2.1 Définition de plâtre	39
2.6.2.2 Procédé de fabrication	40
2.6.2.3 Caractéristiques et propriétés chimiques	41
2.6.2.4 Propriétés physiques	41
2.6.3 Etudes antérieurs sur le recyclage de déchets de céramique sanitaire et de plâtre....	
.....	43
2.6.4 Comparaison entre les déchets de plâtre et de céramique sanitaire	43
2.6.4.1 Composition chimique	43
2.6.4.2 Propriétés physiques	43
2.6.4.3 Avantages	44
2.6.4.4 Limites.....	44
2.6.4.5 Applications potentielles dans le génie civil	44
2.6.5 Justification du choix des matériaux étudiés	45
2.7 Conclusion.....	45
Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux.....	47
3.1 Introduction.....	48
3.2 Identification des matériaux de base utilisés.....	48
3.3 Caractéristiques des matériaux utilisés	48
3.3.1 Ciment	48
3.3.2 Sable de dune	50
3.3.3 Sable recyclé	51
3.3.3.1 Sable recyclé de céramique	51
a. Caractéristiques physiques	52
b. Caractéristiques chimiques	53
c. Analyse granulométrique	54
3.3.3.2 Sable recyclé de plâtre	54
a. Caractéristiques physiques	55
b. Caractéristiques chimiques	55

TABLE DES MATIERES

3.3.3.3 Courbe granulométrique global	59
3.3.4 L'adjuvant.....	58
3.3.5 Filler de calcaire	58
3.3.6 L'eau de gâchage.....	59
3.3.7 Les fibres.....	59
3.4 Méthodes expérimentales de caractérisation des matériaux	60
3.3 Caractéristiques des matériaux utilisés.....	60
3.4.1 Masse volumique absolue	60
3.4.2 Masse volumique apparente	61
3.4.3 Coefficient d'absorption d'eau	62
3.4.4 Equivalent de sable	63
a. Principe de l'essai	63
3.4.5 Analyse granulométrique.....	64
3.4.6 Module de finesse	64
3.5 Conclusion.....	65
Chapitre 4 : Programme expérimental et méthodologie des essais.....	66
4.1 Introduction.....	67
4.2 Programme expérimental.....	67
4.3 Formulation du béton de sable.....	67
4.3.1 Formulation du béton de sable témoin BS(100%SD).....	68
4.3.2 Notation des mélanges confectionnés	69
4.3.3 Compositions des différent mélanges.....	69
4.3.4 Confection des mélanges retenus	69
a/ Malaxage	69
b/ Corps d'épreuves	70
c/ Conservation	70
4.4 Méthodologie des essais.....	71
4.4.1 Essais effectués sur le béton à l'état frais.....	71
a/Affaissement au cône d'Abrams.....	71
b/La densité frais.....	72
c/ Air occlus.....	72
4.4.2 Essais à l'état durci.....	73
a/ Essai de compression.....	73
b/Résistance à la traction par flexion	73

TABLE DES MATIERES

4.4.3 Essais de durabilité.....	74
a/ Essai d'absorption par immersion.....	74
b/ Essai d'absorption par capillarité.....	74
c/ Essai des attaques chimiques [ASTMC267-97].....	75
4.5 Conclusion.....	76
Chapitre 5 :Résultats et discussions.....	77
5.1. Introduction	78
5.2 Propriétés à l'état frais.....	78
5.2.1 Masse volumique.....	78
5.2.2Affaissement	80
5.2.3 Air occlus.....	81
5.3 Propriétés à l'état durci.....	83
5.3.1 Résistance en compression.....	83
5.3.2 Résistance en traction par flexion.....	85
5.4 Durabilité.....	86
5.4.1 Absorption par immersion.....	86
5.4.2 Absorption par capillarité.....	87
5.5 Attaque chimique par les acides.....	89
5.5.1. Par acide H ₂ SO ₄	89
5.5.2 Par acide HCl.....	90
5.6 Conclusions.....	92
CONCLUSION GENERALE.....	94
Résumé	97
Références bibliographiques	98

Liste des figures

Figure 1.1: phare de port said en Egypte	05
Figure 1.2: Pont de New- York.....	05
Figure 3-1: Démonstration de l'effet filler	08
Figure 1-4 : Influence d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de D.....	14
Fig. 1.5: Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables.....	24
Fig. 1.6: Illustration de l'apport du renfort par des fibres [Haddad ou. N, 2015].....	24
Figure 2-1 : classification des Déchets de construction et de démolition(DCD).....	30
Figure 2-2 : Schéma de Gestion des Déchets de Construction.....	32
Figure 3- 1 : Courbe Granulométrique des trois types de sables	57
Figure 5-1 : Evolution de la densité des bétons testés.....	78
Figure 5-2 : Evolution de l'affaissement des bétons testés.....	80
Figure 5-3 : Evolution de l'air occlus des bétons testés.....	81
Figure 5-4 : Evolution de Résistance en compression des bétons testés.....	83
Figure 5-5 : Evolution de la Résistance en Traction par Flexion des Bétons testés.....	85
Figure 5-6 : Evolution de l'Absorption par Immersion des bétons testés.....	86
Figure 5-7 : Evolution de l'absorption par Capillarité des bétons testés.....	88
Figure 5-8 : Attaque chimique par H_2SO_4	89
Figure 5-9 : Attaque chimique par HCl	91

Liste des images

Image2-1 : Déchets de céramique sanitaire.....	36
Image2-2 : plafond en plâtre.....	41
Image 3-1 :Ciment utilisé.....	49
Image3-2 : Sable de Dune.....	50
Image 3-3 :Concasseur mécanique.....	52
Image 3-4 :Sable de déchet de céramique.....	52
Image 3-5 :Sable de déchet de plâtre.....	54
Image3-6 :Adjuvant utilisé.....	58
Image 3-7 : Filler de calcaire Utilise.	59
Image 3.8 : Les fibres métalliques utilisée.....	60
Image 3-9 : Pycnomètre pour l'essai de la Masse volumique absolue	61
Image3.10 : Essai Masse volumique apparente.....	62
Image 3-11 :Essai Coefficient d'absorption de sable.....	63
Image3-12 : Essai équivalents de sables.....	64
Image3-13 : Essai analyse granulométrique.....	64
Image4-1 : Malaxage.....	70
Image 4-2 : Eprouvettes avant et après le démoulage	70
Image4-3 : Conservation des éprouvettes dans un bain d'eau.....	71
Image4-4 : Essai d'affaissement	71
Image 4-5 : Essai de la densité frais	72
Image 4-6 : Mesure de l' air occlus.....	72
Image 4-7 : Essai de compression	73
Image 4-8 : Essai absorption par immersion	74
Image 4.9 : Essai absorption par capillarité.....	75
Image 4.10 : Essai attaque des solutions chimiques.....	76

Liste des formules

Désignation	Formule	Page
Formule : (1-1)	$V = \frac{1}{5} V_0 \cdot (d/D)$	12
Formule (1-2)	$(e + v) = 0.8 \times (d/D) 0.2$	13
Formule (1 - 3)	$e = (8001 + \alpha) \times \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{5}}$	15
Formule (1 - 4)	$E_c = 15000 + 350 \times \sqrt{(f_{c28})} [MPa]$	17
Formule (3 - 1)	$P_s = \frac{M_s}{(V_1 - V_2)}$	61
Formule(3-2)	$P_a = \frac{M}{V}$	62
Formule(3-3)	$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$	62
Formule(3-4)	$E_s = \frac{h_2}{h_1} \times 100$	63
Formule(3-5)	$M_f = \frac{\sum R_c}{100}$ La formule:	65
Formule(4-1)	$D = \frac{(M-M_0)}{v} \quad [g/cm^3]$	72
Formule (4-2)	$F_c = \frac{P}{S} \quad [N/mm^2]$	73
Formule(4-3)	$R_t = \frac{3}{2} \frac{F \times L}{B^3} \quad [N/mm^2]$	73
Formule(4-4)	$A_b = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad [\%]$	74
Formule(4-5)	$C = \frac{(m_i - m_d) \times 100}{A \times \sqrt{t}}$	75
Formule (4-6)	$\text{Perte de masse} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 [\%]$	76

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : comparatif approfondi : Béton de sable vs Béton ordinaire.....	10
Tableau 1-2 : Exemple de calcul basé sur la formule de Caquot.....	13
Tableau 1-3: Exemple de calcul basé sur la formule empirique de compacité granulaire bimodale.....	13
Tableau 1-4 : Facteurs influençant la maniabilité.....	16
Tableau 1-5 : Facteurs influençant la résistance aux acides.....	19
Tableau.1.6: Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment.....	22
Tableau2-1 : Composition chimique typique des utilisées pour la céramique(en%).....	37
Tableau 2-2 : Comparaison entre les déchets de plâtre et de céramique sanitaire.....	45
Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ42.....	49
Tableau 3.2 : Caractéristiques Physiques du ciment CPJ42.5.....	49
Tableau3.3: Composition chimique du ciment CPJ42.5.....	49
Tableau 3.4 : Caractéristiques physiques du Sable (SD).....	50
Tableau 3.5 : Composition Chimique du Sable de dune.....	51
Tableau3.6 : Analyse granulométrique de sable de dune(SD).....	51
Tableau 3.7: Caractéristiques physiques de sable de déchet de céramique.....	52
Tableau 3.8 : composition chimique de sable de déchet de céramique.....	53
Tableau 3-9 : Analyse granulométrique de sable de déchet de céramique.....	54
Tableau 3-10: Caractéristiques physiques de sable de déchets de plâtre	55
Tableau 3.11 : Caractéristiques chimiques de de sable de déchet de plâtre.....	56
Tableau 3.12 : Analyse granulométrique du sable de déchet de plâtre (SP).....	56
Tableau 3.13: Caractéristiques Adjuvant.....	58
Tableau 3.14: composition chimique de calcaire.....	59
Tableau 3.15: Analyse chimique de l'eau de gâchage	59
Tableau 3.16 : Caractéristiques des fibres métalliques.....	60
Tableau4-1: Composition d'un 1m ³ de béton témoin (BS)	68
Tableau4-2: Composition d'un 1m ³ de béton témoin (BSF)	68
Tableau4-3: Notation des mélanges.....	69
Tableau4-4: Compositions des mélanges retenus.....	69

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La réhabilitation des constructions anciennes constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la préservation du patrimoine bâti et la pérennisation des ouvrages existants. Les opérations de réparation, de consolidation et de renforcement exigent l'utilisation de matériaux compatibles avec les supports en place, tels que les maçonneries en pierre ou en brique, les mortiers de chaux et les bétons anciens. En effet, l'emploi de matériaux présentant une résistance ou une rigidité excessives peut engendrer des désordres structurels, notamment la fissuration, le décollement des matériaux de réparation ou encore la concentration des contraintes à l'interface entre l'ancien et le nouveau matériau. Dans ce contexte, les mortiers et bétons à base de chaux hydraulique naturelle demeurent parmi les matériaux les plus couramment utilisés pour la restauration des ouvrages patrimoniaux. Leur succès repose sur leur bonne compatibilité avec les maçonneries anciennes, leur perméabilité à la vapeur d'eau, leur faible module d'élasticité ainsi que leur aptitude à limiter les risques de fissuration. Toutefois, leurs performances mécaniques restent relativement modestes, avec des résistances à la compression généralement comprises entre 3 et 15 MPa et des résistances à la traction variant de 0,5 à 2 MPa.

Dans une démarche visant à développer de nouveaux matériaux de réparation conciliant performances mécaniques, durabilité, compatibilité avec les constructions anciennes et valorisation des déchets de construction, le présent travail de recherche s'intéresse à l'élaboration d'un béton de sable fibré incorporant des matériaux recyclés issus de déchets de plâtre et de céramique. L'objectif est de concevoir un matériau présentant des performances mécaniques comparables, voire supérieures, à celles des bétons couramment utilisés dans les travaux de réhabilitation, tout en contribuant à une gestion durable des ressources et à la réduction des déchets.

Dans un premier temps, un béton de sable de référence est formulé selon la méthode Sablocrete. Un faible dosage de fibres métalliques est ensuite incorporé afin d'améliorer le comportement du matériau vis-à-vis de la fissuration et de limiter la propagation des microfissures. Par la suite, des substitutions partielles du sable dunaire sont réalisées en introduisant du sable recyclé issu de déchets de plâtre à des taux de 10 % et 15 %, ainsi que du sable recyclé provenant de déchets de céramique à des taux de 5 %, 10 % et 15 %. Cette première phase expérimentale a pour objectif d'évaluer et de comparer l'influence de chacun de ces matériaux recyclés sur les propriétés du béton de sable fibré.

Introduction générale

Dans un second temps, l'effet combiné des deux matériaux recyclés est étudié à travers deux séries de substitutions mixtes. Dans la première série, le taux de sable de plâtre est fixé à 15 %, tandis que le taux de sable de céramique varie successivement de 5 %, 10 % et 15 %. Dans la seconde série, le taux de sable de plâtre est porté à 10 %, alors que les mêmes taux de substitution en sable de céramique sont conservés. Cette approche expérimentale vise à analyser les interactions entre les déchets de plâtre et de céramique au sein du béton de sable fibré et à identifier les formulations les plus performantes pour des applications potentielles dans les domaines de la réparation, du renforcement et de la réhabilitation des constructions anciennes.

Ainsi ce mémoire est composé de cinq chapitres :

➤ **Chapitre 1 : Notions générale sur le béton de sable et les fibres**

Ce premier chapitre de mémoire vise à présenter un état de connaissance sur le béton de sable et ses caractéristiques à l'état frais et durci, les méthodes utilisés pour sa formulation et ses avantages et inconvénients.

➤ **Chapitre 2 : valorisation de déchets de construction et demolition**

Dans ce chapitre, la définition et la gestion des déchets est abordée. Plusieurs exemples de valorisation de déchets dans le domaine de génie civil ont été traités. On a décrit également les déchets objet de la présente étude.

➤ **Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux**

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation, cette partie est basée sur la caractérisation des matériaux utilisés.

➤ **Chapitre 4 : Programme expérimental et méthodologie des essais**

Ce chapitre a été dédié à la description du le programme expérimental et les méthodes d'essais réalisés sur le béton.

➤ **Chapitre 5 : Résultats et discussions**

Le cinquième chapitre présente les résultats expérimentaux réalisé sur le béton et les interprétations des phénomènes surgies.

Enfin, **une conclusion générale** relate les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES BETONS DE SABLE ET LES FIBRES

1.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, le béton de sable a suscité un intérêt croissant, en particulier dans les domaines des éléments préfabriqués de faible épaisseur, des réalisations architecturales exigeant une grande précision de finition, ainsi que des travaux de réparation et de revêtement. Cet engouement s'explique notamment par la simplicité de sa composition et la possibilité d'adapter ses performances selon les besoins, ce qui en fait une solution pertinente pour la conception de structures à la fois légères et esthétiques, tout en respectant les exigences de durabilité et de résistance mécanique propres à chaque usage.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le béton de sable, en mettant l'accent sur ses principales caractéristiques, les méthodes de formulation de ses mélanges, son comportement à l'état frais et à l'état durci, ainsi que ses domaines d'application les plus courants.

1.2. Le béton de sable

1.2.1. Définition

Le béton de sable est un matériau composite hydraulique spécifique, qui se distingue par l'absence totale ou partielle de granulats grossiers (généralement supérieurs à 4 mm) dans sa composition. Contrairement au béton classique, caractérisé par une distribution granulométrique large incluant des gravillons ou des cailloux, ce type de béton est constitué uniquement de granulats fins (compris entre 0,08 et 4 mm selon la norme NF EN 12620, 2013), d'un liant hydraulique — le plus souvent du ciment Portland —, d'eau de gâchage, ainsi que d'éventuels adjuvants ou additions minérales adaptés aux performances recherchées.

Cette particularité granulométrique confère au béton de sable une grande homogénéité, ce qui favorise une meilleure compacité à l'échelle locale, une maniabilité accrue et une qualité de finition plus fine. Ces propriétés en font un matériau particulièrement adapté à certaines applications spécifiques, notamment dans les domaines du génie civil, du bâtiment et des travaux de réhabilitation (**Sablocrete, 2019**).

1.2.2. Historique du béton de sable

Le béton de sable, est un matériau ancien dont la composition a évolué au cours des années. En France, il tire ses origines du "béton aggloméré" inventé par COIGNET en 1853, dans le but de construire des édifices monolithiques à la fois économiques et résistants .

Les premières applications de ce matériau sont visibles dans la Maison Coignet, située dans la rue Charles Michels à Saint-Denis (région parisienne), il a également été utilisé à l'étranger,

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres

comme dans la construction du phare de Port-Saïd en Égypte, atteignant une hauteur de 52 mètres (voir figure 1.1), ainsi que dans le pont de New York en 1872 (voir figure 1.2) .



Figure 1.1: phare de port said en Egypte



Figure 1.2: Pont de New- York

Durant les années 1869 à 1872, pendant la construction de quelques parties du canal qui puisaient l'eau dans la rivière Vanier, CIGNET a expérimenté pour la première fois l'ajout d'un sable non conventionnel à un sable fin classique dans le but d'apporter des améliorations granulaires. Ce sable non conventionnel était alors considéré comme inadapté à la construction. Le béton de sable a été couramment adopté pour la construction d'installations majeures telles que le port de Kaliningrad et le pont de Chernavskiv. Cette technique avait été largement oubliée en Europe occidentale et en ex-URSS vers les années 1920, mais a retrouvé de la pertinence pendant la Deuxième Guerre mondiale grâce aux performances observées sur certaines pistes construites par l'Allemagne . Les bétons de sable à un rôle moins important jusqu'aux années 1970-1980. Toutefois, de nouvelles préoccupations concernant l'exploitation responsable des granulats et une sensibilisation accrue aux enjeux environnementaux ont contribué à la popularité du béton de sable dans le sud-ouest de la France au 1970. Cette reprise se justifie par la pénurie de dépôts alluviaux et la richesse des dépôts de sables massifs. Face à cette situation, l'Association pour la Promotion et le Développement du Béton de Sable a été fondée en 1988.

1.3 Les composants du béton de sable

1.3.1 Le sable

Le sable constitue l'unique composant granulaire du béton de sable et représente généralement entre 60 % et 75 % du volume total du mélange, selon les recommandations du guide SABLOCRETE (Sablocrete, 2019). Sa granulométrie varie de 0,08 à 4 mm conformément à

la norme NF EN 12620 (2013). Les caractéristiques du sable influencent directement les performances mécaniques ainsi que la durabilité du matériau.

Selon les travaux de Khenfer et al. (2000), les sables peuvent être classés en fonction de leur origine géologique :

Les sables de rivière, caractérisés par des grains arrondis et propres, assurent une bonne maniabilité, mais peuvent nécessiter une teneur plus élevée en ciment en raison de leur faible frottement interne.

Les sables de carrière, de forme plus angulaire, favorisent un meilleur emboîtement des grains, améliorant ainsi les résistances mécaniques. Leur coefficient de forme, défini par la norme NF EN 933-4, joue un rôle important dans la compacité du squelette granulaire.

Les sables de concassage, issus du broyage de roches massives, constituent une solution intéressante combinant disponibilité locale et performances techniques satisfaisantes (**Bessa et al., 2015**).

Le sable forme le squelette granulaire du béton et contrôle sa compacité selon le modèle d'empilement compressible (MEC). Sa distribution granulométrique influe également sur la quantité de pâte de ciment nécessaire et sur la porosité résiduelle, conformément à la loi de Féret.

1.3.2 Le ciment

Le ciment est le liant hydraulique qui, en présence d'eau, forme une pâte capable de durcir et de solidariser les différents constituants. Le ciment Portland est le plus couramment utilisé ; il est principalement composé de silicate tricalcique (C_3S) et de silicate bicalcique (C_2S), responsables du développement des résistances (**Mehta & Monteiro, 2014**).

Le ciment Portland ordinaire (CEM I 42,5 R) constitue la référence pour le béton de sable selon la norme NF EN 197-1 (2012). Les dosages usuels varient entre 350 et 450 kg/m³, soit une augmentation de 15 à 25 % par rapport au béton conventionnel (**Belagaa&Beddar, 2019**). Cette hausse compense l'absence de granulats grossiers et permet d'assurer la cohésion du matériau par une matrice cimentaire dense.

Par ailleurs, l'utilisation de ciments composés peut améliorer certaines propriétés spécifiques. Les travaux de Nehdi et al. (2001) ont montré que les ciments contenant des cendres volantes (CEM II/A-V) améliorent la maniabilité, tandis que les ciments au laitier de haut fourneau (CEM III/A) renforcent la durabilité en milieux agressifs.

1.3.3 L'eau de gâchage

L'eau intervient dans la réaction d'hydratation du ciment, indispensable à la prise et au durcissement du béton. Le rapport eau/ciment (E/C) est un paramètre déterminant pour la résistance finale : une valeur élevée entraîne une augmentation de la porosité et une diminution des performances mécaniques (Neville, 2011). La qualité de l'eau influence également le temps de prise et la durabilité du matériau.

Les exigences relatives à l'eau de gâchage sont définies par la norme NF EN 1008 (2003).

Dans le cas du béton de sable, le rapport E/C se situe généralement entre 0,45 et 0,60 selon les recommandations du LCPC (Sedran & De Larrard, 1999). Cette plage correspond à un compromis entre maniabilité, résistance et durabilité. La surface spécifique élevée du sable, mesurée notamment par l'essai Blaine, nécessite une quantité d'eau suffisante pour assurer une bonne hydratation et une ouvrabilité adéquate.

1.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances chimiques incorporées en faible quantité (moins de 5 % de la masse de ciment) afin de modifier certaines propriétés du béton, telles que la fluidité ou le temps de prise (Mindess, Young & Darwin, 2003). Ils jouent un rôle essentiel dans l'optimisation du béton de sable. Les recherches de Boukhelkhal et al. (2018) ont notamment démontré l'efficacité des superplastifiants de nouvelle génération à base de polycarboxylates éthers (PCE) pour réduire le rapport E/C tout en conservant une bonne maniabilité, évaluée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Les entraîneurs d'air, conformes à la norme NF EN 934-2, améliorent la résistance aux cycles gel-dégel en générant un réseau de microbulles d'air (50 à 200 μm). Les accélérateurs et retardateurs de prise permettent quant à eux d'adapter le comportement du béton aux conditions climatiques et aux contraintes de mise en œuvre (Rixom & Mailvaganam, 1999).

1.3.5 Les fines d'ajouts

Le béton de sable exige une teneur en ciment notablement plus élevée, dépassant généralement les 400 Kg/m^3 , en raison du diamètre maximal des granulats $D \leq 6\text{mm}$. Pour optimiser la compacité du mélange, Une approche consiste remplir des pores du sable, par l'incorporation des fillers ou de fines.

Le terme "filler", signifie remplir, et désigne des matériaux dont la taille maximale des granulats ne peut pas excéder 0,2 mm, Ils sont fréquemment obtenus par le criblage ou la fragmentation de roches.

Les fillers jouent un rôle essentiel dans renforcer la cohésion du mélange, une apparence basée sur leur composition minérale et leur finesse et catégorisée comme actif ou inerte .

Les résultats de certaines expérimentations menées au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées à Bordeaux [L.R.P.C., 1992] ont permis de mettre en évidence que la granulométrie des fillers n'avait pas un impact déterminant. En revanche, la composition chimique et minéralogique (l'activité pouzzolanique) aussi la morphologie (forme, angularité, état de surface) qui jouent un rôle crucial. Certains fillers, qualifiés de "actifs", favorisent le processus de prise hydraulique du ciment en réagissant avec la chaux dégagée par celui-ci, Cela conduit à un accroissement de la résistance .

On distingue plusieurs types d'addition (active ou inerte), comme :

1.3.5.1 Filler calcaire

Il s'agit d'une roche minérale finement broyée, qui répond aux exigences de la norme française NF P18-508 (1995) concernant les ajouts minéraux calcaires.

Les fillers calcaires sont également susceptibles d'affecter le procédé d'hydratation du ciment, ce qui se traduit par une amélioration notable des résistances à un stade précoce . Étant donné qu'ils peuvent se trouver dans les pores capillaires et modifier les caractéristiques rhéologiques du béton .

Le phénomène, appelé effet filler comme illustré dans la figure (1.3), entraîne une compacité accrue du squelette granulaire, influençant aussi les performances du béton aux états frais et à l'état durci

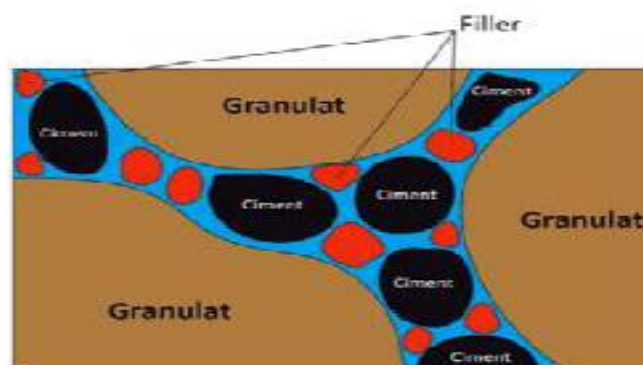


Figure 1-3: Démonstration de l'effet filler.

1.3.5.2 Laitier de haut fourneau

Résultants au refroidissement rapide des scories de fer dans les hauts fourneaux ces additions sont utilisées dans les bétons de sable pour améliorer leur compacité, renforcer leur durabilité face aux agents agressifs et optimiser la cohésion de la matrice cimentaire

1.3.5.3 Fumée de silice

Sont des déchets de Ferro silicium ou de silicium ont une teneur élevée en silice amorphe, généralement supérieure à 85% en masse. L'ajout de ces fumées dans le béton augmente sa densité et réduit sa porosité finale. Ainsi, les solutions chimiquement agressives ont moins de possibilités de pénétrer à travers le réseau poreux du béton, ce qui améliore sa durabilité

1.3.6 Les autres additions

1.3.6.1 Gravillon

Dans un béton de sable, le rapport G/S (gravillons/sable) doit rester inférieur à 0,7, où S représente une granulométrie inférieure à 4 mm.

1.3.6.2 Fibres

Sont principalement employées pour minimiser le retrait lors du durcissement initial. La quantité et le type de fibres sont cruciaux pour garantir leur efficacité

La proportion de fibres incorporées est généralement indiquée en pourcentage (%) par rapport au volume total du béton. par exemple, les fibres polymères sont couramment ajoutées à des concentrations comprises entre 0,1 et 1% du volume global de béton.

1.3.6.3 Colorants

Ils sont employés dans des applications similaires à celles des bétons traditionnels, mais leur incorporation requiert une attention particulière Pour assurer une homogénéité optimale du mélange et une composition idéale du béton de sable, tout en préservant la durabilité de sa maniabilité du mélange. Ainsi, il existe une relation entre la finesse de Blaine et l'ouvrabilité du béton.

1.3.7 Comparaison avec le béton ordinaire

Le béton de sable se distingue du béton traditionnel par plusieurs caractéristiques fondamentales, comme l'ont montré Yahia & Tanimura (2015). L'absence de granulats grossiers entraîne une modification de la distribution granulométrique et une augmentation de la surface spécifique totale des particules, de l'ordre de 2 à 3 fois. Cela nécessite un dosage plus élevé en ciment pour assurer l'enrobage des grains, conformément à la théorie de l'épaisseur maximale de pâte (EMP).

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres

Selon le modèle de Stovall et al. (1986), la compacité théorique du béton de sable se situe entre 0,75 et 0,80, contre 0,80 à 0,85 pour le béton classique. Cette différence s'explique par l'absence d'optimisation granulométrique basée sur la combinaison de plusieurs classes de tailles, comme dans la courbe de Fuller-Thompson. Toutefois, l'homogénéité du béton de sable facilite sa mise en œuvre, notamment dans les éléments de faible section nécessitant une grande fluidité.

Tableau 1-1 : comparatif approfondi : Béton de sable vs Béton ordinaire

Critère	Béton de sable	Béton ordinaire
Compatibilité avec matériaux recyclés	Excellente pour les déchets fins recyclés (poudre de brique, faïence broyée), permettant leur incorporation homogène.	Moyenne : les granulats recyclés grossiers sont souvent hétérogènes et poreux.
Performances mécaniques (fc28)	Résistances modérées (15-35 MPa) selon le taux de substitution et la compacité ; suffisantes pour de nombreuses applications non structurales.	Résistances généralement élevées (>30 MPa) adaptées aux exigences structurales.
Durabilité	Bonne durabilité possible si densification correcte et liants adaptés ; sensible à la porosité si formulation non optimisée.	Durabilité élevée si formulation maîtrisée ; dépend de la qualité des granulats.

Empreinte carbone	Réduction de l'empreinte carbone grâce à la valorisation de déchets et à la réduction des transports et du concassage des gros granulats.	Empreinte carbone plus importante (production de ciment, extraction, transport de granulats naturels).
Consommation de ressources naturelles	Moindre consommation de matériaux vierges (pas de	Forte extraction de granulats naturels (sable + gravier).

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres

	gravier, substitution de sable partielle possible).	
Coût économique (global)	Potentiellement inférieur : matériaux locaux, recyclés, moins de traitement ; dépend de la disponibilité des déchets.	Plus coûteux dans certains contextes (transport, traitement, normalisation des granulats).
Intérêt expérimental (recherche)	Élevé : permet l'étude ciblée des effets des fines recyclées, des liants alternatifs, et de la microstructure sans interférence des gros granulats.	Moyen : complexité liée à l'hétérogénéité des granulats recyclés grossiers.
Mise en oeuvre sur chantier	Simplifiée : moins de vibration nécessaire, mise en place facile, application manuelle ou semi-industrielle.	Requiert souvent une centralisation, du pompage, des coffrages adaptés et du compactage intensif.

1.4 Formulation du Béton de Sable

La formulation du béton de sable constitue une étape essentielle dans l'obtention d'un matériau performant, durable et économiquement viable. Contrairement au béton ordinaire qui inclut des granulats grossiers, le béton de sable repose exclusivement sur une granulométrie fine (0 à 4 mm), ce qui impose une optimisation précise des proportions entre les constituants : sable, fines, ciment, eau et éventuellement adjuvants.

Deux approches principales sont utilisées pour formuler un béton de sable :

- Une approche théorique, basée sur des modèles mathématiques d'optimisation de compacité.
- Une approche expérimentale, fondée sur des tests pratiques et des ajustements progressifs pour atteindre les performances souhaitées.

Ces deux méthodes visent à garantir une maniabilité adéquate, une résistance mécanique suffisante et une durabilité accrue, tout en intégrant parfois des matériaux recyclés ou locaux pour réduire l'impact environnemental.

1.4.1 Approche Théorique de la Formulation du Béton de Sable

L'approche théorique repose sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire, c'est-à-dire la réduction maximale des vides entre les grains. Elle est particulièrement utile lorsqu'on cherche à rationaliser les dosages sans passer par de multiples essais en laboratoire

1.4.1.1 Estimation du Dosage en Fines

Les fines (particules $< 80 \mu\text{m}$) (ciment + filler calcaire + cendres volantes) jouent un rôle crucial dans la cohésion et la maniabilité du béton de sable car elles comblent les vides entre les grains de sable, augmentant ainsi la densité et améliorant les propriétés mécaniques et durables du matériau. Leur dosage optimal dépend de plusieurs paramètres.

Afin de déterminer cette quantité optimale de fines en fonction de la porosité réelle du squelette granulaire, il est nécessaire de recourir à une méthode rationnelle d'estimation des vides entre grains. C'est dans ce contexte que la méthode de Caquot s'avère particulièrement pertinente.

La méthode de Caquot, développée au XXe siècle par l'ingénieur Albert Caquot, permet d'estimer la porosité minimale du mélange granulaire, c'est-à-dire le volume des vides entre les grains après leur meilleure répartition possible. Cela permet ensuite de déterminer :

- Le dosage théorique en fines (ciment + filler) nécessaire pour combler ces vides.
- Le dosage en eau requis pour assurer une bonne maniabilité et hydratation.

L'Expression mathématique de la formule de Caquot est comme suit :

$$V = \frac{1}{5} V_0 \cdot (d/D) \text{Formul } (1 - 1)$$

Où :

- V : volume des vides dans le mélange granulaire (en fraction du volume total)
- V_0 : constante empirique (généralement prise entre **0,7 et 0,8** selon la qualité du sable) permettent également d'obtenir une bonne estimation de la porosité du mélange granulaire
- d : diamètre du tamis retenant **90 %** des grains fins (granulats $< 4 \text{ mm}$)
- D : diamètre du tamis retenant **10 %** des grains fins

Cette formule suppose que la granulométrie est optimisée pour obtenir une compacité maximale.

Tableau 1-2 : Exemple de calcul basé sur la formule de Caquot

Paramètre	Valeur
V_0	0,75
d	0,08 mm
D	4 mm
Volume des vides (V)	$0,75 \times (0,08/4)^{0,2} = 0,38$

Ainsi, le volume des vides est estimé à 38 %, ce qui permet de déterminer le dosage nécessaire en fines pour combler ces espaces, Ce dosage inclut à la fois le ciment et les additions minérales (filler calcaire, cendres volantes, etc.).

1.4.1.2 Estimation du Dosage en Eau

L'eau joue un rôle clé dans la maniabilité et la réaction d'hydratation du ciment. Le rapport E/C (eau/ciment) doit être optimisé pour éviter une résistance mécanique insuffisante ou une maniabilité trop faible. Pour affiner ce dosage en eau et garantir à la fois une bonne ouvrabilité et des performances mécaniques satisfaisantes, il est possible de s'appuyer sur des relations théoriques liant la compacité du mélange aux caractéristiques granulométriques des constituants. L'une d'elles, couramment utilisée, est la formule empirique de compacité granulaire bimodale (inspirée des travaux de Stovall et al., 1990) :

$$(e + v) = 0.8 \times (d/D)^{0.2} \quad \text{Formule (1 - 2)}$$

Où :

- e : volume d'eau
- v : volume d'air piégé
- d/D : étendue granulaire (rapport entre le plus petit et le plus grand grain)

Tableau 1-3 : Exemple de calcul basé sur la formule empirique de compacité granulaire bimodale

Paramètre	Valeur
d	0,08 mm
D	4 mm
$(d/D)^{0,2}$	0,66
Porosité minimale ($e+v$)	$0,8 \times 0,66 = 0,53$

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres

Ce résultat indique que 53 % du volume total du mélange est occupé par l'eau et l'air piégé. Ce volume est ensuite utilisé pour déterminer le dosage exact en eau, en tenant compte de l'effet des adjuvants (superplastifiants, entraîneurs d'air, etc.).

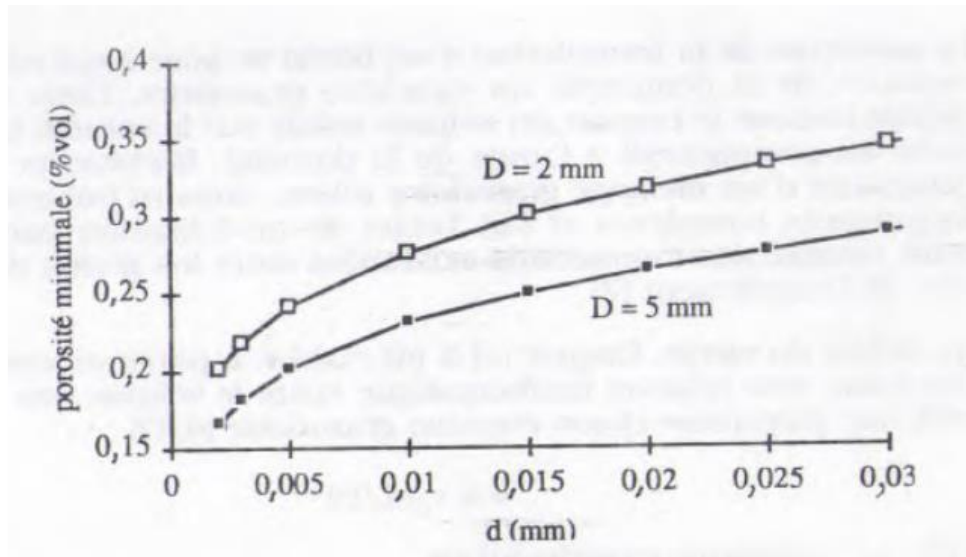


Figure 1-4 : Influence d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de D

Source : Béton de Sable –Caractéristiques et Pratiques d'Utilisation- Projet Nationale de recherche /développement SABLOCRETE page 75.

1.4.2 Approche Expérimentale de la Formulation du Béton de Sable

L'approche expérimentale constitue une étape essentielle dans la formulation du béton de sable, permettant d'ajuster les paramètres théoriques à partir d'essais pratiques. Elle vise à valider la faisabilité technique, optimiser les performances mécaniques et physiques, ainsi que garantir une bonne maniabilité et durabilité du matériau final.

Des formulations variées de bétons de sable ont déjà été testées avec succès dans plusieurs domaines d'application tels que les bétons de pieux, les bétons routiers, les bétons projetés, etc., démontrant sa pertinence dans des contextes réels de construction.

Contrairement à l'approche théorique qui repose sur des modèles mathématiques, la méthode expérimentale ne cherche pas à expliquer les phénomènes physico-chimiques sous-jacents, mais plutôt à identifier une formule opérationnelle adaptée aux matériaux disponibles et aux conditions spécifiques du chantier ou du laboratoire.

La démarche expérimentale suit un processus séquentiel structuré en neuf étapes principales récapitulé dans le tableau suivant :

1.4.2.1 Estimation du dosage en eau

Le dosage en eau peut également être estimé à l'aide d'une **formule semi-empirique** basée sur la porosité du squelette granulaire :

$$e = (8001 + \alpha) \times \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \text{ Formule (1 - 3)}$$

Où :

- e : dosage en eau (en litres/m³)
- α : coefficient compris entre **0,1 et 0,15** selon la forme et la surface spécifique du sable
- d : diamètre du tamis retenant **90 %** des grains fins
- D : diamètre du tamis retenant **10 %** des grains fins

Cette estimation fournit une valeur initiale qui sera ensuite affinée lors des essais pratiques

1.4.2.2 Estimation du dosage en sable

Une fois les dosages en eau, ciment et fins définis, il reste à calculer la quantité de sable nécessaire pour compléter le mélange à **1 m³** :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{Fines}] - [\text{Ciment}] - [\text{Eau} + \text{Adjuvants}]$$

Cette approche permet d'obtenir un mélange bien équilibré, optimisé pour la mise en oeuvre et les performances attendue.

1.5 Caractéristiques du béton de sable

Le béton de sable se distingue par un ensemble de propriétés spécifiques influençant à la fois sa mise en oeuvre et son comportement en service. La maîtrise de ces caractéristiques est essentielle afin de garantir des ouvrages durables, performants et économiquement optimisés.

1.5.1. Maniabilité

La maniabilité correspond à l'aptitude du béton à être mis en place, compacté et fini sans ségrégation, ressuage excessif ou défauts de surface. Elle constitue une propriété fondamentale pour assurer la qualité d'exécution, notamment dans les éléments préfabriqués, les formes architecturales complexes et les zones difficiles d'accès.

Contrairement au béton ordinaire contenant des granulats grossiers (> 5 mm), le béton de sable présente une structure homogène due à l'absence de ces granulats. Cette homogénéité favorise une meilleure mise en oeuvre et une certaine fluidité naturelle.

Cependant, cette caractéristique implique une augmentation de la quantité de pâte cimentaire nécessaire pour enrober les fines particules à forte surface spécifique. Il en résulte généralement

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres

un rapport eau/ciment (E/C) plus élevé, pouvant atteindre 0,6 à 0,7, contre environ 0,45 à 0,55 pour un béton classique.

Tableau 1-4 :Facteurs influençant la maniabilité

Facteur	Impact sur la maniabilité	Valeurs optimales
Rapport E/C	Augmentation de la fluidité	0,45 - 0,65
Teneur en fines (< 0,08 mm)	Amélioration de la cohésion	8 – 12 %
Dosage en ciment	Augmentation de la viscosité	300 – 400 kg/m ³
Adjuvants	Modification rhéologique	0,5 – 2 % du poids ciment
Granulométrie du sable	Influence sur la compacité	Module de finesse : 2,2 - 2,8

1.5.2. La compacité

Elle est définie comme le rapport entre le volume des grains solides et le volume total du béton durci. Dans le cas du béton de sable, cette valeur se situe généralement entre 0,75 et 0,85, des valeurs légèrement inférieures à celles du béton traditionnel, en raison de l'absence de granulats grossiers qui participent habituellement à l'optimisation de la distribution granulaire. Ainsi, la compacité dépend essentiellement de plusieurs paramètres, notamment : la granulométrie du sable (étendue, courbe granulométrique et homogénéité), le comblement des vides intergranulaires par les fines (fillers), ainsi que le procédé de mise en œuvre, tel que la vibration ou le caractère autoplaçant du béton. Une compacité élevée, généralement supérieure à 0,65, constitue un indicateur important de la qualité du béton de sable, car elle contribue à améliorer les performances mécaniques, la durabilité et à réduire la perméabilité du matériau.

1.5.3. Comportement mécanique

Le comportement mécanique du béton de sable est principalement évalué à travers plusieurs propriétés essentielles, notamment la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité ainsi que la résilience. Ces paramètres jouent un rôle fondamental dans l'appréciation de sa capacité à substituer ou à compléter les bétons conventionnels dans des applications structurelles ou semi-structurelles.

1.5.3.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton de sable atteint généralement des valeurs comprises entre 25 et 40 MPa après 28 jours, en fonction de la composition du mélange utilisée. Pour un même rapport eau/ciment (E/C), cette résistance reste légèrement plus faible que celle du béton ordinaire. Les recherches indiquent également que le béton de sable développe rapidement ses

performances mécaniques, puisqu'il obtient environ 60 à 70 % de sa résistance finale dès l'âge de 7 jours, avec une évolution comparable à celle observée pour le béton conventionnel.

1.5.3.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton de sable varie généralement entre 2,5 et 3,5 MPa, ce qui représente environ 8 à 10 % de sa résistance à la compression. Comparativement au béton ordinaire, cette valeur est légèrement plus élevée, puisque la résistance en traction de ce dernier correspond habituellement à 6 à 8 % de sa résistance en compression. Cette amélioration est principalement attribuée à l'homogénéité de la structure granulaire, qui contribue à limiter les concentrations de contraintes au sein du matériau.

1.5.3.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique du béton de sable se situe généralement entre 20 000 et 28 000 MPa, tandis que celui du béton ordinaire varie habituellement de 30 000 à 40 000 MPa.

Une relation empirique propre au béton de sable permet d'estimer ce module d'élasticité :

$$E_c = 15000 + 350 \times \sqrt{f_{c28}} \text{ [MPa]} \text{ Formule (1 - 4)}$$

Où

f_{c28} : représente la résistance à la compression à 28 jours.

1.5.4 Le retrait

Le retrait du béton correspond à une diminution progressive de son volume au fil du temps. Ce phénomène résulte principalement du déplacement de l'eau à travers le réseau poreux du matériau ainsi que des réactions chimiques liées à l'hydratation du ciment. Lorsque l'eau présente dans les pores s'évacue vers l'extérieur par évaporation ou dessiccation, une dépression capillaire apparaît et engendre des contraintes internes de traction. Ces contraintes provoquent un rapprochement des particules solides de la pâte cimentaire, entraînant ainsi une réduction du volume du béton.

En parallèle, les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation de produits hydratés dont le volume est inférieur à celui des constituants initiaux (clinker et eau), ce qui contribue également à la contraction globale du matériau.

Le retrait du béton peut être réparti en deux grandes catégories :

- Le retrait précoce, qui se développe durant les premières 24 heures après la mise en œuvre. Il englobe principalement le retrait plastique ainsi qu'une partie du retrait endogène.

- Le retrait différé ou à long terme, qui apparaît au-delà de 24 heures et comprend notamment le retrait de dessiccation, le retrait thermique différé ainsi que le phénomène combiné de fluage-retrait.

Les facteurs qui influencent le retrait sont les suivants : Le rapport E/C (eau/ciment) : une augmentation de la quantité d'eau entraîne une diminution de la résistance à la compression.

Le type de granulats : les granulats de grande taille (grossiers) offrent une meilleure résistance au phénomène de retrait.

Les matériaux cimentaires : comme la fumée de silice et les cendres volantes. Leur ajout affine la microstructure de la pâte, ce qui rend le matériau plus rigide et augmente le retrait aussi bien avant qu'après la prise.

1.6 Durabilité du béton de sable

La durabilité du béton désigne son aptitude à préserver ses propriétés et ses performances au cours de sa durée de vie, malgré l'action des différents agents de dégradation présents dans son environnement. Ces agents peuvent être de nature chimique (sulfates, chlorures, carbonatation), physique (cycles de gel-dégel, variations de teneur en eau) ou mécanique (abrasion, chocs et impacts répétés). Leur action, isolée ou combinée, est susceptible d'engendrer des dégradations progressives affectant la microstructure du matériau et réduisant ainsi la durée de service des ouvrages.

1.6.1 Les attaques chimiques

Le béton est particulièrement vulnérable aux agressions d'origine chimique, susceptibles d'altérer la matrice cimentaire ainsi que la zone de transition interfaciale. Ces phénomènes entraînent une détérioration progressive de la microstructure, ce qui impacte négativement les performances globales du matériau. Parmi les formes d'attaques les plus fréquentes, on retrouve notamment :

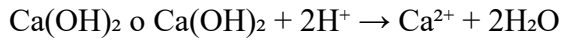
1.6.1.1 Attaques acides

Les acides réagissent principalement avec les constituants basiques de la matrice cimentaire, notamment l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , issu de l'hydratation du ciment. Cette réaction entraîne une dissolution progressive de la portlandite ainsi qu'une décalcification des hydrates de silicate de calcium (C-S-H), ce qui provoque une diminution de la cohésion interne et des performances mécaniques du béton.

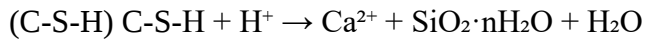
Le mécanisme de dégradation du béton sous l'effet des acides correspond à une dissolution progressive des phases alcalines de la pâte cimentaire et peut être décrit en plusieurs étapes :

Phase initiale : neutralisation de la portlandite :

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres



Phase secondaire : altération des silicates de calcium hydratés :



Phase tertiaire : formation de produits solubles et phénomène de décalcification et de lixiviation

Dans le cas de l'acide sulfurique, l'attaque du ciment conduit à la formation de gypse (sulfate de calcium) peu soluble, ainsi qu'à un gel de silice susceptible d'être lessivé et dispersé progressivement.

Les principaux paramètres influençant la résistance du béton face aux attaques acides sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1-5 :Facteurs influençant la résistance aux acides

Paramètre	Effet sur la résistance	Recommandations
Rapport E/C	↓ E/C → ↑ résistance	E/C < 0,45
Type de ciment	CPA < CPJ < CHF	Privilégier ciments composés
Compacité	↑ compacité → ↑ résistance	Vibration optimale
Épaisseur d'enrobage	↑ épaisseur → ↑ durabilité	> 4 cm en milieu agressif

1.6.2 Attaques pas les sels

Les sels solubles, qu'ils proviennent de l'environnement ou de produits de déverglaçage, peuvent s'infiltrer dans le béton et entraîner des dégradations significatives. Les chlorures sont particulièrement responsables de la corrosion des armatures métalliques, même en l'absence de fissures visibles. Les sulfates, quant à eux, réagissent avec les phases hydratées du ciment, notamment le C₃A, en formant des composés expansifs tels que l'ettringite secondaire.

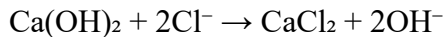
Par ailleurs, les ions chlorure (Cl⁻) peuvent réagir avec la chaux libre présente dans le béton (Ca(OH)₂) pour former du chlorure de calcium (CaCl₂), un sel soluble dans l'eau. Cette réaction contribue à augmenter la perméabilité du béton, ce qui accélère davantage les mécanismes de dégradation.

1.6.2.1 Les chlorures

La dégradation du béton par les chlorures repose sur un processus progressif comprenant plusieurs étapes :

. Pénétration : Les ions chlorure Cl⁻ diffusent à travers le réseau poreux du béton et s'y accumulent progressivement

. Réaction chimique : Les chlorures peuvent réagir avec certains constituants de la matrice cimentaire, notamment la portlandite :



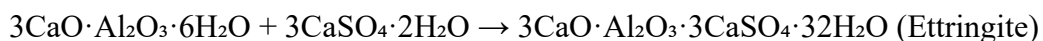
Cristallisation : La formation de sels, tels que le chlorure de calcium, peut conduire à des phénomènes de cristallisation générant des pressions internes. ..Dégradation physique :

L'accumulation de produits et les contraintes internes provoquent l'apparition de fissures, pouvant évoluer jusqu'à l'éclatement du béton.

1.6.2.2 Les sulfates

Les ions sulfate (SO_4^{2-}), présents dans certaines eaux souterraines ou dans des sols argileux, peuvent réagir avec les phases hydratées du ciment. Cette interaction conduit principalement à la formation de gypse et d'ettringite secondaire, entraînant des phénomènes de gonflement interne, de fissuration et parfois d'effritement du béton.

. La réaction principale peut s'écrire comme suit :



Les principaux paramètres influençant la résistance du béton à l'action des sels sont présentés dans le tableau ci-après.

1.7 Domaines d'application du béton de sable

Le béton de sable est utilisé dans plusieurs secteurs grâce à sa finesse, sa bonne maniabilité et la qualité de ses finitions. Ses principaux domaines d'application sont les suivants :

- . Éléments préfabriqués légers et minces
- Il est employé pour la fabrication de dalles de revêtement, de carreaux décoratifs, de plaques architecturales, ainsi que de panneaux de façade. Il convient également à la réalisation de moulures et d'éléments ornementaux.
- Travaux de ragréage et de réparation
- Ce matériau est utilisé pour les enduits de correction des surfaces irrégulières, les mortiers de réparation des fissures superficielles, ainsi que comme couche de finition sur des structures en béton traditionnel. .
- Revêtements de sol : il intervient dans la réalisation de chapes fines destinées au nivellement des surfaces, ainsi que dans les bétons décoratifs comme le béton ciré pour les applications intérieures.
- Ouvrages architecturaux complexes
- Le béton de sable est également adapté aux formes artistiques et architecturales nécessitant une grande maniabilité, ainsi qu'aux ouvrages demandant une finition lisse sans recours important à la vibration.

1.8 Avantages du béton de sable

Le béton de sable présente plusieurs atouts liés à sa composition à granulométrie fine, ce qui lui confère des propriétés intéressantes en construction :

Granulométrie fine : Elle assure une excellente maniabilité et facilite la mise en forme, même pour les éléments délicats ou de faible épaisseur.

Surface lisse et esthétique : Il permet d'obtenir des finitions régulières et soignées, particulièrement adaptées aux ouvrages apparents et décoratifs.

Légèreté relative : En l'absence de granulats grossiers, il est généralement plus léger que le béton traditionnel. Bonne homogénéité : Sa composition limite les phénomènes de ségrégation lors de la mise en place. Facilité d'application : Il est particulièrement adapté aux travaux de réparation et aux couches de ragréage. Adaptation à la préfabrication : Il convient bien à la fabrication de petits éléments architecturaux préfabriqués.

1.9 Inconvénients du béton de sable

- Résistance mécanique généralement plus faible que celle du béton traditionnel, en raison de l'absence de granulats grossiers qui assurent une meilleure capacité portante
- Retrait plus marqué lors du séchage et du durcissement, ce qui peut provoquer des fissures si la formulation n'est pas correctement maîtrisée
- Besoin d'une quantité plus importante de ciment pour compenser l'absence de gros granulats, ce qui entraîne une hausse du coût ainsi qu'un impact environnemental plus élevé
- Application surtout limitée aux éléments de faible épaisseur ou aux structures soumises à des charges modérées
- Plus grande sensibilité aux changements de température et d'humidité.

1.10 Généralités sur les fibres

1.10.1. Définition

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives.

1.10.2 Types des fibres

On distingue Quatre grandes familles de fibres.

- Les fibres organiques :(Polypropylène, polyamide, acrylique,)
- Les fibres minérales : (verre, Wollaston ite, basalte, mica...)
- Les fibres métalliques :(acier, déchets, inox, fonte...)
- Les fibres naturelles : (poil ; laine ; soie...)

Chaque type de fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantée, ondulées, bi ondulés, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance la traction).

Les fibres métalliques présentent une très bonne compatibilité avec le béton, certaines fibres sont inoxydables ou traitées contre la corrosion, en vue de certains usages particuliers.

[ALIA.A, BAKHMED.A, 2017]

1.10.3 Domaine d'application des fibres

"Les domaines d'application des fibres dans les produits à base de ciment sont variés, allant du renforcement des éléments structurels tels que les dalles, les murs, les routes et les conduites, grâce à leurs propriétés mécaniques uniques qui améliorent la performance du béton. Le tableau 1.6 ci-dessous détaille les applications spécifiques de chaque type de fibre dans ces divers domaines.

Tableau.1.6: Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment.

Type de fibres	Application
Verre	Pineaux préfabriqués, murs, Rideau, tuyaux d'égout, torture en Voile Mince, enduit
Acier	Elément de tortures en béton cellular, linteau, revêtement de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous presse ion, travail de Restauration battements.
Polypropylène nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, élément flottant de débarquement et amarres poules marinas, réparation des routes, tuyau sous-marin, travaux de Restauration bâtiments.

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons de sable et les fibres

Amanite	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et nodules, revêtement des Murs.
Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double carbure, coquets, plancher d'échafaudage.
Particules décima	Pineaux, tuyaux, travail de restauration
Végétal.	Dalles, tuiles

1.10.4 Les fibres métalliques [BELFERRAG.A, 2006]

Les fibres métalliques sont caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre au béton une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres, refilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou).

La fibre métallique est parmi les fibres les plus commercialisées vendues, et bien sûr disponibles sous des formes et dimensions les plus variées (**fig.1.5**). Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210GPa, une masse volumique de 7.85t/m³ et une résistance à la Traction de 1 à 2GPa. Elles existent sous diverses formes et longueurs. L'élancement est souvent compris entre 30 et 150 pour une longueur allant de 6.4 à 76 MM. Le pourcentage volumique de fibres métalliques dans le béton varie de 0.3 à 3%. L'optimisation du pourcentage de fibres, de la longueur et de la forme a donné lieu à de nombreuses études.

1.10.5 Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

Pour des usages particuliers, certaines fibres utilisées sont inoxydables ou traitées contre la corrosion. Leur principal avantage est une amélioration de la résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure.

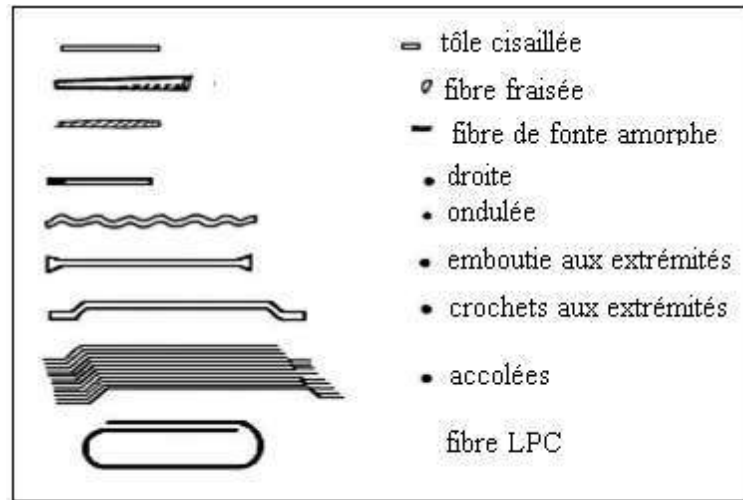


Fig. 1.5- Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables

1.10.6 Le rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il n'a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures (fig. 1-6-a)
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (fig. 1-6).

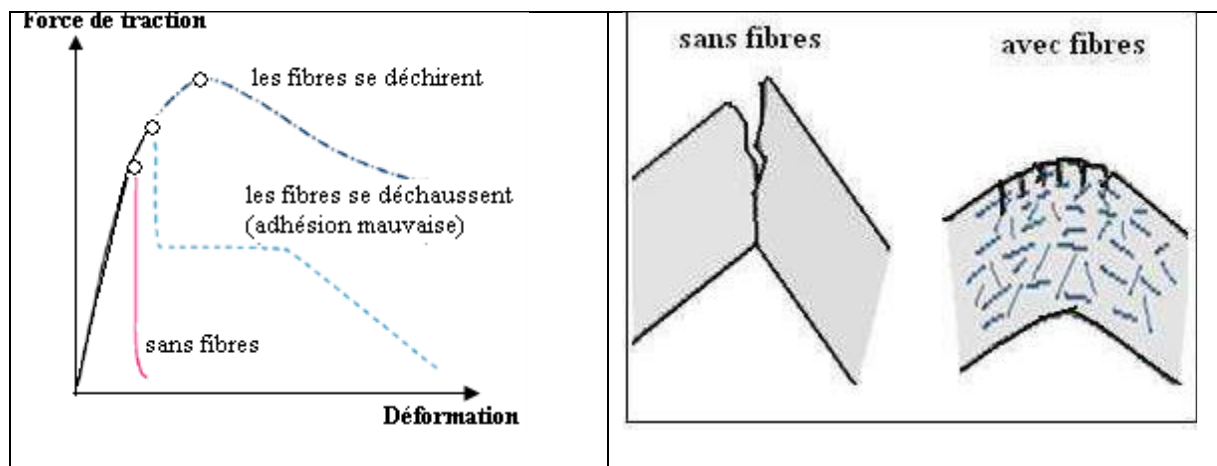


Fig. 1.6: Illustration de l'apport du renfort par des fibres [Haddad ou. N, 2015]

Pour bien comprendre le rôle joué par les fibres, il faut préciser que le terme « fibre » est ici réservé à des matériaux d'une longueur d'environ 60 mm (fibres courtes), par opposition aux

armatures du béton armé (barres, rubans, treillis soudés).

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Selon les caractéristiques présentées par les fibres, la rupture du béton évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile.

Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- La cohésion du béton frais
- La déformabilité avant rupture (rupture ductile)
- La résistance aux chocs ;
- La résistance à la fatigue ;
- La résistance à l'usure ;
- La résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des fissures et microfissures.

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et de donner une plus grande liberté architecturale.

1.11 Conclusion

Le béton de sable constitue une solution alternative intéressante au béton classique grâce à sa structure à granulométrie fine et sa mise en œuvre relativement simple. Même si ses performances mécaniques sont inférieures à celles des bétons contenant des granulats grossiers, ses caractéristiques spécifiques lui permettent d'être utilisé dans des domaines particuliers comme les éléments préfabriqués de faible épaisseur, les travaux de réparation ainsi que les finitions décoratives. Une bonne maîtrise de sa composition et de ses conditions d'application permet d'exploiter efficacement ses avantages, offrant ainsi des solutions innovantes adaptées aux besoins actuels du secteur de la construction.

L'utilisation des fibres dans le matériau béton, retarde la localisation des microfissures et améliorent sa résistance à la traction. En contrôlant le mécanisme des fissures et leur propagation, les fibres améliorent la ductilité de notre matériau. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques.

CHAPITRE 2

VALORISATION DES DECHETS DE CONSTRUCTION ET DEMOLITION

2.1.Introduction

Le secteur du bâtiment produit chaque année de grandes quantités de déchets provenant des travaux de construction, de réhabilitation et de démolition. Dans le contexte actuel des défis environnementaux et économiques, la valorisation de ces déchets constitue un enjeu majeur afin de préserver les ressources naturelles et de diminuer les impacts associés à leur élimination en décharge. Ce chapitre aborde les principes, les techniques ainsi que les avantages de la valorisation des déchets de construction et déconstruction, en soulignant leur réutilisation dans l'élaboration de nouveaux matériaux et infrastructures de génie civil, dans une perspective de développement durable et économie circulaire .

2.2 définition des déchets

Un déchet désigne un objet arrivé en fin d'usage ou une substance ayant subi une transformation physique ou chimique, ne présentant plus d'utilité et destinée à être éliminée. Le terme provient de l'ancien français déchet ou déchiré, signifiant « la quantité perdue lors de l'utilisation d'un produit », c'est-à-dire ce qui subsiste après son emploi.

2.3 Origine de production des déchets

Les déchets peuvent avoir différentes origines, parmi lesquelles on distingue :

- a : **Origine biologique** : tout organisme vivant, au cours de son cycle de vie, produit des substances résiduelles ou des métabolites issus de ses différentes activités biologiques.
- b : **Origine chimique** : toute transformation chimique aux lois de conservation de la matière. À titre d'exemple, lors du procédé de clinkérisation dans le four, les principaux oxydes tels que SiO_2 , CaO , Al_2O_3 et Fe_2O_3 se combinent pour former les principaux constituants minéraux du clinker : C_2S , C_3S , C_3A et C_4AF . D'autres éléments peuvent également être présents, notamment les sulfates, les alcalins et diverses impuretés.
- c : **Origine technologique** : tout procédé industriel entraîne nécessairement la génération de déchets résultant des différentes étapes de fabrication et de transformation.
- d : **Origine économique** : les produits fabriqués possèdent généralement une durée de vie limitée, ce qui conduit à leur remplacement et à la production de déchets en fin d'utilisation.

-e : **Origine écologique** : les opérations visant à réduire ou éliminer les pollutions, notamment celles liées au traitement de l'eau et de l'air, produisent inévitablement des résidus nécessitant une gestion spécifique.

-f : **Origine accidentelle** : les défaillances, incidents ou dysfonctionnements inévitables des systèmes industriels peuvent également être à l'origine de la production de déchets.

2.4 Classification des déchets selon la nature

•a : **Déchets inertes** : ce sont des déchets qui ne brûlent pas, ne se dégradent pas et ne provoquent aucune transformation physique ou chimique, comme les gravats, le béton, les tuiles ou les terres.

•b : **Déchets non dangereux (DND)** : ils regroupent les déchets ménagers ou industriels courants tels que le papier, le carton, le verre, le plastique et les métaux

•c : **Biodéchets / déchets organiques** : il s'agit principalement des déchets alimentaires et végétaux, caractérisés par leur caractère biodégradable.

• d : **Déchets dangereux ou toxiques** : ces déchets présentent un danger pour la santé humaine ou l'environnement, par exemple les peintures, solvants, batteries, huiles, produits phytosanitaires ou déchets médicaux. Classification selon l'origine des déchets :

• e : **Déchets ménagers** : produits par les particuliers, ils comprennent notamment les ordures ménagères, les emballages, le verre et les objets encombrants

•f : **Déchets d'activités économiques (DAE)** : déchets issus des entreprises, commerces et activités artisanales.

• g : **Déchets de construction** : déchets provenant des travaux et chantiers du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP).

2.5. Les déchets dans le domaine de génie civil

Dans le secteur du génie civil, les déchets proviennent principalement des travaux de construction, de rénovation et de démolition. Ils sont constitués en grande partie de matériaux inertes tels que les gravats, le béton brisé, les briques, les tuiles et les céramiques, auxquels s'ajoutent des résidus de bois, de métaux ainsi que, dans certains cas, des plastiques ou des emballages. Souvent encombrants, ces déchets représentent une proportion considérable des déchets produits à l'échelle mondiale. Leur valorisation, à travers le recyclage ou la réutilisation dans de nouveaux matériaux de construction, est aujourd'hui un enjeu essentiel afin de réduire

l'impact environnemental du secteur et de favoriser l'économie circulaire dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

2.5.1 Définition des déchets de construction et de déconstruction

Les déchets de construction et de déconstruction regroupent tous les matériaux, résidus et débris produits lors des activités de construction, de rénovation, de réhabilitation ou de démolition des bâtiments et des infrastructures. Ils se composent principalement de matériaux inertes tels que le béton, les briques, les tuiles et les gravats, ainsi que de bois, de métaux, de plastiques et de différents types d'emballages. La gestion et la valorisation de ces déchets jouent un rôle essentiel dans la réduction de l'utilisation des ressources naturelles et dans la limitation des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment.

2.5.2 Sources de production des déchets de construction et de démolition

Les déchets de construction et de démolition (DCD) sont générés à différentes étapes du cycle de vie d'un ouvrage. Ils proviennent principalement des travaux de construction neuve, de rénovation, de réhabilitation, d'entretien et de démolition des bâtiments ainsi que des infrastructures de génie civil. La nature et la quantité des déchets produits varient en fonction du type d'ouvrage, des matériaux utilisés, des techniques de construction et des méthodes de démolition employées. Une bonne identification des sources de production permet d'adopter des stratégies de gestion adaptées et d'optimiser les opérations de tri, de réemploi et de **recyclage**.

2.5.3. Classification Déchets de construction et de démolition

La figure ci-dessous présente la répartition volumique des déchets de construction et de démolition en trois grandes catégories selon leur nature et leur niveau de dangerosité.

Les **déchets inertes** représentent la part majoritaire, soit **70 à 80 %** du volume total. Ils comprennent principalement les bétons, mortiers, briques, tuiles, céramiques, verres non traités, pierres naturelles et gravats non pollués. Ces matériaux sont stables, ne se décomposent pas, ne brûlent pas et présentent un fort potentiel de valorisation, notamment sous forme de remblais ou de granulats recyclés.

Chapitre2 : Valorisation des déchets de construction et démolition

Les **déchets non dangereux non inertes** constituent environ **20 à 25 %** des déchets. Cette catégorie regroupe les métaux et alliages, le bois non traité, le plâtre et les matériaux d'isolation. Contrairement aux déchets inertes, ils peuvent subir des transformations

physiques, chimiques ou biologiques, mais possèdent un potentiel important de recyclage à travers des filières de tri spécifiques.

Enfin, les **déchets dangereux** représentent moins de **5 %** des déchets de construction et de démolition. Ils comprennent notamment l'amiante, les bois traités, les peintures contenant des solvants, les terres polluées et les équipements électroniques. En raison de la présence de substances nocives, ces déchets présentent des risques pour la santé humaine et l'environnement et nécessitent un traitement spécialisé dans des centres agréés.



Figure 2-1 : classification des Déchets de construction et de démolition (DCD)

2.5.4 Enjeux environnementaux et économiques de la valorisation des déchets

La valorisation des déchets de construction et de démolition représente un enjeu majeur pour le secteur du bâtiment. Sur le plan environnemental, elle contribue à réduire l'exploitation des ressources naturelles, à limiter les quantités de déchets envoyées en décharge et à diminuer les émissions de gaz à effet de serre liées à l'extraction et à la production de nouveaux matériaux.

Sur le plan économique, elle permet de réduire les coûts de gestion des déchets, de créer de nouvelles filières industrielles et de favoriser le développement de l'économie circulaire.

Ainsi, la valorisation des déchets constitue aujourd'hui un levier essentiel pour une construction plus durable et plus respectueuse de l'environnement

2.5.5 Gestion des déchets de construction et déconstruction

La gestion des déchets de construction et déconstruction repose sur une organisation méthodique et rigoureuse qui vise à garantir, tout au long du chantier, un traitement efficace, conforme aux normes et durable des matériaux résiduels, depuis leur tri initial jusqu'à leur valorisation finale.

2.5.5.1 les étapes Gestion des déchets de construction et déconstruction

Cette gestion s'appuie sur une chaîne opérationnelle structurée en plusieurs étapes essentielles.

A :Tri à la source

Le tri à la source représente l'étape de base de toute démarche de gestion durable des déchets. Il implique une organisation précise du chantier avec la création de zones dédiées selon les types de déchets :

- . Déchets inertes : béton, briques, tuiles, céramiques, terres non contaminées.

Déchets non dangereux : bois, métaux, plâtre, plastiques, cartons

- . Déchets dangereux : amiante, plomb, solvants, peintures et colles contenant des substances toxiques. Cette étape nécessite la formation des équipes et la mise en place d'une signalisation claire. Sa réussite conditionne directement la qualité du traitement et de la valorisation ultérieurs.

B :Stockage temporaire

Le stockage des déchets triés doit respecter des règles strictes de sécurité et de protection de l'environnement. Chaque catégorie requiert des conditions adaptées :

- . Contenants étanches pour les déchets liquides et dangereux

- . Aires stabilisées et drainées pour les déchets inerte.

Zones couvertes pour les matériaux sensibles à l'humidité

- . Espaces ventilés pour les déchets émettant des vapeurs

C :Transport et traçabilité

Le transport des déchets est assuré par des opérateurs agréés, conformément à la réglementation en vigueur. La traçabilité est garantie par des documents officiels tels que :

- . Bordereau de Suivi des Déchets (BSD) pour les déchets dangereux

- . Bordereau de Suivi des Déchets d'Amiante (BSDA) pour les matériaux contenant de l'amiante

. Bons d'enlèvement pour les déchets non dangereux

D : Traitement et valorisation

Les déchets sont ensuite dirigés vers des installations spécialisées selon différentes filières :

- . Recyclage matière : transformation en nouveaux matériaux de construction
- . Valorisation énergétique : incinération avec récupération d'énergie
- . Réemploi direct : réutilisation sans transformation préalable
- . Compostage : pour les déchets organiques et végétaux

E : Élimination

L'élimination en centres de stockage concerne uniquement les déchets ultimes non valorisables. Elle constitue la dernière option et doit être réduite au minimum dans une logique d'économie circulaire et de réduction des impacts environnementaux.

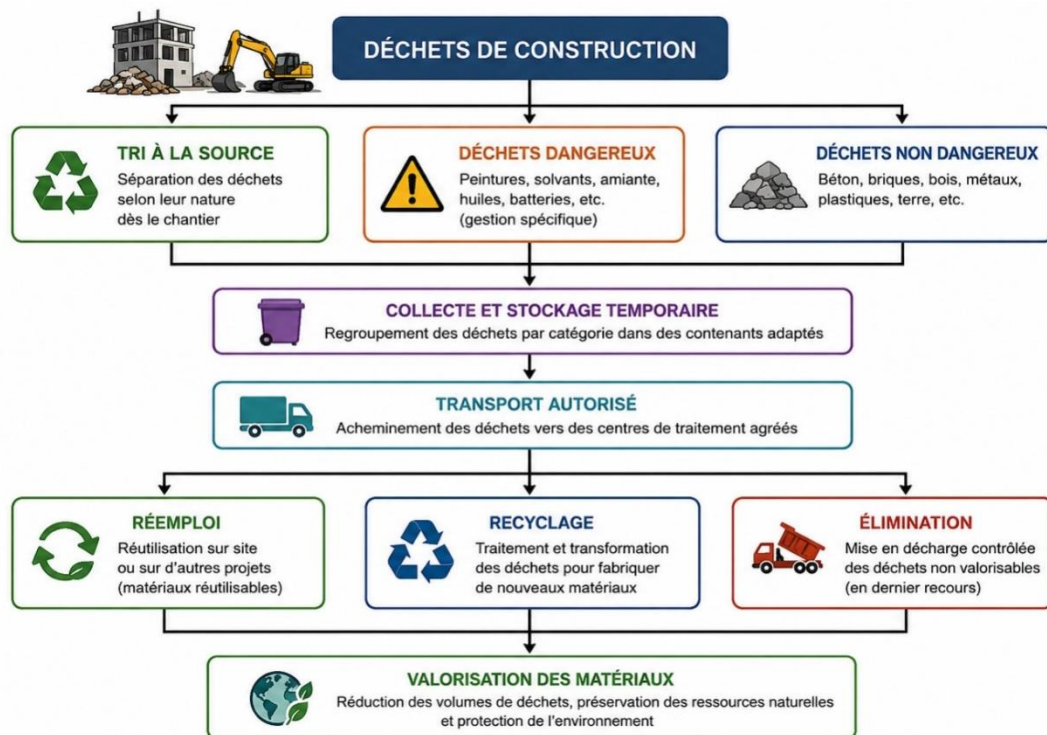


Figure2.2 : Schémas de gestion des déchets de construction

2.5.6 Méthodes de valorisation des déchets de construction et de démolition

La valorisation des déchets de construction et de démolition repose sur plusieurs méthodes permettant de prolonger le cycle de vie des matériaux et de réduire leur impact sur l'environnement. Selon la nature des déchets, différentes approches peuvent être mises en œuvre.

a. Réemploi

Le réemploi consiste à utiliser directement un matériau ou un élément de construction pour le même usage ou pour un usage similaire, sans transformation importante. Cette méthode permet d'économiser les matières premières et de réduire la consommation d'énergie.

b. Réutilisation

La réutilisation correspond à l'utilisation d'un matériau dans une nouvelle application après des opérations simples telles que le nettoyage, le découpage ou le tri. Cette pratique limite la production de déchets et contribue à préserver les ressources naturelles.

c. Recyclage

Le recyclage consiste à transformer les déchets en nouvelles matières premières destinées à la fabrication de nouveaux produits. Les bétons, les briques, le verre, les métaux et certaines matières plastiques peuvent être recyclés pour être réintroduits dans le secteur du génie civil.

d. Valorisation énergétique

Les déchets qui ne peuvent pas être recyclés peuvent être utilisés comme source d'énergie dans des installations spécialisées. Cette technique permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans les déchets tout en réduisant leur volume avant élimination.

2.5.7 Différents types de déchets valorisés dans le domaine du Génie civil

Dans le domaine du Génie civil, de nombreux déchets peuvent être valorisés, soit par recyclage, soit par réutilisation directe dans les matériaux de construction ou les infrastructures. Ces déchets, selon leur origine et leur nature, se répartissent en plusieurs catégories et trouvent des applications variées dans les procédés du génie civil, comme présenté ci-dessous :

2.5.7.1 Déchets de chantier (déblais)

Ils comprennent les terres excavées, gravats, béton, briques, tuiles, moellons, etc.

. Valorisation :

Ils peuvent être concassés et criblés afin de produire des granulats recyclés utilisés dans les remblais, les couches de fondation ou parfois dans la fabrication du béton selon leur qualité. Ils peuvent également être réemployés :

Comme matériaux de remblai ou de sous-couche routière.

2.5.7.2 Déchets de démolition

Ils regroupent le béton armé, les maçonneries, l'asphalte, les tuiles, le verre cassé et le plâtre.

. Valorisation :

- Ils sont transformés en granulats recyclés utilisés pour les chaussées, les remblais ou les bétons non structurels.

- Les métaux ferreux issus de ces déchets sont séparés puis recyclés.
- Certains déchets non recyclables peuvent être orientés vers la valorisation énergétique.

2.5.7.3 Béton recyclé

Le béton issu de la démolition peut être retraité.

. Valorisation :

Il est utilisé en substitution partielle ou totale des granulats naturels dans certaines formulations de béton ou de mortier, ainsi que dans les couches de fondation des routes et bâtiments.

- Avantage : réduction de l'exploitation des granulats naturels et diminution des volumes envoyés en décharge.

2.5.7.4 Asphalte recyclé

S'agit des enrobés retirés lors des travaux de réfection des chaussées.

. Valorisation :

- Ils sont réintégrés dans de nouveaux enrobés avec ajout de liant neuf ou de régénérants,
- utilisés comme couches de fondation et matériaux de rembl

2.5.7.5 Plâtre recyclé

Issu des plaques de plâtre utilisées dans la construction ou la rénovation.

. Valorisation :

- Il permet la fabrication de nouveaux produits à base de plâtre.
- Un tri rigoureux est nécessaire afin d'éviter toute contamination par le bois, le carton ou le mé

2.5.7.6. Verre recyclé

. Le verre de construction peut être valorisé dans le génie civil.

. Valorisation :

Il est utilisé comme substitut du sable dans certains bétons décoratifs ou spéciaux, ainsi que dans les enrobés routiers pour améliorer l'adhérence.

- Il doit toutefois être soigneusement trié et broyé.

2.5.7.7. Bois recyclé

Il provient des coffrages, palettes, caisses et menuiseries.

Valorisation :

- Le bois propre est réutilisé directement dans la construction ou l'ameublement.
- Le bois traité ou contaminé est orienté vers la valorisation énergétique (production de chaleur ou d'électricité).

2.5.7.8. Métaux ferreux et non ferreux

Ils incluent l'acier d'armature, les canalisations, les profilés ainsi que le cuivre et l'aluminium.

Valorisation :

Ils sont triés, compactés puis recyclés industriellement afin d'être réintroduits dans les aciéries et fonderies.

2.5.7.9. Matériaux composites et plastiques

Ils comprennent les tubes PVC, isolants synthétiques et bâches plastiques.

Valorisation :

- Certains plastiques sont recyclables selon leur nature (PEHD, PVC).
- Les autres peuvent être valorisés énergétiquement lorsqu'ils ne sont pas recyclables.

2.5.7.10. Terres et matériaux excavés

Issus des travaux de terrassement, fouilles et forages.

Valorisation :

- Ils sont réutilisés directement sur site ou sur d'autres chantiers pour les remblais.
- Ils peuvent aussi être stockés temporairement en vue d'une réutilisation dans des projets de voirie ou d'aménagement.

2.5.7.11 Déchets industriels non dangereux (DIND)

Ils comprennent notamment les sols non contaminés, cendres et laitiers.

Valorisation :

- Ils sont utilisés dans les remblais techniques ou pour la stabilisation des sols.

2.5.7.12. Cendres volantes et laitiers de haut-fourneau

Issus des industries sidérurgiques et des centrales thermiques.

Valorisation :

- Ils sont incorporés dans les bétons comme additions minérales améliorant leurs performances,
- utilisés dans les matériaux routiers et les sols traités.

2.5.7.13. Déchets de carrières et mines

Ils incluent les stériles miniers et résidus d'extraction.

Valorisation :

Ils peuvent être utilisés comme granulats de substitution ou matériaux de remblai après vérification de leur innocuité environnementale.

2.6. Cas de notre étude

Les déchets de briques et de faïences représentent une catégorie spécifique de déchets inertes. Ils présentent des caractéristiques physico-chimiques particulières ainsi qu'un potentiel de valorisation intéressant, ce qui justifie leur analyse approfondie dans le cadre de notre étude.

2.6.1 déchets de céramique sanitaire :



Image2-1 : Déchets de céramique sanitaire

2.6.1.1.Définition

La céramique Sanitaire regroupe les produits céramiques destinés aux usages domestiques et sanitaires, tels que : les cuvettes de WC, les lavabos, les baignoires, les douches, les bidets, les urinoirs et les éviers.

2.6.1.2. Procédé de fabrication :

La fabrication d'un lavabo en céramique est un processus industriel et artisanal rigoureux qui transforme des minéraux naturels en un produit sanitaire durable, lisse et étanche.

Première étape : Préparation de la pâte (Barbotine) :

Le processus commence par le mélange d'ingrédients de base : Argile et Kaolin : Pour la structure malléable et la blancheur pure. Quartz : Pour la résistance et la stabilité thermique.

Chamotte (argile cuite broyée) et Feldspath : Pour donner du corps et faciliter la fusion lors de la cuisson.

Ce mélange est broyé et délayé dans de l'eau chaude pour obtenir une pâte liquide et homogène appelée barbotine.

Deuxième étape : Le Moulage :

La barbotine est coulée dans des moules en plâtre ou en résine poreuse. Le moule absorbe l'eau de la barbotine, ce qui provoque la solidification de la matière contre les parois. Une fois l'épaisseur souhaitée obtenue, le surplus liquide est vidé.

Troisième étape : Démoulage et finitions :

Une fois la pièce démoulée à l'état « cru », souvent très fragile, les artisans ou des machines réalisent les opérations de finition suivantes : Perçage du trop-plein. Lissage des bords et des imperfections à l'aide d'éponges et de grattoirs. Séchage complet de la pièce à une température comprise entre 90 et 95 °C pendant plusieurs heures afin d'évacuer toute

Quatrième étape : Émaillage :

Avant la cuisson, la pièce reçoit une fine couche d'émail (glaçure), souvent appliquée au pistolet. L'émail donne au lavabo son aspect brillant, sa couleur — généralement blanche — et le rend imperméable, hygiénique et facile à nettoyer.

Le lavabo est placé dans un four industriel, souvent un four tunnel, où la température atteint entre 1 200 °C et 1 280 °C. Cette forte chaleur provoque la vitrification de la matière : les éléments fondent ensemble pour former une structure solide, indéformable et vitreuse. Pour bien comprendre comment la matière liquide (la barbotine) est structurée à l'aide des différents minéraux afin de former un évier ou un lavabo solide, il est essentiel de considérer le rôle spécifique de chaque composant dans les propriétés finales du produit.

Propriétés de la céramique sanitaire

- . Incombustible.
- . Résistante aux solvants.
- . Durable et hygiénique.
- . Facile à nettoyer

2.6.1.3. Propriétés chimique des matériaux céramiques

Tableau2-1 : Composition chimique typique des utilisées pour la céramique (en%)

Composant chimique	Kaolin (argile blanche pure)	Argile à grés	Faince/Terr cuite)
Silice(SiO ₂)	45à47%	60à70%	50à60%
Alumine(Al ₂ O ₃)	36à39%	15à25%	10à20%
Oxyd de fer(Fe ₂ O ₃)	0,1à0,5%	0,5à2,5%	Jusqu'à 8%
Oxyde de titane(TiO ₂)	0,1à0,5%	0,1à1,0%	0,5à1,5%
Chaux (CaO)	0à0,5%	0à1,0%	Jusqu'à 15%(calcaires)
Alcalins (K ₂ O,Na ₂ O)	0,5à1,5%	1,0à4,0%	2,0à5,0%

Eau combinée/perte au feu(H ₂ O)	12à14%	5à8%	6à10%
--	--------	------	-------

a. Stabilité chimique

La stabilité chimique constitue l'une des propriétés les plus importantes des matériaux céramiques. Cette caractéristique est principalement due à la solidité des liaisons chimiques, notamment la combinaison des liaisons ioniques et covalentes. (AL₂O₃) L'alumine possède une très grande stabilité chimique sur une large gamme de températures, allant de la température ambiante jusqu'à environ 1000 °C. Même dans des conditions sévères, elle conserve sa structure chimique ainsi que ses performances. Grâce à cette propriété, les matériaux céramiques sont largement utilisés dans les applications chimiques et industrielles.

b. Résistance à la corrosion

Les matériaux céramiques se distinguent par leur forte résistance à la corrosion. Ils peuvent supporter l'action de nombreux milieux corrosifs tels que les acides, les bases et les sels.

(ZrO₂) L'oxyde de zirconium représente un exemple typique, car il garde une excellente stabilité dans les environnements très acides ou alcalins, ce qui le rend adapté aux équipements chimiques et aux systèmes de conduites.

Cette résistance remarquable est liée à la présence d'une couche protectrice dense à la surface du matériau, empêchant l'attaque progressive des agents corrosifs.

c. Résistance à l'oxydation

La résistance à l'oxydation est également une propriété chimique essentielle des matériaux céramiques. De nombreuses céramiques sont déjà constituées d'oxydes, comme : (AL₂O₃) et (ZrO₂) ce qui leur assure une bonne stabilité dans les milieux oxydants à haute température. Les céramiques non oxydées, telles que :

(SiC) et(Si₃N₄) forment à haute température une couche d'oxyde protectrice qui améliore davantage leur **résistance à l'oxydation.**

d. Inertie chimique

Les matériaux céramiques possèdent une grande inertie chimique, ce qui leur permet de rester stables dans différents environnements chimiques sans réagir facilement avec les substances voisines.

(AL₂O₃) L'alumine est un matériau particulièrement inerte. Elle réagit très peu avec les autres composés chimiques, ce qui explique son utilisation fréquente dans les récipients de réactions chimiques et les équipements de laboratoire.

2.6.1.4. Propriétés physiques des matériaux céramiques

a. Densité :

La densité est une propriété physique fondamentale des matériaux céramiques. Les céramiques techniques courantes présentent généralement une densité théorique relativement élevée. Par exemple, celle de l'alumine est d'environ $3,95 \text{ g/cm}^3$, tandis que la zircone peut atteindre $5,68 \text{ g/cm}^3$. Cependant, durant le procédé de fabrication, la présence inévitable de pores entraîne souvent une densité apparente plus faible que la densité théorique du matériau.

b. Porosité

La porosité influence fortement les performances globales des matériaux céramiques. Elle agit directement sur la densité, mais aussi sur les propriétés mécaniques, la conductivité thermique et la perméabilité. Pour obtenir de meilleures performances mécaniques, on cherche généralement à réduire la porosité. Dans les céramiques frittées à haute température, elle est habituellement maintenue en dessous de : 5/

Toutefois, dans certaines applications spécifiques comme la filtration ou les biomatériaux céramiques, une porosité contrôlée reste nécessaire et peut varier entre : 20 / et 60 / .

c. Propriétés de surface

Les propriétés de surface constituent un paramètre physique essentiel des matériaux céramiques. Grâce à leurs liaisons chimiques particulières, ces matériaux présentent une grande dureté ainsi qu'une excellente stabilité. Les paramètres tels que l'énergie de surface et La mouillabilité influencent directement les performances, notamment dans les phénomènes d'adhésion et de traitement des interfaces. Aujourd'hui, de nombreux matériaux céramiques sont améliorés par des techniques de modification de surface afin d'obtenir des fonctions spécifiques selon les besoins, comme l'hydrophobicité, l'hydrophilie ou encore des propriétés antibactériennes.

2.6.2 Déchets de plâtre :

2.6.2.1. Définition de plâtre

Le plâtre est un matériau de construction reconnu pour ses propriétés isolantes et ignifuges. Il est fabriqué industriellement à partir d'une roche naturelle appelée gypse. Dans l'usage courant, le terme « plâtre » peut désigner soit la poudre sèche d'origine industrielle, soit la pâte obtenue après mélange avec de l'eau, soit encore le matériau durci utilisé sous forme de plaques ou d'enduits appliqués sur les surfaces.



Image2-2 : plafond en plâtre

2.6.2.2. procédé de fabrication :

La fabrication du plâtre repose avant tout sur l'exploitation d'une ressource naturelle essentielle : le gypse. Cette roche minérale s'est formée en couches épaisses à la suite de l'évaporation de l'eau de mer il y a environ quarante millions d'années. Avec le temps, elle s'est déposée et se trouve aujourd'hui enfouie sous différentes strates rocheuses. Son extraction constitue une étape clé dans la production du plâtre, réalisée dans le respect de deux principes majeurs : préserver les ressources et protéger l'environnement.

- **Une exploitation encadrée et responsable des carrières :**

L'extraction du gypse est soumise à une réglementation stricte. Avant toute autorisation, les industriels doivent mener des études afin d'évaluer les impacts potentiels sur l'écosystème ainsi que sur les activités économiques et sociales locales.

Une fois l'autorisation obtenue, l'exploitation peut débuter selon deux méthodes principales, choisies en fonction des caractéristiques du gisement, notamment la profondeur et le nombre de couches de gypse.

- **L'exploitation à ciel ouvert**

Cette méthode est utilisée lorsque le gypse est proche de la surface. Elle consiste à retirer les couches de recouvrement pour accéder au gisement, puis à extraire le matériau à l'aide d'explosifs ou d'équipements adaptés.

- **L'exploitation souterraine :**

Elle est privilégiée lorsque le gypse est situé en profondeur. Dans ce cas, des galeries sont creusées pour atteindre les couches de gypse sans enlever les couches supérieures.

Après son extraction, le gypse est transporté vers les usines pour être transformé.

- **Transformation et utilisation du plâtre :**

Le gypse est ensuite traité pour être réduit en poudre fine. Mélangée à de l'eau, cette poudre permet d'obtenir le plâtre utilisé dans divers domaines. Les plaques et carreaux de plâtre, destinés à la réalisation de cloisons et plafonds, sont fabriqués en usine en moulant le plâtre entre deux feuilles de carton recyclé.

D'autres produits comme les enduits, le staff et le stuc sont préparés directement sur les chantiers, en mélangeant la poudre de plâtre avec des matériaux complémentaires tels que la chaux, la poudre de marbre ou des fibres.

2.6.2.3.Caractéristiques et propriétés chimiques :

Sur le plan chimique, la poudre de plâtre est constituée principalement de composés ioniques issus de la déshydratation thermique du gypse. Ces composés sont essentiellement l'hémi-hydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) et/ou l'anhydrite (CaSO_4), qui est une forme anhydre du sulfate de calcium. Lorsque cette poudre est mélangée à l'eau, elle se transforme en une pâte qui, après durcissement, redonne du gypse sous forme de sulfate de calcium di-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), constituant un matériau solide, généralement blanchâtre.

Par ailleurs, la composition du plâtre peut être modifiée par l'ajout d'adjuvants comme des charges ou des pigments, afin d'améliorer ses propriétés ou de modifier son aspect final.

-l'équation chimique de la prise du plâtre est :



Cette réaction correspond à l'hydratation de l'hémi-hydrate de sulfate de calcium pour former le gypse (sulfate de calcium di-hydraté).

2.6.2.4.propriétés physiques :

Le plâtre est un matériau de construction obtenu principalement à partir du gypse (sulfate de calcium hydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calciné puis réhydraté lors de la prise. Voici ses principales propriétés physiques :

- **Aspect et densité :**

Poudre fine blanche ou légèrement grise à l'état sec Densité relativement faible : environ 0,8 à 1,2 g/cm³ (selon le type et la compacité) Matériau léger une fois durci

- **Prise et durcissement :**

: Se mélange à l'eau pour former une pâte Prise rapide (de quelques minutes à ~30 minutes selon formulation) Durcissement par cristallisation (formation de cristaux de gypse) Légère expansion au moment de la prise (très important en moulage)

- **Résistance mécanique :**

Bonne résistance en compression Faible résistance en traction et flexion (cassant) Fragile aux chocs et vibrations

- **Porosité et absorption d'eau :**

Matériau très poreux Forte capacité d'absorption d'eau Perte de résistance en présence d'humidité prolongée

Isolation thermique et acoustique :

Bon isolant thermique (faible conductivité thermique) Correcte isolation acoustique grâce à sa structure poreuse

- **Stabilité dimensionnelle :**

Bonne stabilité après prise Peu de retrait (contrairement à certains ciments)

- **Résistance au feu :**

Très bonne résistance au feu Contient de l'eau de cristallisation qui ralentit la propagation de la chaleur

- **Masse volumique :**

La masse volumique du plâtre varie selon son état. À l'état de poudre non compactée, elle se situe entre 800 et 1200 kg/m³. Après durcissement, elle augmente et atteint environ 1600 à 2000 kg/m³. Cette différence s'explique par la présence de nombreux vides d'air dans la structure du plâtre durci. À titre de comparaison, la masse volumique du gypse naturel est d'environ 2300 kg/m³.

- **Résistance mécanique :**

Le plâtre présente une bonne résistance à la compression, généralement comprise entre 8 et 25 MPa selon sa qualité. En revanche, sa résistance à la traction est faible, de l'ordre de 1 à 3 Mpa, tout comme sa résistance en flexion qui varie entre 2 et 7 Mpa. Ainsi, le plâtre est un matériau fragile, principalement adapté aux efforts de compression.

- **Conductivité thermique :**

La conductivité thermique du plâtre est relativement faible, avec des valeurs comprises entre 0,20 et 0,35 W/m·K. Cela signifie qu'il s'agit d'un bon isolant thermique, capable de limiter les échanges de chaleur. Cette propriété explique son utilisation fréquente dans les cloisons et plafonds intérieurs des bâtiments.

2.6.3 Etudes Antérieures sur le Recyclage de Déchets de céramiquesanitaire et de plâtre :

Les études antérieures montrent que le recyclage des déchets de céramique sanitaire et de plâtre reste un enjeu important dans le domaine de la construction durable. La céramique sanitaire peut être valorisée principalement comme granulats dans les bétons ou les matériaux routiers après concassage, tandis que le plâtre peut être recyclé en nouvelle matière première après traitement et purification. Cependant, ces procédés restent limités par la contamination des déchets, la difficulté de tri et les coûts de traitement. En conclusion, bien que le potentiel de recyclage soit élevé, son développement dépend fortement de l'amélioration des techniques de collecte, de tri et de valorisation industrielle.

La formulation ainsi établie a été vérifiée expérimentalement puis corrigée afin d'obtenir un étalement de 2 cm, tout en conservant un dosage en sable de 1277 kg/m³.

2.6.4 Comparaison entre les déchets de plâtre et de céramique sanitaire

Les déchets de plâtre et de céramique sanitaire sont deux matériaux largement générés par les activités de construction, de rénovation et de démolition. Bien qu'ils soient tous deux valorisables dans le domaine du génie civil, ils présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes qui influencent leurs domaines d'application. La comparaison de leurs propriétés permet de mieux identifier leurs avantages, leurs limites ainsi que leurs possibilités de réutilisation dans les matériaux de construction.

2.6.4.1 Composition chimique

La composition chimique constitue l'une des principales différences entre ces deux matériaux. Les déchets de céramique sanitaire sont principalement constitués de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃), de feldspaths et de quartz, auxquels peuvent s'ajouter de faibles quantités d'oxydes métalliques tels que Fe₂O₃, TiO, CaO, Na₂O et K₂O. Cette composition leur confère une excellente stabilité chimique et une grande résistance aux agents agressifs.

En revanche, les déchets de plâtre sont composés essentiellement de sulfate de calcium dihydraté (CaSO₄·2H₂O), obtenu après réhydratation de l'hémihydrate de sulfate de calcium. Ils peuvent également contenir de faibles proportions d'additifs destinés à améliorer certaines propriétés du matériau.

2.6.4.2 Propriétés physiques

Les déchets de céramique sanitaire présentent une densité élevée, une faible porosité, une excellente dureté ainsi qu'une très bonne résistance à l'usure et à la compression. Leur faible

absorption d'eau leur permet de conserver leurs performances dans des environnements humides.

À l'inverse, les déchets de plâtre possèdent une densité plus faible et une porosité plus importante. Ils offrent une bonne isolation thermique et acoustique mais restent sensibles à l'humidité, ce qui entraîne une diminution de leurs performances mécaniques lorsqu'ils sont exposés à l'eau pendant de longues périodes.

2.6.4.3 Avantages

Les déchets de céramique sanitaire présentent plusieurs avantages, notamment une excellente résistance mécanique, une grande stabilité chimique, une faible absorption d'eau ainsi qu'une forte durabilité. Ils peuvent remplacer une partie des granulats naturels dans les bétons et les mortiers tout en conservant de bonnes performances.

Les déchets de plâtre se distinguent principalement par leur recyclabilité, leur faible masse volumique, leurs bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique ainsi que leur excellente résistance au feu. Leur recyclage permet également de réduire la consommation de gypse naturel.

2.6.4.4 Limites

Malgré leurs qualités, les déchets de céramique sanitaire présentent une forte dureté qui nécessite des opérations de concassage énergivores avant leur réutilisation. Leur caractère fragile peut également favoriser la formation de particules fines lors du broyage.

Les déchets de plâtre présentent quant à eux une sensibilité importante à l'humidité. Leur recyclage exige un tri rigoureux afin d'éviter toute contamination par le bois, le papier, les plastiques ou d'autres matériaux susceptibles d'altérer la qualité du produit recyclé.

2.6.4.5 Applications potentielles dans le génie civil

Les déchets de céramique sanitaire sont principalement utilisés comme granulats recyclés dans les bétons, les mortiers, les couches de fondation routière, les remblais ainsi que dans certains matériaux préfabriqués.

Les déchets de plâtre sont essentiellement valorisés dans la fabrication de nouveaux produits à base de plâtre, de plaques de plâtre recyclées et de matériaux de remplissage. Ils peuvent également être incorporés dans certains liants ou utilisés dans des applications nécessitant des propriétés d'isolation thermique et acoustique.

Chapitre2 : Valorisation des déchets de construction et démolition

Tableau 2-2 : Comparaison entre les déchets de plâtre et de céramique sanitaire

Critère	Déchets de céramique sanitaire	Déchets de plâtre
Composition principale	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , feldspath, quartz	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Densité	Élevée	Faible à moyenne
Porosité	Faible	Élevée
Absorption d'eau	Faible	Élevée
Résistance mécanique	Très élevée	Moyenne
Résistance à l'humidité	Excellente	Faible
Recyclabilité	Très bonne après concassage	Très bonne après tri et purification
Applications	Béton, mortier, chaussées, remblais	Plaques de plâtre, enduits, matériaux isolants

2.6.5 Justification du choix des matériaux étudiés

Le choix des déchets de céramique sanitaire et de plâtre dans cette étude repose sur plusieurs critères scientifiques, techniques et environnementaux. Ces deux matériaux sont largement utilisés dans le secteur du bâtiment et génèrent des quantités importantes de déchets en fin de vie. Leur composition chimique, leur stabilité ainsi que leurs propriétés physiques offrent un potentiel intéressant pour une valorisation dans les matériaux de construction. Par ailleurs, leur recyclage contribue à réduire la consommation des matières premières naturelles et s'inscrit pleinement dans les objectifs du développement durable et de l'économie circulaire. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer la possibilité d'intégrer ces déchets dans de nouvelles formulations tout en préservant les performances des matériaux obt

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principaux aspects liés aux déchets de construction et de démolition, en mettant l'accent sur leur origine, leur classification, leur gestion et les différentes méthodes de valorisation. Il a également montré que le recyclage de ces déchets constitue une solution efficace pour réduire les impacts environnementaux et préserver les ressources naturelles.

Une attention particulière a été accordée aux déchets de céramique sanitaire et de plâtre, en présentant leurs caractéristiques ainsi que leur potentiel d'utilisation dans le domaine du génie

Chapitre2 : Valorisation des déchets de construction et démolition

civil. L'étude bibliographique réalisée met en évidence l'intérêt de ces matériaux comme alternatives aux ressources conventionnelles et constitue une base scientifique pour la partie expérimentale, qui portera sur l'évaluation de leurs performances dans les matériaux de construction.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX

3.1 Introduction:

Pour élaborer une matrice cimentaire avec un dosage approprié de ses différents constituants, il est indispensable de maîtriser les propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux employés. Cette connaissance approfondie permet également d'interpréter les tendances observées au sein des résultats expérimentaux.

Le présent chapitre est consacré à la présentation des matériaux de base retenus pour cette étude. Nous commençons par préciser leur origine et leurs caractéristiques physiques fondamentales. Par la suite, nous détaillons les protocoles expérimentaux adoptés pour leur caractérisation, en explicitant les procédures opératoires ainsi que les normes de référence applicables.

3.2 Identification des matériaux de base utilisés:

Dans le cadre de cette étude, les matériaux suivants ont été sélectionnés et utilisés en raison de leur disponibilité et de leurs caractéristiques techniques adaptées à nos objectifs à savoir :

- ✓ Un ciment de type (CPJ-CEMII/A-M(S-L)/42.5N) provenant de la cimenterie (GICA) à HJAR ESSOUD.
- ✓ Un sable de dune de provenance d'oued Zhor à Skikda.
- ✓ Deux sables recyclés, un sable recyclé de déchet de céramique noté (SC) et un sable de déchet de plâtre noté (SP).
- ✓ Un adjuvant super plastifiant de type Viscocrete 665 commercialisé par Sika Algérie.
- ✓ Eau de gâchage du robinet.
- ✓ Filler de calcaire SFDM CFD15, fourni par l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) de la carrière de Constantine-Est (Algérie).

Fibre métallique de type Dramix ® 3D, commercialisées par la société Bekaert.

3.3 Caractéristiques des matériaux utilisées

3.3.1 Le ciment

Pour l'ensemble des mélanges, un seul type de ciment a été utilisé : le CPJ-CEM II/ A-M (S-L) / 42.5N. Aussi, la qualité de ce ciment reste constante et constitue un paramètre constant tout au long de l'étude.

Chapitre 3 : caractérisation des matériaux



Image 3-1: Ciment utilisé.

Ses caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques sont représentées dans les trois tableaux suivants.

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ42.5

Résistance (Mpa)	Age (jours)	
	2 jours	28 jours
Résistance en traction par flexion (MPa)	4.45	7.01
Résistance en compression (MPa)	14.1	48.6

Tableau 3.2 : Caractéristiques Physiques du ciment CPJ42.5

Caractéristiques	Résultats
Début de prise (min)	150.6
Fin de prise (min)	208.8
Masse volumique absolue (t/m ³)	3.1

Tableau 3.3: Composition chimique du ciment CPJ42.5

Désignation	Résultats (%)
CaO	64.02
Al ₂ O ₃	5.12
Fe ₂ O ₃	3.30
SiO ₂	22.05
MgO	1.25
Na ₂ O	0.12
K ₂ O	0.52
Cl-	0.005
SO ₃	1.84
CaO Libre	1.40

Chapitre 3 : caractérisation des matériaux

PAF	1.40
RI	2.56

Commentaires :

D'après ces tableaux, on constate que le ciment utilisé est conforme à la norme NA 442.

3.3.2 Sable de dune

Dans une démarche de valorisation des ressources locales, nous avons utilisé un sable de dune à teinte jaunâtre, provenant de la région d'Oued Zhour de la ville de Skikda.



Image 3-2: Sable de Dune

Ses caractéristiques physiques et chimiques sont présentées dans les deux tableaux ci-après.

Tableau 3.4 : Caractéristiques physiques du Sable (SD)

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.141
Masse volumique absolue		2.631
Equivalent de sable	%	74.59
Absorption d'eau		1.02
Module de Finesse		1.83

Chapitre 3 : caractérisation des matériaux

Tableau 3.5 : Composition Chimique du Sable de dune

Composant	%	Composant	%
SiO ₂	77.86	MgO	0.19
Al ₂ O ₃	2.05	SO ₃	0.00
Fe ₂ O ₃	1.13	K ₂ O	0.59
Cao	4.78	Na ₂ O	0.19

Commentaires :

Selon les résultats des deux tableaux ci-dessus, le sable de dune se caractérise par:

- Une forte teneur en silice SiO₂ (77.86%), ce qui en fait un sable siliceux.
- Ce sable est propre, pauvre en fines argileuses, avec un module de finesse élevé et un faible coefficient d'absorption.

L'analyse granulométrique du sable de dune est illustrée sur le tableau 3.6.

Tableau3.6 : Analyse granulométrique de sable de dune(SD)

Tamis (mm)	Masse de refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	Tamisât (%)
2	0	0	100
1	6	2	98
0.5	12	4	96
0.25	252	84	16
0.125	279	93	7
0.063	297	99	1

Commentaires :

On constate que ce sable peut être qualifié de sable fin à moyen, très peu chargé en fines et à granulométrie étalée.

3.3.3 Sables recyclés

On a utilisé dans cette étude deux types de sables recyclés, un sable de déchet de céramique (SC) et un sable de déchet de plâtre (SP).

3.3.3.1 Sable de déchet de céramique

Le sable de déchet de céramique utilisé dans cette étude a été obtenu par concassage mécanique de déchets de céramiques issus de lavabos et de baignoires récupérés (Photo 3-3). Les matériaux ont d'abord été fragmentés en morceaux de dimensions réduites à l'aide d'un marteau, puis

Chapitre 3 : caractérisation des matériaux

broyés dans un concasseur afin d'obtenir un sable de céramique. Le matériau obtenu a ensuite été tamisé à travers un tamis de 5 mm pour produire une fraction granulaire répondant aux exigences de l'étude.



Image 3-3:Concasseur mécanique



Image 3-4:Sable de déchet de céramique

a- Caractéristiques Physiques

Les caractéristiques physiques de ce sable de déchet de céramique sont données sur le tableau 3.7 :

Tableau 3.7: Caractéristiques physiques de sable de déchet de céramique

Caractéristiques	Unité	Valeurs
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.236
Masse volumique absolue		3.11
Equivalent de sable	%	97.63
Absorption d'eau		6.08
Module de finesse		3.03
Teneur en fines		8

Commentaires:

- Concernant la masse volumique apparente, le sable de déchet de céramique (SC) présente une valeur plus élevée 1.236 g/cm³ que celle du sable de dune (SD) qui est de 1.141 g/cm³. Cette différence peut être attribuée à la granulométrie plus grossière et à la densité des grains de céramique, ce qui confère au sable de céramique une compacité plus importante par rapport au sable dune.
- La masse volumique absolue du sable de déchet de céramique est relativement élevée 3.11g/cm³ comparativement à celle du sable de dune. Cette valeur traduit la forte densité des particules solides de céramique liée à leur composition minéralogique riche en silice et en oxydes

minéraux.

- En ce qui concerne l'équivalent de sable (ES), le sable de déchet de céramique affiche une valeur très élevée de 97.63% supérieure à celle du sable de dune. Cela indique une excellence propreté du matériau ainsi qu'une très faible teneur en particules argileuses ou impuretés fines.
- La capacité d'absorption d'eau constitue l'un des écarts les plus marquants, elle est élevée pour le sable de céramique (6.08%) comparativement à celle du sable. Cette forte absorption est due à la structure poreuse des grains de céramique, ce qui peut entraîner une augmentation de la demande en eau dans le mélange de béton.
- Le module de finesse du sable de déchet de céramique est de 3.03% largement supérieur à celui du sable de dune. Cette valeur indique une granulométrie plus grossière du sable de céramique, traduisant la présence de grains de taille plus importante pouvant influencer la compacité et l'ouvrabilité du béton.
- Concernant le teneur en fine, le sable de déchet de céramique présente généralement une quantité de fines de 8%. Cette valeur est supérieure à celle de la sables dune et peut influencer la demande en eau du mélange. Toutefois, ces fines peuvent également améliorer le remplissage des vides entre les grains et contribuer à une meilleure compacité du béton.

b- Caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques de ce sable de céramique sont données sur le tableau 3.8 :

Tableau 3.8 : composition chimique de sable de déchet de céramique

Composant	%	Composant	%
SiO ₂	70.79	MgO	1.73
Al ₂ O ₃	15.61	SO ₃	1.09
Fe ₂ O ₃	2.54	K ₂ O	1.32
CaO	2.99	Na ₂ O	0.14

Commentaires:

Le sable de déchets de céramique présente une composition chimique dominée par la silice (70.79%), suivie de l'alumine (15.61 %), ce qui confirme sa nature essentiellement silico-alumineuse et son origine argileuse. La présence de Fe₂O₃ (2.54 %), CaO (2.99 %), ainsi que de faibles quantités de MgO (1.73 %), K₂O (1.32 %), SO₃ (1.09 %) et Na₂O (0.14 %), indique que ces oxydes jouent un rôle secondaire dans la composition globale du matériau.

b- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sable recyclé de céramique est illustrée sur le tableau 3.9.

Tableau 3-9 : Analyse granulométrique de sable de déchet de céramique

Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	tamisât cumulés (%)
5.6	0	0	100
4.00	120	12	88
2.00	338	33.8	66
1.00	476	47.6	52
0.50	550	55	45
0.25	690	69	31
0.125	860	86	14
0.063	920	92	8

Commentaires :

L'analyse granulométrique montre que le sable de déchet de céramique est un sable grossier à granulométrie continue, dont les dimensions des particules s'étendent de 0.063 à 5.6 mm. Cette répartition est marquée par une prédominance des fractions grossières (1 à 4 mm) et par une faible proportion de fines.

3.3.3.2 Sable de déchet plâtre

Après récupération et tri, les déchets de plâtre ont été séchés à température constante dans une étuve pendant 24 heures. Ils ont ensuite subi une opération de fragmentation, suivie d'un concassage mécanique normalisé et d'un tamisage à l'aide d'un tamis de 5 mm, afin d'obtenir un sable répondant aux exigences de l'étude.



Image 3-5: Sable de déchet de plâtre

a- Caractéristique Physiques

Les caractéristiques physiques de sable de déchet de plâtre sont données par le tableau 3.10.

Tableau 3-10: Caractéristiques physiques de sable de déchets de plâtre

Caractéristiques	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	g/cm ³	0.842
Masse volumique absolue		2.58
Equivalent de sable		43.47
Absorption d'eau		8.72
Module de finesse		4.32
Teneur en fines	%	13

Commentaires :

- La masse volumique apparente du sable de plâtre présente une valeur de (0.842 g/cm³) inférieure à celle du sable de dune (SD) et du sable de déchets de céramique. Cette faible valeur peut être expliquée par la légèreté et la forte porosité des particules de plâtre ce qui rend le matériau moins compact que ces deux sables.
- La masse volumique absolue du sable de déchet de plâtre est de 2.58 g/cm³ légèrement inférieure à celle du sable de dune 2.63 g/cm³. Cette différence montre que le sable de plâtre est moins dense que le sable de dune. L'utilisation du sable de déchet de plâtre comme matériau de substitution peut ainsi contribuer à la réduction de la densité du béton.
- Le sable de déchet de plâtre affiche une valeur l'équivalent de sable (ES) de 43.47% nettement inférieure à celle du sable de dune et de céramique. Cette différence traduit une présence plus importante de particules fines et d'impuretés dans le sable de plâtre.
- La capacité d'absorption d'eau du sable de déchet de plâtre est élevée (8.72%) comparativement à celle du sable de dune et de céramique. Cette forte absorption est due à la structure très poreuse des grains de plâtre.
- Le module de finesse du sable du plâtre est de (4.32%) supérieur à celui du sable de dune et comparable à celui du sable de déchet de céramique. Cette valeur indique un sable grossier.
- Teneur en fines est de (13%), ce qui indique une quantité relativement élevée de particules fines. Cette valeur peut améliorer la compacité du mélange en comblant les vides entre les grains de sable.

b- Caractéristique chimique

Les caractéristiques chimiques de sable de déchet de plâtre sont données par le tableau 3.11

Tableau 3.11 : Caractéristiques chimiques de de sable de déchet de plâtre

Composant	%	Composant	%
SiO ₂	9.71	MgO	0.80
Al ₂ O ₃	3.49	SO ₃	44.05
Fe ₂ O ₃	4.89	K ₂ O	0.51
CaO	36.26	Na ₂ O	0.70

Commentaires :

- SO₃ très élevé (44.05%) : C'est la caractéristique dominante. Ce taux de sulfate de calcium (gypse/plâtre) est typique d'un sable gypseux ou d'un matériau riche en gypse (CaSO₄·2H₂O). Le gypse est utilisé comme régulateur de prise dans la fabrication du ciment Portland.
- CaO élevé (36.26%) : Conséquence directe de la présence de gypse (CaSO₄ contient du CaO).
- SiO₂ faible (9.71%) : Confirme qu'il ne s'agit pas d'un sable siliceux classique.
- Faible teneur en alcalins (Na₂O + K₂O ≈ 1,21%) indique que le sable de déchet plâtre contient une quantité limitée de composés alcalins, ce qui peut réduire les risques de réactions alcalines indésirables dans le béton.

c- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sable recyclé de déchet de plâtre est illustrée sur le tableau 3.12:

Tableau 3.12 : Analyse granulométrique du sable de déchet de plâtre (SP)

Ouverture(mm)	Masse des refus (g)	Refus cumulé (%)	tamisât cumulé (%)
5.6	0	0	100
4.00	88	29.33	86
2.00	152	50.66	64
1.00	206	68.66	53
0.50	256	92	42
0.25	278	92.66	37
0.125	226	98.66	21
0.063	300	100	13

Commentaires:

L'analyse granulométrique montre que le sable de déchet de plâtre est un sable à dominante grossière et à granulométrie relativement continue. La faible proportion de fines (13 % passant au tamis de 0.063 mm) et la présence de plusieurs classes granulaires favorisent un bon empilement des particules et une compacité satisfaisante, ce qui lui confère un potentiel intéressant comme substitut partiel ou total du sable naturel dans les mortiers et les bétons.

3.3.3.3 Courbe granulométrique global

Les résultats des analyses granulométriques des trois types de sables sont présentés par des courbes granulométriques (figure 3- 1)

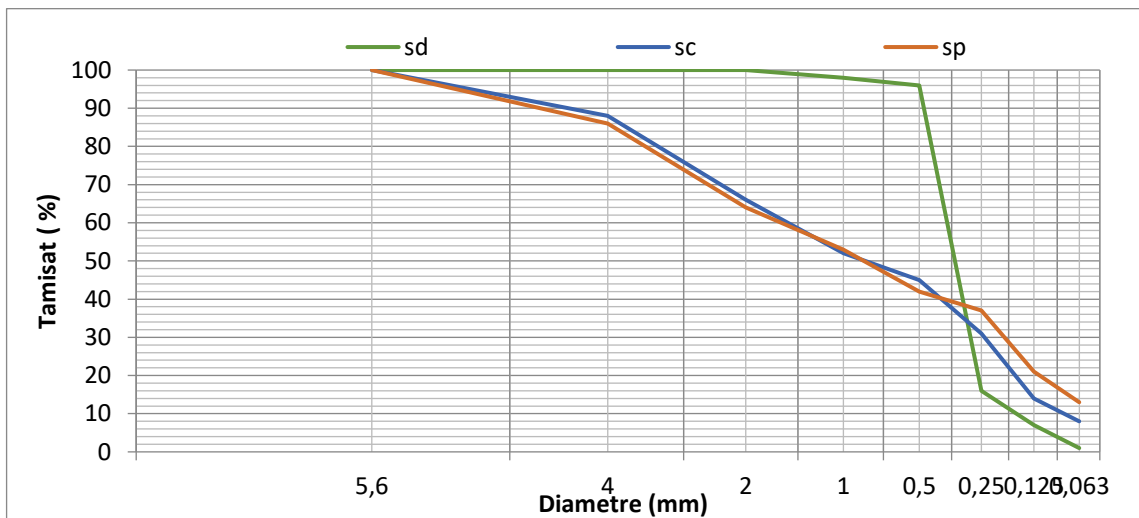


Figure 3-1 : Courbe Granulométrique des trois types de sables.

Commentaires :

La courbe granulométrique des trois sables montre que le sable de dune (SD) est principalement constitué de particules fines, alors que les sables de déchets de céramique (SC) et de plâtre (SP) présentent une granulométrie plus grossière et relativement continue. Les courbes de SC et SP s'étendent sur une large gamme de dimensions granulaires, traduisant une bonne répartition des tailles de grains. Le sable de déchet de plâtre présente une teneur en fines légèrement supérieure à celle du sable de déchet de céramique, tandis que ce dernier est caractérisé par une proportion plus importante de fractions grossières. Cette distribution granulométrique étalée est favorable à un bon empilement granulaire et à une compacité satisfaisante, ce qui confère à ces matériaux un potentiel intéressant comme substituts partiels ou totaux du sable naturel dans les mortiers et les bétons.

3.3.4 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé dans cette étude est le Viscocrete® 665, un super plastifiant à base de polymères poly carboxylates fourni par Sika Algérie.

L'incorporation de cet adjuvant permet d'améliorer les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci en réduisant la quantité d'eau nécessaire au gâchage. Cette réduction du rapport eau/ciment améliore l'ouvrabilité du béton tout en augmentant ses résistances mécaniques et sa durabilité. Par ailleurs, les super plastifiants contribuent au contrôle du temps de prise et à l'optimisation des performances techniques, économiques et environnementales du béton, notamment grâce à une diminution potentielle de la teneur en ciment.



Image 3-6: Adjuvant utilisé.

Le Tableau 3.13 présente les caractéristiques techniques du superplastifiant Viscocrete® 665 utilisé dans cette étude.

Tableau 3.13: Caractéristiques Adjuvant

Propriété	Valeur
Densité	1.085 ± 0.015
Valeur PH	$5 \pm 1,0$
Teneur total en ions Chlorure	$\leq 0,1 \%$
Equivalent Oxyde de Sodium	$\leq 1,0 \%$

3-3-5 Filler de calcaire

Le filler calcaire SFDM CFD15, fourni par l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) de la carrière de Constantine-Est (Algérie), présente une masse volumique absolue de 2.70 g/cm^3 et une surface spécifique Blaine (SSB) de $3900 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ses caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.



Image 3-7: Filler de calcaire Utilise.

Tableau 3.14: composition chimique de calcaire.

Composant	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
Teneur en %	55.94	0.03	0.02	0.04	0.20

3-3-6 L'eau de gâchage:

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de 28C°. L'analyse chimique est représentée dans le (tableau 3-15), les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes **NF P18-404**.

Tableau 3.15 : Analyse chimique de l'eau de gâchage

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
To	28	CO	Turbidité:1,44ntu Eau de bonne qualité chimique
Ph	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	--	

L'échantillon d'eau prélevé de réservoir du laboratoire est conforme pour le gâchage de béton selon NF EN 1008 du 07/2003.

3.3.7 Les fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres métalliques de type Dramix® 3D, commercialisées par la société Bekaert. La photo 3-8 présente le type de fibres employé.

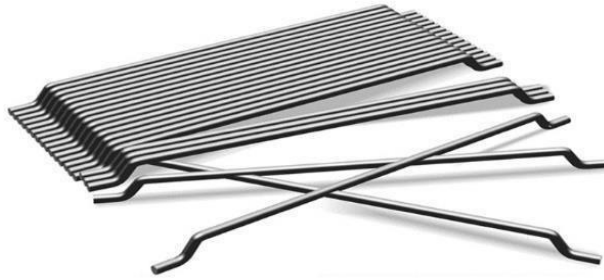


Image 3.8: Les fibres métalliques utilisées.

Les caractéristiques des fibres sont regroupées dans le tableau 3.16

Tableau 3.16 : Caractéristiques des fibres métalliques

Propriété	Valeur
Densité (g/cm ³)	7850
Longueur (mm)	50
Résistance à la traction (N/mm ²)	1.11
Diam.éq.d (mm)	1.05
Elancement	47.5

Commentaires :

On note que les fibres métalliques utilisées présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques compatibles avec une utilisation dans les bétons fibrés. Leur incorporation est susceptible d'améliorer les performances mécaniques du matériau, notamment en traction et en flexion, tout en limitant la propagation des fissures et en augmentant la ductilité du composite cimentaire.

3.4 Méthodes expérimentales de caractérisation des matériaux:

3.4.1 Masse volumique absolue:

Cet essai est régi par la norme NFP18-301; elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.



Image 3-9 : Pycnomètre pour l'essai de la Masse volumique absolue

Mode opératoire:

Généralement deux méthodes sont utilisées pour déterminer la masse volumique absolue:

- Méthode de l'éprouvette graduée.
- Méthode de la mesure au pycnomètre.

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, elle est simple, rapide et utilise le matériel courant du laboratoire.

Cette méthode consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume **V1** d'eau, ensuite peser un échantillon sec **Ms** de granulats (environ 300g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume **V2**, la masse volumique absolue est alors donnée par la formule (3-1) :

$$P_s = \frac{M_s}{(V_1 - V_2)} \quad 3 - 1$$

Avec :

- P_s : Masse volumique absolue.
- M_s : Masse des grains solides.
- V_1 : Volume d'eau.
- V_2 : Volume total (grains +solide).

La masse volumique absolue de nos sables utilisés sont affichés dans les tableaux 3-7 et 3-9.

3.4 .2 Masse volumique apparente:

Cet essai est régi par la norme NFP18 – 301; elle est définie comme étant la masse à l'état naturel du matériau rapporté à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.



Image3.10: Essai Masse volumique apparente.

Mode opératoire:

Cette méthode consiste à remplir un récipient dont le volume V est bien connu, par un échantillon sec de granulats, en prenant soin de bien raser le bord du récipient, peser l'échantillon sec M de granulats, on détermine la masse volumique apparente par la formule (3-2) :

$$P_a = \frac{M}{V} \quad 3 - 2$$

Avec :

- - P_a : Masse volumique apparente.
- - M : Masse totale de l'échantillon.
- - V : Volume totale de l'échantillon
- La masse volumique apparente de nos sables sont mentionnés dans les tableaux 3-7 et 3-9.

• 3.4.3 Coefficient d'absorption d'eau :

- Il est défini par la norme NFP 18-555; cet essai sert à déterminer la porosité interne d'un granulat qui est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Il est donné par la formule (3-3) :

- $A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad 3 - 3$

• Avec:

- A_b : coefficient d'absorption d'eau des grains (%);
- M_s : masse des grains de sable à l'état sec après passage à l'étuve à 105°C;

- M_a : masse des grains après imbibition.



Image 3-11 :Essai Coefficient d'absorption de sable.

Mode opératoire:

Un échantillon représentatif de sable est d'abord séché à l'étuve à une température de 105 ± 5 °C jusqu'à obtention d'une masse constante. Après refroidissement, sa masse sèche (M_s) est déterminée à l'aide d'une balance de précision. L'échantillon est ensuite immergé dans l'eau pendant 24 heures afin d'assurer sa saturation complète. Après immersion, le sable est retiré de l'eau et essuyé soigneusement pour obtenir l'état saturé sec en surface. La masse correspondante (M_a) est alors mesurée. Enfin, le coefficient d'absorption d'eau est calculé à partir de la différence entre la masse saturée sèche en surface et la masse sèche, rapportée à la masse sèche du sable.

3.4.4 Equivalent de sable:

Cet essai est régi par la norme NFP18-598 utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons ou des mortiers, en déterminant la proportion des impuretés argileuses contenu dans le sable.

a) Principe de l'essai:

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier, il consiste à laver l'échantillon avec une solution lavante permettant de séparer les éléments fins argileux et en provoque la floculation, selon un processus normalisé, puis on laisse reposer le tout, pendant 20 minutes, ensuite on mesure les hauteurs h_1 , h_2 .

Enfin nous déduisons l'équivalent de sable qui, par convention est :

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

La formule: 3 – 4

- E_s : Coefficient d'équivalent de sable .
- h_1 : Hauteur de sable (propre+ éléments argileux) .
- h_2 : Hauteur (sable propre seulement) .



Image3-12: Essai équivalents de sables.

3.4.5 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer les pourcentages pondérés respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NFP 18-560



Image3-13: Essai analyse granulométrique.

Le tableau (3.6) , présente le résultat moyen d'analyse granulométrique du sable de dune utilisé dans notre étude.

3.4.6 Module de finesse:

La finesse d'un sable est estimée conventionnellement par une grandeur appelée module. Ce dernier est égal au $(1/100)$ ème de la somme des refus. Exprimés en pourcentage des différents tamis de la série suivante : (0.125 - 0.250 – 0.5 – 1–2– 4 mm)

Un bon sable à béton ou mortier doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins à très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau.

$$M_f = \frac{\sum R_c}{100} \text{ La formule: } 3 - 5$$

Rc: refus cumulé en (%) sous les tamis (0.125 ,0.250 ,0.5 ,1 ,2 , 4) .

3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter et de caractériser l'ensemble des matériaux retenus dans le cadre de cette étude, en mettant en évidence leurs principales propriétés physiques, chimiques et granulométriques ainsi que les méthodes expérimentales utilisées pour leur évaluation.

Les résultats obtenus montrent que :

- Le sable de dune est un matériau siliceux fin, propre et adapté à la formulation des bétons de sable.
- Les sables recyclés présentent des caractéristiques distinctes : le sable de déchet de céramique se distingue par sa forte teneur en silice et en alumine, son excellente propreté et son potentiel pouzzolanique élevé, tandis que le sable de déchet de plâtre est principalement constitué de composés sulfatés et calciques, avec une forte capacité d'absorption d'eau et un potentiel pouzzolanique limité.
- Les analyses granulométriques révèlent également une texture plus grossière des sables recyclés par rapport au sable de dune, ce qui est susceptible d'influencer le comportement des mélanges à l'état frais et à l'état durci.
- Les caractéristiques du ciment, du filler calcaire, de l'adjuvant, de l'eau de gâchage et des fibres métalliques confirment leur conformité aux exigences techniques pour leur utilisation dans les formulations étudiées.

L'ensemble de ces résultats constitue une base scientifique solide pour la conception des mélanges expérimentaux et pour l'interprétation des performances mécaniques et de durabilité qui seront analysées dans les chapitres suivants

CHAPITRE 4

PROGRAMME EXPERIMENTAL ET METHODOLOGIE DES ESSAIS.

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du programme expérimental et de la méthodologie adoptée pour la formulation et la caractérisation des différentes variantes de bétons de sable étudiées. Les matériaux utilisés sont d'abord décrits, suivis de la présentation des formulations retenues et des procédures de fabrication des bétons. Enfin, le protocole expérimental mis en œuvre pour la réalisation des différents essais sur les éprouvettes confectionnées est exposé en détail.

4.2 Programme expérimental

Cette étude a pour objectif d'examiner l'influence de l'incorporation de fibres métalliques ainsi que de deux types de sables recyclés, utilisés séparément en substitution partielle du sable naturel, sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du béton de sable ordinaire.

Pour se faire, des fibres métalliques de type « Dramix » ont été incorporées à un béton de sable ordinaire formulé selon la méthode **Sablocrete**, à un dosage correspondant à **0,25 % du volume total**. Le sable dunaire a ensuite été partiellement remplacé, en volume, par du sable recyclé provenant de déchets de plâtre à des taux de **10 et 15 %**, ainsi que par du sable recyclé issu de déchets de céramique à des taux de **5%,10% et 15 %**. Les performances des différents bétons élaborés ont été évaluées et comparées à celles d'un béton de référence constitué uniquement de sable dunaire et exempt de fibres métalliques.

Sur le plan technique, cette étude vise à identifier les taux de substitution optimaux permettant d'obtenir des performances mécaniques et la durabilité supérieures ou équivalentes à ceux du béton de sable de référence. D'un point de vue environnemental, cette démarche a pour objectifs de :

- Valoriser les déchets de plâtre et de céramique en les intégrant dans la formulation des bétons.
- Réduire l'accumulation de ces déchets dans les centres d'enfouissement et les décharges .
- Limiter l'exploitation des ressources naturelles en diminuant la consommation de sable dunaire .
- Contribuer à la préservation de l'environnement grâce à l'utilisation de matériaux recyclés
- Promouvoir une approche d'économie circulaire dans le secteur de la construction.

4.3 Formulation du béton de sable

L'approche de formulation qui a été utilisée est empirique, basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant uniquement sur le respect de certains des critères recommandés par la méthode théorique

de SABLOCRETE (1994). Ces critères se résument en :

- ✓ Un rapport E/L compris entre 0.60 et 0.7.
- ✓ Un dosage en ciment très élevé $> 400 \text{ Kg/m}^3$.
- ✓ Les dosages en fines d'addition entre 70 et 220 Kg/m^3 .
- ✓ Le volume des vides compris entre 3 et 5%.

4.4.3 Formulation du béton de sable témoin BS(100%SD):

- ✓ **Détermination du dosage en ciment:** la masse du ciment est fixée à 420 Kg/m^3
- ✓ **Détermination du dosage en fines :** pris égale à 200 Kg/m^3
- ✓ **Détermination du dosage en eau :** Le rapport E/L est maintenu constant avec une valeur égale à 0,6.
- ✓ **Détermination du dosage en superplastifiant :** la masse égale à 1.2% du poids de ciment.
- ✓ **Détermination du volume des vides [vides]:** le volume des vides est égal 30 litres.
- ✓ **Détermination du dosage en sable:** D'après la formule exposée par la méthode Sablocrete le dosage volumique du sable égale à : $[\text{Sable}] = 1000 - [\text{ciment}] - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] - [\text{superplastifiant}] \text{ l/m}^3$. Après l'ajustement de la formulation, on a trouvé un dosage en sable égale à 1338 kg/m^3 .

Tableau4-1: Composition d'un 1 m^3 de béton témoin (BS)

Designation	Quantité(Kg/m^3)
Sable	1338
Ciment	420
Calcaire	200
Adjuvant	5.04
Eau	252

Tableau4-2: Composition d'un 1 m^3 de béton témoin (BSF)

Designation	Quantité(Kg/m^3)
Sable	1331.48
Ciment	420
Calcaire	200
Adjuvant	5.04
Eau	252
Fibre	19.85

Chapitre 4 : programme expérimentale et méthodologie des essais

4.4.4 Notation des mélanges confectionnés:

La notation des mélanges effectués est comme indiquée dans le tableau4-2:

Tableau4-3: Notation des mélanges

BST	Béton de sable témoin à base de 100% de sable dunaire et sans fibre
BSF	Béton de sable témoin + ajout de fibres à un taux de 0.25% du volume total
BSFP10	Béton de sable fibré contenant 90% de sable dunaire et 10% de sable de plâtre
BSFP15	Béton de sable fibré contenant 85% de sable dunaire et 15% de sable de plâtre
BSFC5	Béton de sable fibré contenant 95% de sable dunaire et 5% de sable de céramique
BSFC10	Béton de sable fibré contenant 90% de sable dunaire et 10% de sable de céramique
BSFC15	Béton de sable fibré contenant 85% de sable dunaire et 15% de sable de céramique

4.4.5 Compositions des different mélanges

Le Tableau4-3 montre les différentes compositions réalisées (nous citons juste les matériaux dont la quantité est variable dans chaque variante).

Tableau4-.4:Compositions des mélanges retenus

Mélange		SD(kg/m ³)	SP(kg/m ³)	SC (kg/m ³)
BT	BS	1338.00	0	0
	BSF 0.25	1331.48	0	0
BSFP10		1198.33	135.70	0
BSFP15		1131.75	203.55	0
BSFC5		1264.90	0	61.98
BSFC10		1198.33	0	123.96
BSFC15		1131.75	0	185.95

4.3.4 Confection des mélanges retenus:

a/ Malaxage:

Le béton est préparé à l'aide d'un malaxeur planétaire à axe horizontal, d'une capacité de 120 litres. La séquence d'introduction des différents matériaux se déroule comme suit :

- Les sables (sable dunaire et sables issus des deux types de déchets) sont d'abord versés dans le malaxeur, puis homogénéisés pendant environ 2 minutes.
- Le ciment et le filler calcaire sont ensuite ajoutés à sec, et le malaxage se poursuit pendant 1 minute.
- L'eau et la moitié du superplastifiant sont incorporés, puis le mélange est malaxé pendant 1 minute.
- Enfin, le reste du superplastifiant est ajouté et le malaxage se poursuit pendant 2 minutes.

Chapitre 4 : programme expérimentale et méthodologie des essais

- Les essais à l'état frais sont réalisés immédiatement après le malaxage.



Image4-1: Malaxage.

b/ Corps d'épreuves :

Les corps d'épreuves sont été choisis selon les essais à réaliser de diverses formes et dimensions en conformité avec les normes en vigueur.

Les résultats, obtenus sur deux éprouvettes de chaque composition de même gâchée, du béton de sable, sont exprimés sous la moyenne de deux valeurs mesurées.

- ✓ Des cubes ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 : pour la résistance à la compression à 7 et 28 jours .
- ✓ Des prismes ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 : pour la traction par flexion à 7 et 28 jours .
- ✓ Des cubes ($7 \times 7 \times 7$) cm^3 : pour l'essai de résistance à l'attaques chimique.



Image 4-2: Eprouvettes avant et après le démoulage .

c/ Conservation :

Avant le démoulage toutes les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans les conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés, nous sélectionnons chaque éprouvette avec un crayon résistant à l'eau et introduit les éprouvettes dans un bain d'eau a température $22^\circ \pm 2^\circ\text{C}$.



Image4-3:Conservation des éprouvettes dans un bain d'eau.

4.5 Méthodologie des essais

4.5.1 Essais effectués sur le béton à l'état frais

Afin de caractériser le comportement de bétons de sable à l'état frais, nous avons mené les essais suivants:

a/Affaissement au cône d'Abrams:

Cet essai est réalisé selon les prescriptions de la norme NF EN12350-2. Il s'agit du test de mesure de consistance le plus utilisé et le plus reconnu au niveau international. Le moule employé pour cet essai est un cône tronqué de 30 cm de hauteur.

Posé sur une surface plane, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches de volume équivalent. Chaque couche est compactée à l'aide de 25 coups d'une tige métallique normalisée de 1.6 cm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie. Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être lissé en utilisant la tige et en effectuant des mouvements de va-et-vient. Durant ces opérations, le cône doit rester fixe sur la base plane : des écrous de serrage, situés à la base du cône, permettent de le maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement. La valeur de l'affaissement est exprimée en cm.



Image4-4:Essai d'affaissement.

b/La densité frais:

La densité apparente du béton frais ou la masse volumique est calculée conforme à la norme NF EN12350-6, en pesant un moule vide dont le volume est connu. La formule de calcul est donnée comme Suit:

$$D = \frac{(M - M_0)}{V} \quad [\text{g/cm}^3] \quad \text{Formule 4-1}$$

D: La masse volumique du béton (g/cm^3).

M: La masse du moule rempli (g) .

M₀: La masse du moule vide (g)

V: Volume du moule (cm^3).



Image 4-5: Essai de la densité frais.

c/ Air occlus

La teneur en air occlus est mesurée à l'aide d'un aéromètre à béton, de 1 litre. Après le malaxage des constituants de béton et suivant la norme NF EN12350-7, on remplit la cuve d'aéromètre avec le béton frais. La partie supérieure reste fixée, on applique une pression à l'aide de la pompe manuelle jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. A ce moment, on ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres, le mortier se comprime et le manomètre intégré dans l'aéromètre indique directement le pourcentage de l'air occlus.



Image 4-6: Mesure de l' air occlus .

4.5.2 Essais à l'état durci:

a/ Essai de compression:

Conformément à la norme NF EN 12390-3, cet essai consiste à soumettre un échantillon de béton à une charge de compression axiale croissante jusqu'à rupture. Les éprouvettes utilisées sont des cubes de $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$.

$$F_c = \frac{P}{S} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{Formule : 4-2}$$

- F_c : résistance à la compression $[\text{N/mm}^2]$.
- P : charge maximale appliquée lors de l'essai $[\text{N}]$.
- S : surface de l'échantillon sollicitée $[\text{mm}^2]$.



Image 4-7: Essai de compression.

b/ Résistance à la traction par flexion :

- L'essai mécanique en traction par flexion (3 points) (NF EN 12390-5) est établi à l'aide d'un dispositif à rouleau utilisé en flexion comportant deux appuis à rouleau sur lesquels reposent l'éprouvette prismatique et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée.

L'appareil utilisé est une machine asservie en contraintes. La résistance à la traction par flexion a été évaluée avec une vitesse d'application du chargement de 0.1 MPa/s .

$$R_t = \frac{3}{2} \frac{F \times L}{B^3} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{Formule : 4-3}$$

Avec :

- R_t : la résistance à la flexion en newtons par millimètre carré.
- B : le côté de la section carrée du prisme en millimètre.
- F : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en newtons.
- L : Distance entre les appuis (mm).

4.4..3 Essais de durabilité

a/ Essai d'absorption par immersion

L'absorption par immersion selon la norme NBN EN 1015-18 est réalisée sur éprouvette prismatique

(7×7×28) cm³ de béton complètement immergé dans de l'eau à 20°C pendant 24 heures, jusqu'à ce que le matériau soit complètement saturé, Puis dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante, Retirer et peser les échantillons.

Le coefficient d'absorption par immersion (A_b) est évalué à partir de la moyenne des résultats obtenus sur plusieurs échantillons prélevés de la même éprouvette. Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$A_b = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Formule : 4-4}$$

Avec :

- A_b : coefficient d'absorption par immersion [%].
- M_s : Masse de l'éprouvette sèche [g].
- M_h : Masse de l'éprouvette humide [g].



Image 4.8 : Essai d'absorption par immersion.

b/ Essai d'absorption par capillarité

L'essai d'absorption capillaire consiste à mesurer la quantité d'eau absorbée par une éprouvette de béton de sable au cours du temps. Après démoulage, les éprouvettes prismatiques de dimensions 7 × 7 × 28 cm sont conservées dans l'eau à une température de 20 ± 2 °C jusqu'à l'âge de 28 jours, conformément à la norme NF EN 480-5. Avant les mesures d'absorptivité, les échantillons sont préconditionnés dans une étuve à 105 ± 2 °C jusqu'à obtention d'une masse constante, c'est-à-dire lorsque la variation de masse entre deux pesées successives espacées de 24 heures est inférieure à 0.1 %. Après refroidissement à température ambiante, les éprouvettes sont placées dans un récipient de manière à mettre une seule face en contact avec une lame d'eau de 3 mm d'épaisseur. Afin d'assurer un transfert unidirectionnel de l'eau par capillarité et d'éviter toute évaporation ou absorption latérale, les faces latérales sont soigneusement

Chapitre 4 : programme expérimentale et méthodologie des essais

imperméabilisées à l'aide d'un film plastique ou d'un papier aluminium autocollant. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives réalisées à intervalles de temps réguliers. L'évolution de l'eau absorbée est ensuite représentée graphiquement en fonction de la racine carrée du temps ($\sqrt{t}$), ce qui permet de caractériser le comportement capillaire du béton de sable.

$$C = \frac{(m_i - m_d) \times 100}{A \times \sqrt{t}} \quad \text{Formule 4-5}$$

Avec:

C: coefficient de capillarité [$\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$].

m_i : masse de l'éprouvette au temps i [g].

m_d : masse de l'éprouvette sèche [g].

A : surface de la base en contact avec l'eau [cm^2].

t : temps d'immersion [min].



Image 4.9 : Essai absorption par capillarité .

c/ Essai des attaques chimiques [ASTMC267-97]

La mesure de la résistance face aux attaques chimiques par les acides et les bases est effectuée sur des éprouvettes cubique ($7 \times 7 \times 7$) cm.

Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer M_1 , puis elles sont immergées dans les différentes solutions citées ci-dessous et renouvelées chaque 14 jours (Selon la valeur du PH) :

- 5% Acide chlorhydrique (HCl).
- 5% Acide sulfurique (H_2SO_4).

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions, est évaluée par leur perte de masse selon la norme ASTM C267-97, les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau puis laissées sécher à la température ambiante pendant 30 minutes. Ensuite, on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M_2 . Les mesures sont effectuées après 1, 7, 14, 21, 28, 56, 90 jours après l'immersion. La résistance chimique est évaluée par la mesure de

la variation de masse del'éprouvette:

$$\text{Perte de masse} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100[\%] \quad \text{Formule : 4-6}$$

Avec :

- M_1 : masse de l'éprouvette avant l'immersion [g]
- M_2 : masse de l'éprouvette après l'immersion [g]



Image 4.10 : Essai attaque des solutions chimiques.

4.5 Conclusion

La formulation des mélanges et la rigueur des protocoles expérimentaux mis en œuvre constituent des facteurs essentiels pour l'interprétation des résultats obtenus, ainsi que pour la compréhension approfondie de l'influence des paramètres étudiés sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

CHAPITRE 5

RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur les différents bétons élaborés, dans le but d'évaluer l'influence de l'incorporation de deux sables recyclés issus des déchets de plâtre et de céramique sur les performances du béton, en comparaison avec le béton témoin. L'étude porte à la fois sur les propriétés à l'état frais, telles que l'ouvrabilité, la masse volumique et la teneur en air occlus, et sur les propriétés à l'état durci, notamment les performances mécaniques, la durabilité et la résistance aux attaques acides.

5.2 Propriétés à l'état frais

5.2.1 Masse volumique

Les résultats relatifs à la masse volumique à l'état frais, illustrés dans la figure 5.1 mettent en évidence les variations observées en fonction des différentes formulations de béton étudiée.

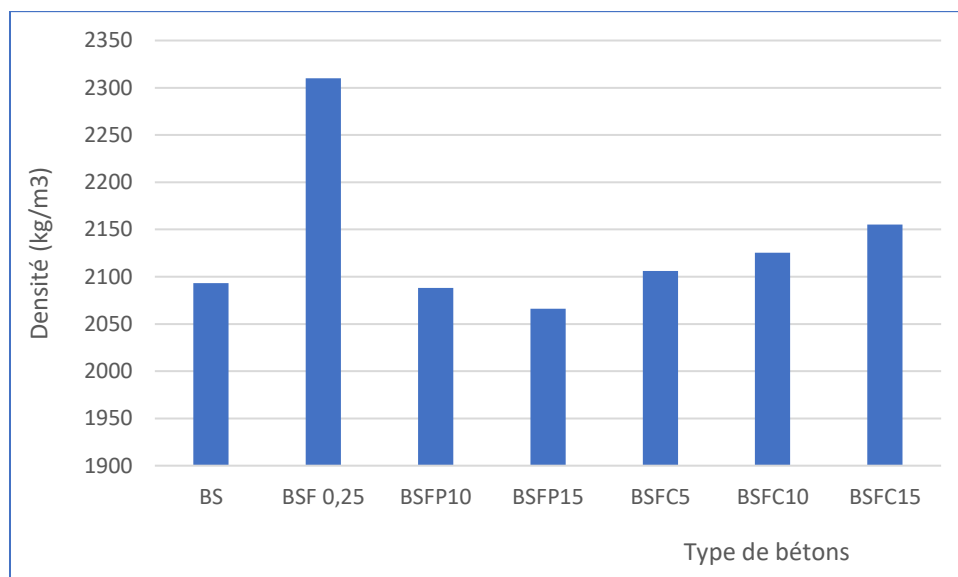


Figure 5-1 : Evolution de la densité des bétons testés.

L'analyse des résultats montre que le béton de sable de référence (BS) présente une densité de 2093.33 kg/m³. L'ajout de 0.25 % de fibres entraîne une augmentation significative de la densité, qui atteint 2310 kg/m³, soit une hausse d'environ 10.3 % par rapport au béton de référence. Cette augmentation peut être attribuée à l'effet de confinement apporté par les fibres, qui favorisent une meilleure compacité du matériau et limitent la formation de vides au sein de la matrice cimentaire.

En revanche, l'incorporation du sable recyclé de déchet de plâtre entraîne une diminution progressive de la densité. Celle-ci passe à 2088 kg/m³ pour la formulation BSFP10 puis à 2066 kg/m³ pour BSFP15. Comparativement au béton fibré sans déchet (BSF 0.25), les diminutions atteignent respectivement 9.6 % et 10.6 %.

Cette réduction de la densité s'explique principalement par la nature du sable recyclé de plâtre, caractérisé par une masse volumique plus faible et une porosité plus élevée que celle du sable naturel. L'introduction de ce matériau léger dans la formulation conduit donc à un allègement progressif du béton. De plus, la forte capacité d'absorption d'eau des particules de plâtre peut favoriser la formation de microvides après durcissement, ce qui contribue également à la diminution de la densité apparente.

Malgré cette baisse, les densités obtenues restent supérieures à 2000 kg/m³, ce qui permet de classer ces matériaux dans la catégorie des bétons de densité normale. Les résultats montrent ainsi que l'utilisation du sable recyclé de déchet de plâtre conduit à la production de bétons légèrement plus légers tout en restant compatibles avec les applications courantes du génie civil.

L'incorporation du sable recyclé de déchet de céramique entraîne ensuite une augmentation progressive de la densité des bétons, qui passe de 2106 kg/m³ pour BSFC5 à 2125.33 kg/m³ pour BSFC10, puis à 2155.33 kg/m³ pour BSFC15. Par rapport au béton de référence, les augmentations sont respectivement de 0.6 %, 1.5 % et 3.0 %.

Cette évolution peut être attribuée aux caractéristiques physiques du sable de déchet de céramique. En effet, les particules céramiques sont généralement plus denses, plus dures et moins poreuses que les granulats issus du plâtre. Leur incorporation favorise un meilleur remplissage des vides au sein de la matrice cimentaire et contribue ainsi à l'amélioration de la compacité du béton. De plus, la faible absorption d'eau du sable céramique permet de conserver une quantité suffisante d'eau libre pour assurer une bonne hydratation du ciment et limiter la formation de vides internes.

L'augmentation progressive de la densité avec le taux de substitution indique également que le sable recyclé de céramique s'intègre efficacement dans la structure granulaire du béton. Les particules fines issues du concassage peuvent exercer un effet de filler, en comblant les espaces entre les grains de sable et les produits d'hydratation, ce qui améliore davantage la compacité du matériau.

5.2.2Affaissement

Les résultats de l'ouvrabilité des différents bétons, évalués à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, sont présentés dans la figure 5.2. Ils permettent d'apprécier la consistance des mélanges en fonction des compositions utilisées.

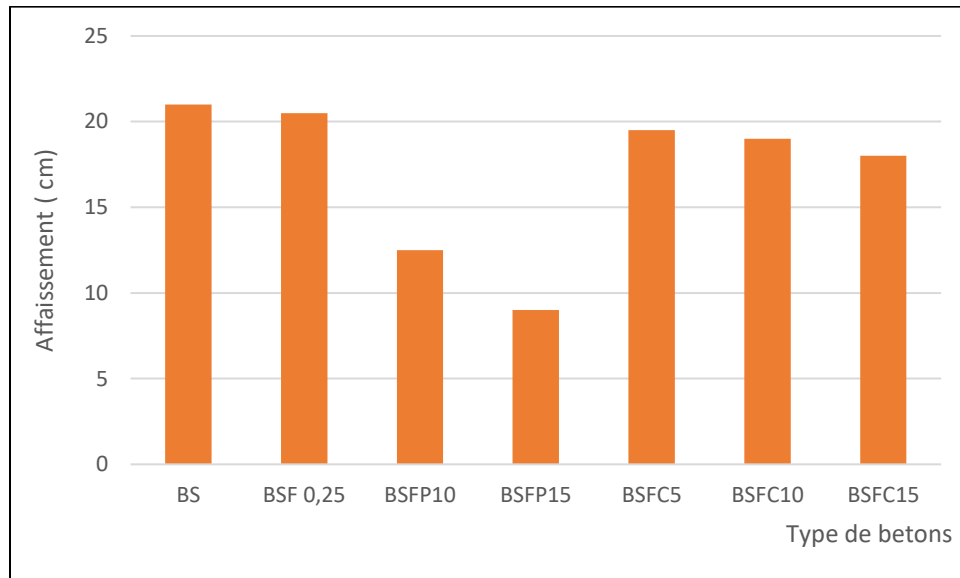


Figure 5-2: Evolution de l'affaissement des bétons testés.

On observe que le béton de sable de référence (BS) présente un affaissement de 21 cm, traduisant une consistance très fluide. L'incorporation de 0.25 % de fibres (BSF 0.25) entraîne une légère diminution de l'affaissement à 20.5 cm, soit une réduction d'environ 2.4 %. Cette faible variation indique que le dosage en fibres utilisé n'affecte que modérément l'ouvrabilité du mélange.

En revanche, l'introduction du sable recyclé de déchet de plâtre provoque une baisse importante de l'affaissement. Celui-ci passe à 12.5 cm pour la formulation BSFP10 et à 9 cm pour BSFP15, correspondant respectivement à des diminutions de 40.5 % et 57.1 % par rapport au béton de référence. Cette perte d'ouvrabilité peut être attribuée à la forte porosité et à la capacité d'absorption d'eau du sable de plâtre recyclé, qui réduit la quantité d'eau libre disponible pour la lubrification du mélange. De plus, la présence d'une proportion plus élevée de particules fines et la forme irrégulière des grains augmentent les frottements internes entre les constituants du béton.

À l'inverse, l'incorporation du sable recyclé de déchet de céramique conduit ensuite à une diminution progressive de l'affaissement. Les valeurs obtenues sont respectivement de 19.5 cm,

19 cm et 18 cm pour les formulations BSFC5, BSFC10 et BSFC15, correspondant à des réductions de l'ordre de 7.1 %, 9.5 % et 14.3 % par rapport au béton de référence.

Cette baisse modérée de l'ouvrabilité peut être attribuée à la texture rugueuse et à la forme anguleuse des particules de céramique recyclée, qui augmentent les frottements internes entre les constituants du mélange et réduisent sa mobilité. De plus, la présence de fines particules issues du concassage des déchets céramiques accroît la surface spécifique du granulat, entraînant une demande en eau légèrement plus élevée. Toutefois, l'effet reste limité en raison de la faible absorption d'eau du sable de céramique comparativement au sable recyclé de déchet de plâtre.

Ces résultats montrent que le sable recyclé de déchet de céramique est plus favorable du point de vue rhéologique et permet d'atteindre des taux de substitution plus élevés sans compromettre significativement les conditions de mise en œuvre. Le sable recyclé de déchet de plâtre, bien qu'intéressant pour la valorisation des déchets, nécessite en revanche des ajustements de formulation (augmentation de l'eau de gâchage, préhumidification des granulats ou utilisation de superplastifiants) afin de compenser sa forte demande en eau et de maintenir une ouvrabilité satisfaisante.

5.2.3 Air occlus

Les résultats des mesures d'air occlus, illustrés dans la figure 5.3, permettent d'évaluer l'évolution de la porosité des différentes compositions de béton testées.

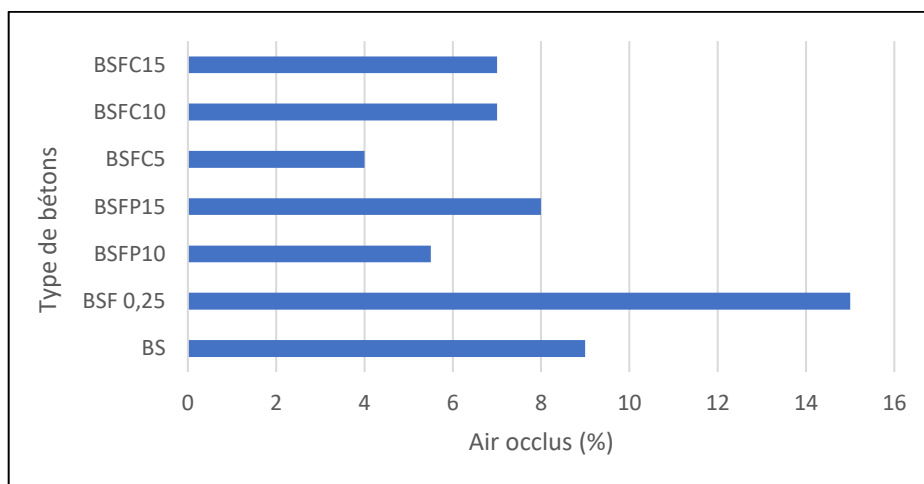


Figure 5-3 : Evolution de l'air occlus des bétons testés.

L'analyse des résultats montre que le béton de sable de référence (BS) présente une teneur en air occlus de 9 %, valeur caractéristique d'un béton de sable relativement riche en fines. L'ajout

de 0.25 % de fibres entraîne une augmentation importante de l'air occlus, qui atteint 15 %, soit une hausse d'environ 67 % par rapport au béton de référence. Cette augmentation peut être attribuée à la présence des fibres qui favorisent le piégeage des bulles d'air au cours du malaxage et limitent leur évacuation, en raison de l'augmentation de la cohésion du mélange.

L'incorporation du sable recyclé de déchet de plâtre modifie ensuite ce comportement. Pour la formulation BSFP10, la teneur en air occlus chute à 5.5 %, soit une réduction de près de 63 % par rapport au béton fibré BSF 0.25. Cette diminution peut être expliquée par la forte capacité d'absorption d'eau du sable de plâtre, qui modifie la rhéologie du mélange et favorise un meilleur remplissage des vides par la pâte cimentaire. Les particules fines du déchet de plâtre peuvent également contribuer à combler une partie des espaces intergranulaires, réduisant ainsi le volume d'air emprisonné.

Lorsque le taux de substitution augmente à 15 % (BSFP15), l'air occlus remonte à 8 %, tout en restant inférieur à celui du béton de référence et nettement inférieur à celui du béton fibré sans sable recyclé. Cette légère augmentation peut être liée à la porosité intrinsèque plus importante introduite par une quantité plus élevée de sable de plâtre recyclé. À ce dosage, l'effet de la structure poreuse du déchet commence à compenser partiellement l'effet de remplissage observé à 10 % de substitution.

L'incorporation du sable recyclé de déchet de céramique entraîne ensuite une diminution importante de l'air occlus. La formulation BSFC5 présente la plus faible teneur en air avec seulement 4 %, soit une réduction d'environ 73 % par rapport au béton fibré BSF 0.25 et de 55 % par rapport au béton de référence. Cette diminution traduit une amélioration notable de la compacité du matériau.

Lorsque le taux de substitution augmente à 10 % puis à 15 %, la teneur en air occlus s'établit à 7 % pour les deux formulations. Bien qu'une légère augmentation soit observée par rapport à BSFC5, ces valeurs demeurent inférieures à celles du béton de référence et nettement inférieures à celles du béton fibré sans sable recyclé. Cela indique que l'introduction du sable de céramique contribue globalement à limiter la quantité d'air emprisonnée dans la matrice cimentaire.

Cette réduction de l'air occlus peut être expliquée par les caractéristiques physiques du sable de céramique recyclé. Les particules céramiques concassées possèdent généralement une bonne rigidité et une faible porosité. De plus, les fines issues du broyage exercent un effet de filler qui améliore le remplissage des vides entre les grains de sable et les particules de ciment. Cette

meilleure compacité réduit les espaces susceptibles de retenir l'air et favorise une structure interne plus dense.

5.3 Propriétés à l'état durci

5.3.1 Résistance en compression

La résistance à la compression est mesurée selon la norme NF EN 196-1, à 7 et 28 jours. Cependant, l'essai est réalisé sur des cubiques normalisés de dimensions 10×10×10 cm.

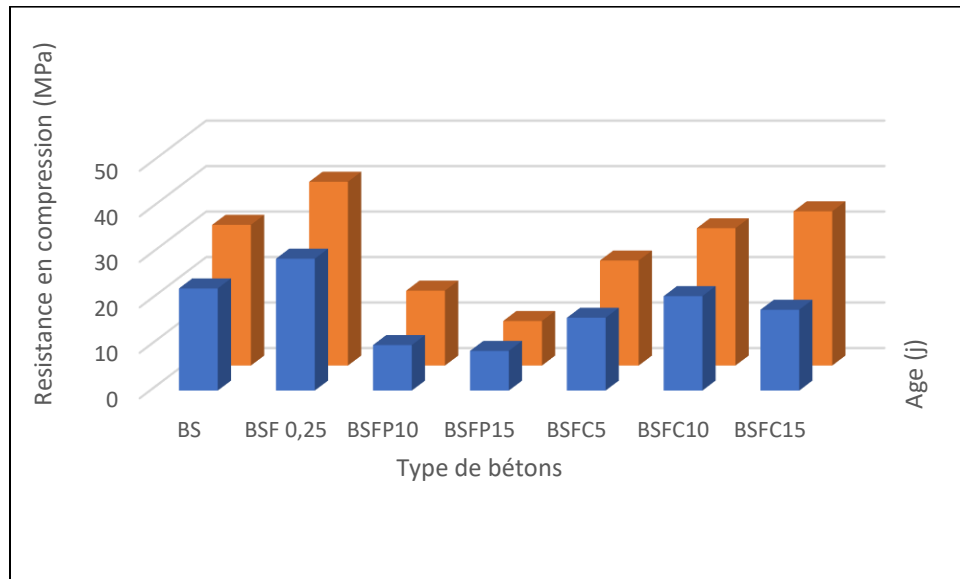


Figure 5-4 : Evolution de Résistance à la compression des bétons testés.

D'après cette figure, on observe que la résistance à la compression augmente entre 7 et 28 jours pour tous les mélanges, ce qui traduit la poursuite de l'hydratation du ciment et la densification progressive de la matrice cimentaire.

Le béton de sable de référence (BS) développe une résistance à la compression de 22.45 MPa à 7 jours et de 30.93 MPa à 28 jours. L'ajout de 0.25 % de fibres améliore significativement les performances mécaniques, la résistance atteignant 29 MPa à 7 jours et 40.40 MPa à 28 jours. Cette amélioration, de l'ordre de 29 % à 7 jours et 31 % à 28 jours, s'explique par la capacité des fibres à limiter l'initiation et la propagation des microfissures, ce qui renforce la cohésion de la matrice cimentaire.

L'incorporation du sable recyclé de déchet de plâtre entraîne en revanche une diminution très importante des résistances. La formulation BSFP10 présente une résistance de 10.01 MPa à 7 jours et de 16.47 MPa à 28 jours, soit une baisse respective de 65 % et 59 % par rapport au béton fibré de référence (BSF 0.25). Lorsque le taux de substitution est porté à 15 %, les

résistances chutent davantage pour atteindre seulement 8.72 MPa à 7 jours et 9.80 MPa à 28 jours. Cette diminution est principalement liée aux caractéristiques du sable recyclé de plâtre. En effet, ce matériau présente une porosité élevée, une faible densité et une résistance intrinsèque inférieure à celle du sable naturel. Sa forte capacité d'absorption d'eau réduit la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment et favorise la formation d'une matrice plus poreuse. De plus, la faible adhérence entre les particules de plâtre recyclé et la pâte cimentaire crée des zones de faiblesse qui affectent la capacité du béton à résister aux efforts de compression.

Ces résultats sont cohérents avec les observations précédentes concernant la densité et l'ouvrabilité. Les bétons contenant du sable de plâtre présentent les densités les plus faibles et une structure plus poreuse, ce qui se traduit directement par une réduction des performances mécaniques.

L'incorporation du sable recyclé de déchet de céramique entraîne une diminution des résistances à jeune âge par rapport au béton fibré de référence. Les résistances à 7 jours varient entre 16.02 MPa et 20.77 MPa, soit des réductions comprises entre 28 % et 45 % par rapport à BSF 0.25. Cette baisse initiale peut être liée à une hydratation moins avancée et à une adhérence encore incomplète entre la pâte cimentaire et les particules de céramique recyclée.

À 28 jours, les résultats montrent cependant une évolution plus favorable. La résistance passe de 23.09 MPa pour BSFC5 à 30.19 MPa pour BSFC10, puis atteint 33.92 MPa pour BSFC15. Cette progression indique que les bétons contenant du sable de céramique continuent à développer leurs performances mécaniques au cours du temps. La formulation BSFC15 présente même une résistance supérieure à celle du béton de référence BS (33.92 MPa contre 30.93 MPa), bien qu'elle demeure inférieure à celle du béton fibré sans substitution (40.40 MPa).

L'amélioration observée avec l'augmentation du taux de substitution peut être attribuée aux propriétés du sable recyclé de céramique. Les particules céramiques sont généralement dures, peu poreuses et possèdent une bonne stabilité mécanique. De plus, les fines issues du concassage peuvent exercer un effet filler en comblant les vides de la matrice cimentaire, ce qui améliore la compacité du béton et favorise le développement des résistances à long terme. Cette interprétation est en accord avec les résultats de densité et d'air occlus, qui ont montré une augmentation de la densité et une diminution de la quantité d'air emprisonné dans les bétons contenant du sable de céramique.

5.2.2 Résistance en traction par flexion

La figure 5.5 montre l'évolution de la résistance à la traction par flexion des diverses compositions de béton étudiées.

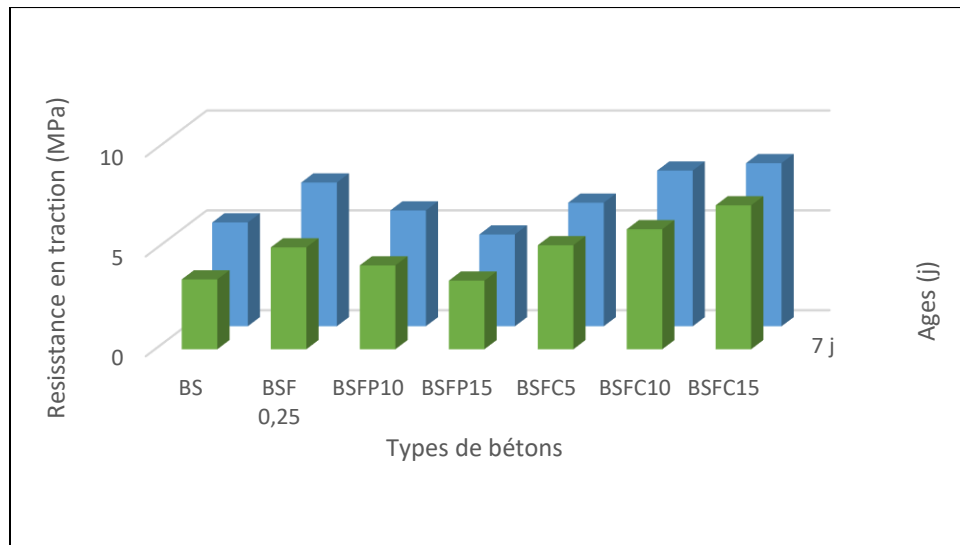


Figure 5-5 : Evolution de la Résistance en Traction par Flexion des Bétons testés.

L'analyse des résultats montre tout d'abord que l'incorporation de 0.25 % de fibres métalliques dans le béton de sable de référence améliore significativement la résistance à la traction par flexion. Le béton BSF 0.25 atteint respectivement 5.1 MPa à 7 jours et 7.2 MPa à 28 jours, contre 3.5 MPa et 5.2 MPa pour le béton témoin BS. Cette amélioration peut être attribuée au rôle des fibres dans le pontage des fissures, limitant leur propagation et augmentant ainsi la capacité du matériau à reprendre les efforts de traction.

Concernant les bétons contenant du sable de déchets de plâtre, les résultats montrent une diminution progressive de la résistance à la flexion lorsque le taux de substitution augmente. Le béton BSFP10 présente une résistance de 4.2 MPa à 7 jours et de 5.8 MPa à 28 jours, tandis que le béton BSFP15 atteint respectivement 3.44 MPa et 4.6 MPa. Cette baisse peut être liée à la forte porosité du sable de plâtre et à sa capacité d'absorption d'eau, qui entraînent une augmentation de la porosité de la matrice cimentaire et une diminution de l'adhérence entre les granulats recyclés et la pâte de ciment. À un taux de substitution de 15 %, les effets négatifs du plâtre deviennent prédominants, conduisant à des performances inférieures à celles du béton témoin.

En revanche, l'incorporation du sable de déchets de céramique améliore nettement la résistance à la traction par flexion. Les résistances augmentent progressivement avec le taux de

substitution, atteignant 6.19 MPa, 7.8 MPa et 8.17 MPa à 28 jours pour les formulations BSFC5, BSFC10 et BSFC15, respectivement. Cette amélioration peut être attribuée à la nature dure et rigide des particules céramiques, à leur surface rugueuse qui favorise l'adhérence avec la pâte cimentaire, ainsi qu'à l'effet de remplissage des particules fines, conduisant à une matrice plus compacte.

Le béton BSFC15 présente la meilleure performance mécanique, avec une augmentation d'environ 57 % à 28 jours par rapport au béton témoin et d'environ 13 % par rapport au béton renforcé uniquement par fibres (BSF 0.25). Ces résultats montrent que le sable de céramique agit favorablement sur le comportement en traction par flexion, particulièrement en présence de fibres métalliques.

Par ailleurs, toutes les formulations présentent une augmentation des résistances entre 7 et 28 jours, traduisant la poursuite de l'hydratation du ciment et le développement progressif de la microstructure du béton. L'évolution est particulièrement marquée pour les bétons contenant des déchets de céramique, ce qui indique une bonne contribution de ces granulats recyclés à la densification de la matrice cimentaire.

5.4 Durabilité

5.4.1 Absorption par immersion

La figure 5-6 représente les valeurs du coefficient d'absorption des bétons testés.

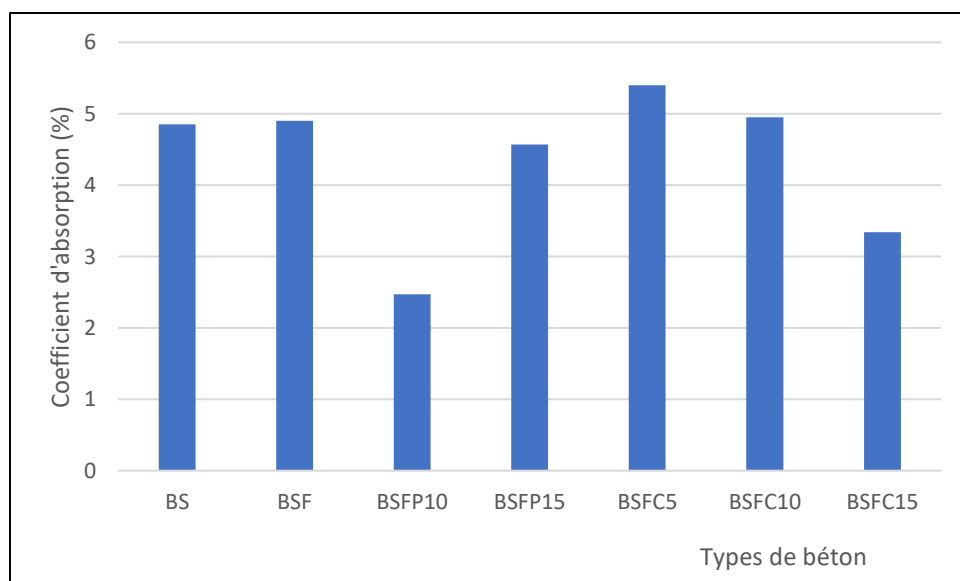


Figure 5-6 : Evolution de l'absorption par Immersion des bétons testés.

Il est clair d'après cette figure que le béton de référence BS présente un coefficient d'absorption de 4.85 %, tandis que l'ajout de 0.25 % de fibres métalliques (BSF 0,25) n'entraîne pratiquement aucune modification, avec une valeur de 4.90 %. Cette légère augmentation demeure négligeable et montre que la faible teneur en fibres n'affecte pas significativement la porosité du béton.

Les bétons contenant du sable de déchets de plâtre présentent des comportements différents selon le taux de substitution. Le béton BSFP10 enregistre la plus faible absorption de la série, avec une valeur de 2.47 %, soit une diminution d'environ 49 % par rapport au béton témoin. Cette amélioration peut être attribuée à un effet de remplissage des particules fines du sable de plâtre, qui favorise le colmatage des pores et améliore la compacité de la matrice cimentaire.

Cependant, lorsque le taux de substitution atteint 15 % (BSFP15), le coefficient d'absorption augmente à 4.57 %. Cette évolution suggère qu'au-delà d'un certain seuil, l'incorporation du sable de plâtre peut conduire à une augmentation de la porosité en raison de sa forte capacité d'absorption d'eau et de sa nature poreuse. Malgré cette hausse, la valeur demeure légèrement inférieure à celle du béton témoin.

Concernant les bétons contenant du sable de déchets de céramique, le béton BSFC5 présente la valeur la plus élevée de la série (5.40 %), indiquant une augmentation de la porosité accessible à l'eau. Cette augmentation peut être liée à la texture rugueuse et à la porosité propre des particules céramiques, ainsi qu'à une compacité insuffisante à faible taux de substitution.

L'augmentation du taux de sable céramique entraîne toutefois une diminution progressive de l'absorption. Les bétons BSFC10 et BSFC15 présentent respectivement des coefficients de 4.95 % et 3.34 %. Cette dernière réduction peut s'expliquer par un meilleur effet de remplissage des particules fines céramiques et par une amélioration de la densification de la matrice cimentaire, limitant ainsi la pénétration de l'eau.

5.4.2 Absorption par capillarité

Les résultats de l'absorption par capillarité des variétés des bétons testés sont présentés dans la figure ci-dessous.

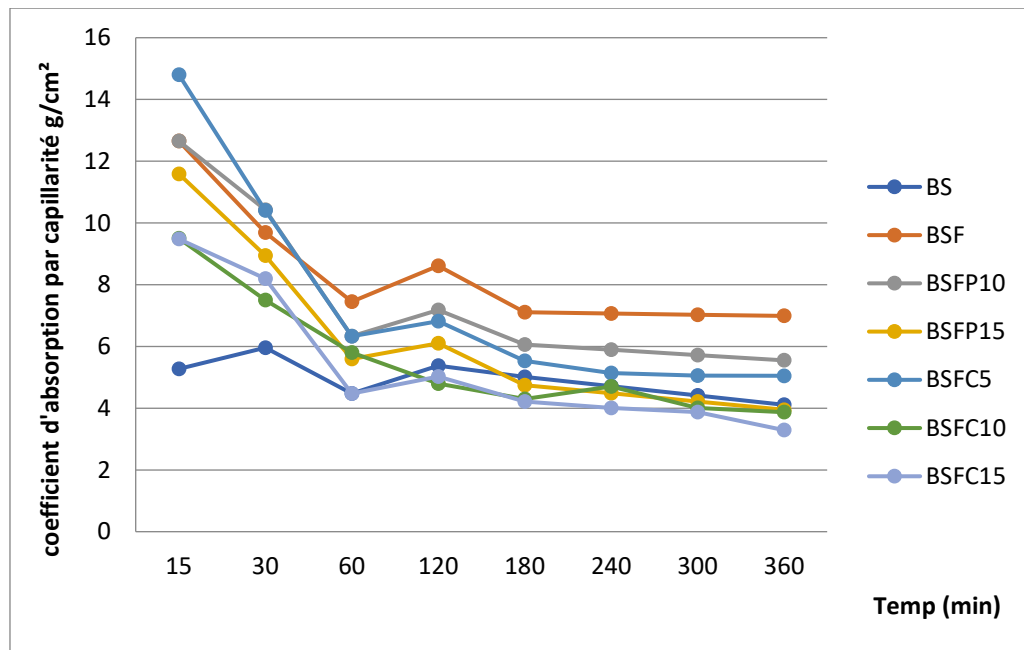


Figure 5-7 : Evolution de l'absorption par Capillarité des bétons testés.

D'une manière générale, les résultats montrent que le coefficient d'absorption capillaire diminue progressivement avec le temps pour l'ensemble des formulations. Cette diminution traduit un ralentissement de la vitesse de pénétration de l'eau au fur et à mesure de la saturation des pores accessibles du béton.

Le béton témoin BS présente des valeurs relativement faibles et stables, comprises entre 5.96 et 4.11. Cette évolution limitée indique une structure poreuse relativement homogène et une cinétique d'absorption modérée.

L'incorporation de 0.25 % de fibres métalliques entraîne une augmentation notable du coefficient d'absorption capillaire. Le béton BSF présente une valeur maximale de 12.65 à 15 minutes, puis celle-ci diminue progressivement jusqu'à 6.99 à 360 minutes. Cette augmentation peut être attribuée à la présence des interfaces pâte-fibres, susceptibles de favoriser la circulation de l'eau au sein du matériau.

Les bétons contenant du sable de plâtre présentent des coefficients intermédiaires. Les formulations BSFP10 et BSFP15 affichent respectivement des valeurs initiales de 12,65 et 11,59, qui diminuent progressivement pour atteindre 5,55 et 3,95 à 360 minutes. Le béton BSFP15 présente systématiquement des valeurs inférieures à celles de BSFP10, ce qui peut traduire une meilleure densification de la matrice ou un effet de remplissage des particules fines de plâtre limitant les transferts capillaires.

Concernant les bétons incorporant du sable céramique, la formulation BSFC5 présente le coefficient initial le plus élevé (14.8), indiquant une absorption rapide de l'eau durant les premiers instants de l'essai. Toutefois, les valeurs diminuent progressivement avec le temps pour atteindre 5.05 à 360 minutes. L'augmentation du taux de sable céramique améliore le comportement capillaire, puisque les bétons BSFC10 et BSFC15 atteignent respectivement 3,87 et 3,29 à la fin de l'essai, soit les plus faibles valeurs de l'ensemble des formulations.

5.5. Attaque chimique par les acides

5.5.1. Par acide H_2SO_4

Dans la figure 5-8, les résultats de la résistance à l'attaque chimique par l'acide sulfurique (H_2SO_4) sont présentés en termes de variation de masse des éprouvettes après 7, 14, 21 et 28 jours d'immersion.

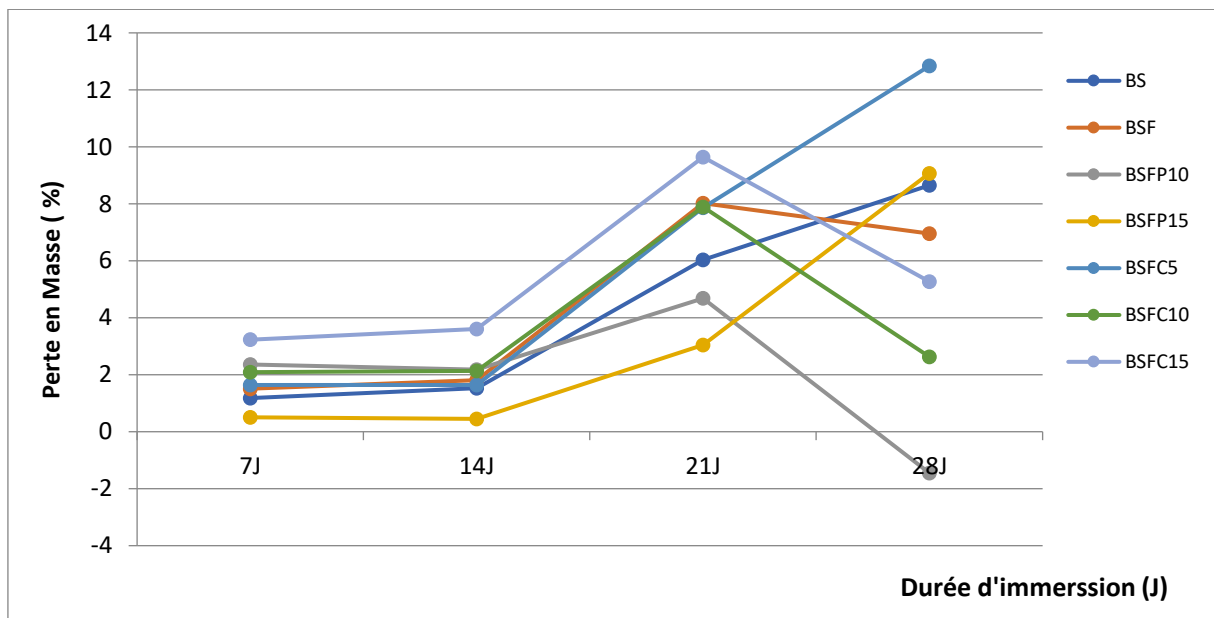


Figure 5-8 : Perte en masse des bétons dans un milieu contenant l'acide sulfurique.

D'une manière générale, les résultats montrent que la perte de masse augmente avec la durée d'exposition pour la plupart des formulations, ce qui confirme l'agressivité de l'acide sulfurique vis-à-vis des matériaux cimentaires.

Le béton témoin BS présente une augmentation progressive de la perte de masse, passant de 1,18 % à 7 jours à 8,65 % après 28 jours d'exposition. Cette évolution traduit la dissolution progressive des hydrates de ciment, notamment la portlandite, ainsi que la dégradation de la structure poreuse du béton.

L'ajout de fibres métalliques (BSF) entraîne une légère augmentation des pertes de masse aux jeunes âges. La perte atteint 8,02 % à 21 jours avant de diminuer à 6,95 % à 28 jours. Cette diminution peut résulter d'une dispersion expérimentale ou d'un dépôt de produits de réaction à la surface des éprouvettes. Globalement, le béton fibré présente une résistance à l'attaque acide légèrement meilleure que le béton témoin à 28 jours.

Les bétons incorporant du sable de plâtre présentent des comportements différents.

Pour le béton BSFP10 la perte de masse augmente jusqu'à 4.68 % à 21 jours , puis devient 1.45% à 28 jours ce qui correspond à un gain de masse attribué au gonflement de la matrice cimentaire provoqué par la formation de gypse et d'ettringite ainsi qu'à l'absorption de la solution de H_2SO_4 . Concernant BSFP15 présente la plus faible perte de masse jusqu'à 21 jours, avec seulement 3,05 % à 21 jours, ce qui traduit une bonne résistance initiale à l'attaque acide. Toutefois, la perte de masse augmente fortement à 28 jours pour atteindre 9,07 %, indiquant une dégradation accélérée à long terme.

Concernant les bétons contenant du sable céramique, la formulation BSFC5 présente la plus forte perte de masse à 28 jours (12.84 %), ce qui indique une faible résistance à l'attaque sulfurique. En revanche, les bétons BSFC10 et BSFC15 présentent des pertes de masse plus limitées, respectivement 2.63 % et 5.27 % à 28 jours. Ces résultats suggèrent qu'un taux plus élevé de sable céramique contribue à améliorer la résistance chimique du béton en réduisant la pénétration de l'acide grâce à une matrice plus compacte.

À 28 jours, l'ordre de résistance à l'attaque sulfurique peut être établi comme suit :

BSFC10 > BSFC15 > BSF > BS > BSFP15 > BSFC5 > BSFP10

Le béton BSFC10 présente ainsi la meilleure résistance à l'attaque de l'acide sulfurique, avec une perte de masse limitée à 2,63 %, tandis que le béton BSFC5 apparaît comme le plus sensible à cette agression chimique.

5.4.2 Par acide HCl

La figure 5.9 montre l'évolution de la perte en poids des différents bétons au cours de leur immersion dans une solution d'acide chlorhydrique pendant 7, 14, 21 et 28 jours.

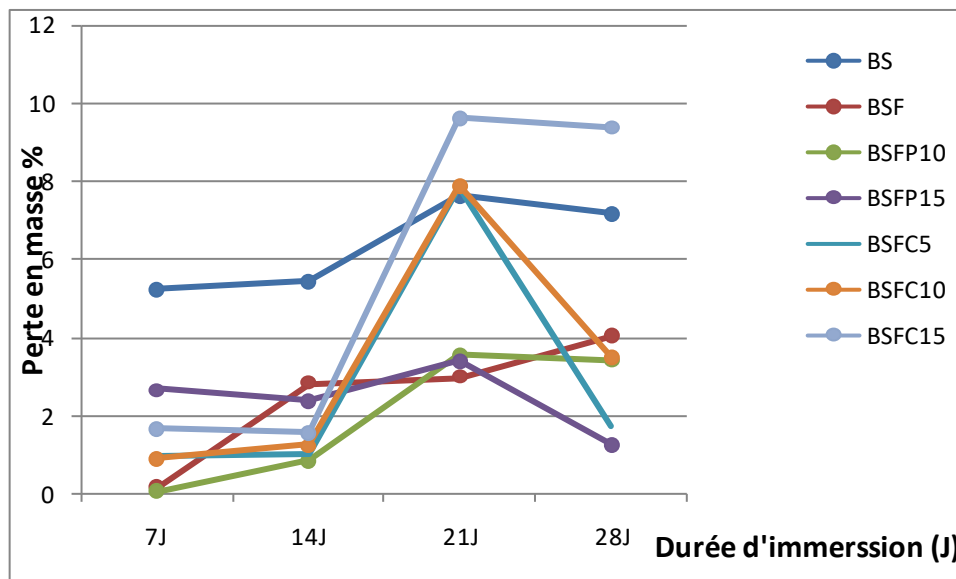


Figure 5-9 : Perte en masse des bétons dans un milieu contenant l'acide chlorhydrique

D'une manière générale, les résultats montrent que les différents bétons réagissent différemment à l'action du HCl. Contrairement à l'attaque sulfurique, les pertes de masse restent relativement modérées pour certaines formulations, tandis que d'autres présentent une dégradation plus importante.

Le béton témoin BS présente des pertes de masse relativement élevées dès les premiers jours d'exposition. La perte passe de 5.22 % à 7 jours à 7.17 % à 28 jours, traduisant une dégradation progressive de la matrice cimentaire sous l'action de l'acide chlorhydrique.

Le béton de sable fibré BSF présente des pertes de masse relativement faible. La perte de 0.14% à 7 jours, l'incorporation des fibres métalliques réduit significativement la perte de masse par rapport au béton témoin. La perte augmente progressivement jusqu'à 4.03 % à 28 jours, montrant que les fibres améliorent la cohésion de la matrice et limitent sa dégradation.

BSFP10, ce mélange présente les plus faibles pertes de masse (0.024 % à 7 jours et 3.43 % à 28 jours). Cela indique que l'ajout de 10 % de déchet de plâtre, associé aux fibres, améliore la compacité du béton et ralentit la pénétration de l'acide.

Le béton BSFP15 présente des pertes de masse faibles tout au long de l'essai, passant de 2,65% à 7 jours à seulement 1.24 % à 28 jours. Cette formulation présente ainsi une très bonne résistance à l'attaque chlorhydrique.

Les bétons contenant du sable céramique présentent des comportements variables. Les formulations BSFC5 et BSFC10 affichent des pertes relativement faibles à 7 et 14 jours, suivies d'une augmentation importante à 21 jours. Toutefois, les pertes diminuent à 28 jours pour atteindre respectivement 1.69 % et 3.48 %. Cette évolution peut s'expliquer par la formation de couches de produits de réaction limitant la poursuite de l'attaque acide.

En revanche, le béton BSFC15 présente la plus forte dégradation à long terme, avec une perte de masse atteignant 9.40 % à 28 jours. Cette valeur indique qu'un taux élevé de sable céramique peut, dans certaines conditions, favoriser la pénétration de l'acide ou rendre certaines zones de la matrice plus sensibles à l'attaque chimique.

À 28 jours, l'ordre de résistance à l'attaque par HCl peut être établi comme suit :

BSFP10 > BSFP15 > BSFC5 > BSFC10 > BSF > BS > BSFC15

5.6 Conclusions

- Contrairement au sable recyclé de déchet de plâtre qui tend à réduire la densité du béton en raison de sa porosité élevée, le sable recyclé de déchet de céramique contribue à maintenir, voire à augmenter légèrement, la densité du matériau. Cette évolution traduit une structure interne plus compacte et laisse présager une amélioration de certaines propriétés mécaniques et de durabilité du béton à mesure que le taux de substitution augmente.
- À taux de substitution comparable, le sable recyclé de déchet de céramique préserve beaucoup mieux la maniabilité du béton que le sable recyclé de déchet de plâtre.
- L'incorporation des sables recyclés, qu'ils soient issus de déchets de plâtre ou de céramique, réduit globalement la quantité d'air emprisonnée dans le béton par rapport au béton fibré de référence. Toutefois, l'effet du sable de céramique apparaît plus favorable que celui du sable de plâtre.
- Contrairement au sable recyclé de déchet de plâtre, qui provoque une forte dégradation des résistances, le sable recyclé de céramique permet d'obtenir des résistances à 28 jours proches, voire supérieures, à celles du béton de référence. La formulation BSFC15 apparaît comme la plus performante parmi les bétons recyclés étudiés, grâce à une meilleure compacité et à une structure interne plus dense.
- Les résultats de traction par flexion mettent en évidence deux comportements distincts : le sable de plâtre tend à diminuer les performances mécaniques lorsque son taux d'incorporation augmente, tandis que le sable de céramique améliore significativement la résistance à la flexion. L'association des fibres métalliques et du sable céramique

apparaît ainsi particulièrement bénéfique pour le renforcement du comportement en traction du béton.

- Les formulations BSFP10 et BSFC15 présentent les meilleures performances, indiquant que les sables recyclés de plâtre et de céramique peuvent contribuer à réduire l'absorption d'eau lorsqu'ils sont incorporés à des taux optimaux.
- Les formulations contenant des taux élevés de sable de plâtre ou de sable céramique affichent les meilleures performances à long terme. Le béton BSFC15 apparaît comme la formulation la plus performante vis-à-vis de la résistance à la pénétration de l'eau par capillarité.
- L'incorporation du sable de céramique à un taux de 10 % semble particulièrement bénéfique, puisqu'elle permet d'obtenir la plus faible perte de masse après 28 jours d'immersion. En revanche, les formulations contenant du sable de plâtre présentent une durabilité plus variable, et la valeur négative observée pour le béton BSFP10 à 28 jours nécessite une vérification expérimentale avant toute conclusion définitive.
- Les bétons contenant du sable de plâtre, notamment BSFP10 et BSFP15, présentent les meilleures performances vis-à-vis du HCl, avec des pertes de masse très faibles, voire négatives. Parmi les bétons à base de sable céramique, les formulations BSFC5 et BSFC10 présentent un comportement satisfaisant, alors que BSFC15 apparaît comme la formulation la plus sensible à l'attaque chlorhydrique après 28 jours d'exposition.

Enfin, Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de déchets de sable de céramique et de plâtre influence significativement les propriétés de durabilité des bétons fibrés. Les mélanges contenant 10 % et 15 % de sable de céramique ont présenté les meilleures performances, avec une faible absorption d'eau et une meilleure résistance aux attaques acides, grâce à une microstructure plus compacte et une porosité réduite. Les mélanges à base de déchets de plâtre ont également permis d'améliorer certaines propriétés, notamment à un taux de substitution de 10 %, qui a conduit à une diminution de l'absorption d'eau. Globalement, les résultats confirment que la valorisation de ces déchets dans les bétons fibrés constitue une solution prometteuse pour améliorer leur durabilité tout en contribuant à la gestion durable des déchets.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'emploi des déchets de plâtre et de céramique en remplacement du sable naturel dans le béton de sable relève d'une approche de valorisation durable des déchets inertes.

Dans ce travail, a pour objectif d'examiner l'influence de l'incorporation de fibres métalliques ainsi que de deux types de sables recyclés, utilisés séparément en substitution partielle du sable naturel, sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du béton de sable ordinaire, dans lequel le sable dunaire a été partiellement remplacé, en volume, par du sable recyclé provenant de déchets de plâtre à des taux de **10 et 15 %**, ainsi que par du sable recyclé issu de déchets de céramique à des taux de **5%,10% et 15 %**.

A l'issu du travail établi, les résultats suivants ont été obtenus:

- L'incorporation progressive d'un mélange de sables recyclés issus de déchets de plâtre et de céramique associés à des fibres métalliques dans les formulations de béton influence positivement plusieurs propriétés du matériau. On observe que le sable recyclé de déchet de céramique contribue à maintenir, voire à augmenter légèrement la densité du matériau et une meilleure maniabilité. Cette évolution traduit une structure interne plus compacte et laisse présager une amélioration de certaines propriétés mécaniques et de durabilité du béton à mesure que le taux de substitution augmente.
- Le sable recyclé de céramique améliore significativement la résistance à la flexion. L'association des fibres métalliques et du sable céramique apparaît ainsi particulièrement bénéfique pour le renforcement du comportement en traction du béton.
- BSFP10 et BSFC15 offrent les meilleures performances en termes d'absorption d'eau et de capillarité. Toutefois, le béton BSFC15 se distingue comme la formulation la plus performante grâce à sa meilleure résistance à la pénétration de l'eau, confirmant l'intérêt de l'utilisation du sable recyclé de céramique à des taux de substitution optimaux.
- l'incorporation de 10 % de sable recyclé de céramique améliore la durabilité du béton en limitant la perte de masse après immersion. En milieu acide (HCl), les formulations à base de sable de plâtre présentent les meilleures performances, tandis que les bétons contenant du sable de céramique conservent un comportement satisfaisant, à l'exception de la formulation BSFC15, qui se révèle la plus sensible à l'attaque chlorhydrique après 28 jours d'exposition.

RÉSUMÉ

Résumé

Résumé

L'utilisation des déchets de plâtre et de céramique comme substituts partiels du sable naturel dans un béton de sable renforcé par des fibres métalliques représente une approche innovante permettant de valoriser les déchets de construction tout en préservant les ressources naturelles. L'étude a évalué l'influence de ces matériaux recyclés sur les propriétés à l'état frais, les performances mécaniques et la durabilité du béton. Les résultats obtenus montrent que le sable recyclé de céramique améliore la maniabilité, la résistance à la flexion ainsi que la durabilité du matériau. Les formulations BSFP10 et BSFC15 ont présenté les meilleures performances, tandis que BSFC15 s'est distinguée par sa meilleure résistance à la pénétration de l'eau. L'ajout de fibres métalliques a également contribué à renforcer le comportement du béton en limitant la propagation des fissures et en améliorant sa résistance en traction. L'ensemble de ces résultats confirme que l'utilisation des sables recyclés constitue une alternative durable et prometteuse pour la conception de bétons performants, répondant aux exigences techniques tout en réduisant l'impact environnemental des déchets de construction.

Mots clés : béton de sable, béton de sable fibré , déchets de plâtre, déchets de céramique, sable recyclé, propriétés mécaniques, durabilité, valorisation des déchets.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Normes

- 1.1. Norme AFNOR – NF EN 206/CN (2014).
- 1.2. Norme AFNOR – NF EN 12620 (2013).
- 1.3. Norme AFNOR – NF P 18-555.
- 1.4. Norme AFNOR – NF P 18-560.
- 1.5. Norme EN 196-6.

2. Ouvrages, Rapports & Protocoles

- 2.1. European Commission (2016). EU Construction and Demolition Waste Management Protocol.
- 2.2. Sablocrete (2019), Guide technique pour la formulation et l'utilisation du béton de sable.
- 2.3. Aubert, J. E., Husson, B., & Sarramone, N. (2006). Utilisation de déchets de construction comme additions minérales dans les liants hydrauliques. *Revue des sciences de l'eau*, 19(3), 195–210.
- 2.4. Benredjem, L. & al. (2014). Caractérisation d'un béton de sable à base de matériaux locaux. *Courrier du Savoir – N°18*, Université de Sidi Bel Abbès.
- 2.5. Tagnit-Hamou, A., & al. (2011). Valorisation de déchets de céramique dans la fabrication de ciment et béton. *Revue Génie Civil, RGC, Canada*.
- 3. Articles scientifiques, mémoires ou communications
 - 3.1. Abadou, Y. (2018). Influence de l'ajout de déchets de céramique broyés sur les performances des mortiers à base de sable de dune. *Ecole Nationale Polytechnique*.
 - 3.2. Baba Arbi, M. (2017). Comportement du béton de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques soumis à haute température.
 - 3.3. Belagraa, L. & Benouis, C. E. (2018). Utilisation des déchets de brique et de faïence dans les bétons. *Colloque International de Génie Civil, Blida*.
 - 3.4. Belferrag, A. (2006). Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dune, mémoire magister, université Ouargla.
 - 3.5. Boulait, A. & Kumasi, W. (2012). Etude des caractéristiques mécaniques de béton de sable de dune renforcé par de fibres issues de déchets industriels.
 - 3.6. Chikouche, A. & al. (2013). Effets de l'utilisation de matériaux recyclés dans le béton. *Revue Nature & Technologie, Université de Constantine*.

- 3.7. Djerbi, A., & al. (2012). Effet de la substitution du sable naturel par des sables recyclés dans les bétons de sable. Bulletin de l'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE).
- 3.8. Poon, C.S., Yu, A.T.W. & Ng, L.H. (2001). On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. Resources, Conservation and Recycling, 32(2), 157–172.
- 3.9. Tam, V.W.Y. (2008). On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. Waste Management, 28(6), 1072–1080.

3.Site web

<https://www.cnsunrex.com/fr/processus-etape-par-etape-de-fabrication-dun-lavabo-et-de-toilettes-en-ceramique-2/>

<https://ggsceramic.com/fr/information/proprietes-des-materiaux-ceramiques>

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-amenagements-interieurs-du-batiment-42229210/ceramiques-de-batiment-c940/caracteristiques-des-produits-sanitaires-c940niv10005.html>

<https://www.altaroad.com/reglementation-tracabilite-dechets-chantier/>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A2tre>

<https://lelementarium.fr/product/platr>

