REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Elaboration des nouveaux matériaux de construction écologiques à base de déchets recyclés

---

Présenté par :

M^{elle}. BENGRIBI Wafaa.

M^{elle}. BOUCHENAFA Manel

Proposé et Dirigé par :

Dr BOUKHELKHAL Djamila

Mme BENNABI Serine

Promotion Juin 2024

Remerciements

Tout d'abord, Nous tenons à remercier ALLAh de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près oude loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et nous passons les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile. Nous tenons à remercier :

Notre encadreur **Dr BOUKHLKHAL DJAMILA**, d'avoir accepté de nous encadrer, et pour ses conseils précieux pendant la réalisation de ce travail. Pour sa disponibilité, son écoute, son aide très précieuse et l'intérêt constant qu'elle a bien voulu montrer pour ce travail.

Un grand merci à **Mme BENNABI SERINE**, pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du laboratoire de matériaux de construction au niveau du Hall de technologie de l'université de Médéa.

Nous sommes grées aux membres de jury, d'avoir accepté d'examiner et de présider le jury de notre travail. On leur exprime notre profonde reconnaissance pour leur lecture critique et éclairante sur notre travail.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Tous les mots ne peuvent exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie cette mémoire de master :

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,,, À cette source de tendresse, de patience et de générosité, A la chandelle qui allume ma vie,,,

À ma mère «**Sihem**» ! et mon père « **Ali** »

À mes frères,«**Achref**» et « **Moade**», et à toute ma famille

À ma binette « **BOUCHNAFA Manel** »

Je n'oublie certainement pas mes amis surtout « **AISSANI Manel** et **KORTEBI** R**itaj**», ainsi tous ceux qui m'ont aidés dans notre travail, je leur dise merci.

Wafaa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail a

Mes chers parents qui nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments pour leur patience illimitée leur encouragement continu leur aide en témoignage de mon proton de amour et respect pour leur grande sacrifices

A mon cher frère

A ma tendre sœur

A ma binette **Wafa**

et a toute ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible je vous dis merci.

Manel

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين و رسكلة المواد الصناعية و المواد الحيوية (الأصداف البحرية) ودمج هذه المواد بشكل حجمي في كتلة الخرسانية الرملية المائعة بنسب مختلفة مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة(الجريان و الكثافة) و الحالة الصلبة(مقاومة الضغط. الامتصاص . المسامية . الكثافة. السرعة بالموجات فوق الصوتية. توصيل حراري) و مقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية.

و قد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الخصائص الميكانيكية للخرسانة تتحسن بشكل ملحوظ و من الممكن استعمال هذا النوع من الخرسانة في مختلف مجالات البناء و في جميع العناصر الإنشائية.

كلمات مفتاحية : الرسكلة, الخرسانية الرملية المائعة, النفايات الصناعية, الأصداف البحرية, الخواص الفيزيوميكانيكية

Résume

L'objectif principal de ce projet est de contribuer à la valorisation et au recyclage des déchets industriels (G), (C), (M), (V), et les déchets bios sources (Q) dans la formulation de béton de sable fluide avec déférents pourcentages. Les caractéristiques de béton à l'état frais (étalement, densité apparent) et à l'état durci (la résistance a la compression, la densité apparent, la vitesse ultrasonique, la porosité, la conductivité thermique et l'absorption d'eau par capillarité).

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques mécaniques de béton sable fluide sont améliorées avec l'augmentation de substitution de déchets industrielle et bio sources, donc il est possible d'utiliser ce type de béton dans le domaine de la construction.

Mots clés : Recyclage, Béton de sable fluide, Déchets industriels, Coquillage, Caractéristiques physico-mécaniques.

Abstract

The main objective of this project is to contribute to the recovery and recycling of industrial waste (G), (C), (M), (V), and biosource waste (Q) in the formulation of fluid sand concrete with different percentages. The characteristics of concrete in the fresh state (spreading, apparent density) and in the hardened state (compressive strength, apparent density, ultrasonic velocity, porosity, thermal conductivity and water absorption by capillarity).

The results obtained show that the mechanical characteristics of fluid sand concrete are improved with the increase in substitution of industrial waste and bio sources, so it is possible to use this type of concrete in the field of construction.

Key words: Recycling, Fluid sand concrete, Industrial waste, Seashell waste, Physic-mechanical properties

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumés

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Notation et abréviation

Table des matières

Introduction Générale ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I. Introduction Générale 2

I.1. Introduction 5

I.2. Béton de sable fluide 5

I.2.1. Définition et composition 6

I.2.2. Domaines d'application du béton de sable fluide dans le Génie civil 6

I.3. Fondamentaux du béton et des bio-composites cimentaires 6

I.4. Revue des matériaux alternatifs dans le béton 7

I.4.1. Poudre de coquillage 7

I.4.2. Poudre de verre 11

I.4.3. Poudre de marbre 14

I.4.4. Poudres de céramique 15

I.4.5. Poudre de granite 18

I.5. Mécanismes d'action des substituts cimentaires 20

I.6. Avantages environnementaux et durabilité 21

I.6.1. Réduction de l'empreinte carbone et valorisation des déchets solides 21

I.6.2. Durabilité du Béton Modifié 21

I.7. Défis techniques et économiques 22

I.8. Perspectives et voies de recherche futures 22

I.9. Conclusion 23

II. 24

III. 24

Chapitre 2 : .....Erreur ! Signet non défini.

IV. **Matériaux et Essais .....Erreur ! Signet non défini.**

IV.1. Introduction 25

IV.1. Caractérisation des Matériaux Utilisés 26

IV.1.1. Ciment 26

IV.1.2. Granulats.....28

IV.1.3. Poudre de déchets de Granite 29

IV.1.4. Poudre de déchets de Céramique.....31

IV.1.5. Poudre de coquillage 33

IV.1.6. Poudre de déchets de verre 34

IV.1.7. Eau de gâchage 36

IV.1.8. Super plastifiant.....36

IV.1.9. Poudre de marbre.....37

IV.2. Formulation du béton de sable fluide 38

IV.2.1. Séquence de malaxage du béton.....40

IV.2.2. Préparation et conservation des éprouvettes.....41

IV.3. Essais réalisés sur le BSF 42

IV.3.1. Etat frais.....42

IV.3.2. Etat durci 43

IV.4. Conclusion.....49

V. 50

VI. 50

VII. 50

VIII. Chapitre 3 :.....Erreur ! Signet non défini.

IX. Résultats et discussions .....Erreur ! Signet non défini.

IX.1. Introduction.....51

IX.2. Effet de la substitution partielle du ciment dans le béton de sable fluide sur l'état frais 52

IX.2.1. Etalement 52

IX.3. Effet de la substitution partielle du ciment dans le béton de sable fluide sur l'état durci 55

IX.3.1. Résistance à la compression.....55

IX.3.2. Conductivité thermique.....60

IX.3.3. Porosité accessible à l'eau 64

IX.3.4. Analyse de l'Impulsion Ultrasonique 66

XII. Conclusion Générale.....Erreur ! Signet non défini.

XIII. Conclusion Générale.....73

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique des coquillages [10] 7
Tableau 2 : Composition chimique de la poudre de verre [16] 11
Tableau 3 : Composition chimique de la poudre de marbre [5]**.** 14
Tableau 4 : Composition chimique de poudre de céramique selon divers auteurs. 15
Tableau 5 : Composition chimique de poudre de céramique selon [38]. 19
Tableau 6 : composition chimique du ciment. 27
Tableau 7: L'analyse chimique du ciment et composition du clinker. 27
Tableau 8 : Propriétés physiques d'identification de sable utilisés. 28
Tableau 9 : Propriétés physiques de la poudre de granit. 31
Tableau 10 : Propriétés physiques de la poudre de céramique. 32
Tableau 11 : Propriétés physiques de la poudre de coquillage. 34
Tableau 12 : Propriétés physiques de la poudre verre. 35
Tableau 13 : Propriétés physiques de super-plastifiant. 36
Tableau 14 : les composantes des bétons formulés à base des déchets de granite. 39
Tableau 15 : les composantes des bétons formulés à base des déchets de céramique. 39
Tableau 16 : Composition chimique des coquillages [10] .....**Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 17 : Composition chimique de la poudre de verre [16]**Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 18 : Composition chimique de la poudre de marbre [5].**Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 19 : Composition chimique de poudre de céramique selon divers auteurs. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 20 : Composition chimique de poudre de céramique selon [38].**Erreur ! Signet non défini.**

Liste des Figures

Liste des figures

Figure 1 : (a) Échantillon de coquillage utilisé dans cette étude (avant broyage) [10]. 8

Figure 2 : (A) Poudre de coquillage avant calcination, (B) **Coquillage après calcination [6].**.....8

Figure 3: Influence de la poudre de coquillage sur le développement de la résistance à la compression du béton [6].**.....Erreur ! Signet non défini.**

Figure 4 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps [13].**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 5 : Evolution de la résistance à la traction dans le temps [13].**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 6 : Evolution de la résistance à la flexion dans le temps [13].**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 7 : Module d'élasticité du béton ordinaire et un béton contenant de la poudre de coquillages à 7, 28 et 91 jours [14].**.....Erreur ! Signet non défini.**

Figure 8 : Préparation de la poudre de verre recyclé [17]. 12

Figure 9 : Résultats du test d'affaissement pour différents mélanges de mortier avec ajout de poudre de verre (GP) [19]......13

Figure 10 : Comparaison de la résistance à la compression des différents mélanges de mortier à 7, 28 et 90 jours [19]. 13

Figure 11 : poudre de marbre [5]......14

Figure 12 : Processus d'obtention de poudre de céramique (a) morceaux de déchets de céramique concassés (b) type de machine de concassage (c) particules de céramique de grosse taille (d) broyeur (e) poudre de déchets de céramique (CWP) (f) four à combustion [31]......16

Figure 14 : Résistance à la compression du béton en fonction du taux de substitution par la poudre de céramique. **.....Erreur ! Signet non défini.**

Figure 13 : Variation de l'affaissement du béton avec les taux de substitution de la poudre de céramique.**.....Erreur ! Signet non défini.**

Figure 15 : Absorption d'eau du béton en fonction du taux de substitution par la poudre de céramique à 28 jours. **.....Erreur ! Signet non défini.**

Figure 16 : Relation entre les taux de substitution de GP et la résistance à la traction par fendage, la résistance à la flexion du béton GP [36].**.....Erreur ! Signet non défini.**

Figure 17 : Résistance à la compression des mélanges de béton à différents âges – comparaison [36]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 18 : ciment. 28
Figure 19 : Courbe granulométrique du sable utilisé. 29
Figure 20: Sable moyenne d'Oued sauf 29
Figure 21 : Processus de préparation de la poudre de granite 30
Figure 22 : Processus de préparation de la poudre de céramique. 32
Figure 23 : préparation de la poudre de coquillage. 33
Figure 24 : Processus de préparation de la poudre de verre 35
Figure 25: Superplastifiant tempo 10. 36
Figure 26 : poudre de marbre. 37
Figure 27: Séquence de malaxage du béton de sable fluide. 40
Figure 28: protocole de malaxage. 41
Figure 29: Préparation et conservation des éprouvettes. 41
Figure 30: Mesure de l'étalement du béton de sable fluide. 42
Figure 31: Mesure de la densité du béton. 42
Figure 32: Dispositif de mesure de la résistance à la compression. 43
Figure 33: Dispositif de mesure de la résistance à la traction. 43
Figure 34: Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique. 44
Figure 35: Etalonnage et mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores. 45
Figure 36: densité apparente à l'état durci. 45
Figure 37: Essai de Porosité accessible à l'eau. 46
Figure 38: Essai absorption d'eau par immersion. 47
Figure 39: protocole expérimental. 48
Figure 40 : (a) Échantillon de coquillage utilisé dans cette étude (avant broyage) [10]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 41 : (A) Poudre de coquillage avant calcination, (B) Coquillage après calcination [6]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 3: Influence de la poudre de coquillage sur le développement de la résistance à la compression du béton [6]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 4 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps [13].**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 5 : Evolution de la résistance à la traction dans le temps [13].**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 6 : Evolution de la résistance à la flexion dans le temps [13].**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 7 : Module d'élasticité du béton ordinaire et un béton contenant de la poudre de coquillages à 7, 28 et 91 jours [14]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 47 : Préparation de la poudre de verre recyclé [17].....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 48 : Résultats du test d'affaissement pour différents mélanges de mortier avec ajout de poudre de verre (GP) [19]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 10 : Comparaison de la résistance à la compression des différents mélanges de mortier à 7, 28 et 90 jours [19]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 50 : poudre de marbre [5]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 51 : Processus d'obtention de poudre de céramique (a) morceaux de déchets de céramique concassés (b) type de machine de concassage (c) particules de céramique de grosse taille (d) broyeur (e) poudre de déchets de céramique (CWP) (f) four à combustion [31]. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 14 : Résistance à la compression du béton en fonction du taux de substitution par la poudre de céramique. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 13 : Variation de l'affaissement du béton avec les taux de substitution de la poudre de céramique. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 15 : Absorption d'eau du béton en fonction du taux de substitution par la poudre de céramique à 28 jours. .....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 16 : Relation entre les taux de substitution de GP et la résistance à la traction par fendage, la résistance à la flexion du béton GP [36].....**Erreur ! Signet non défini.**
Figure 17 : Résistance à la compression des mélanges de béton à différents âges – comparaison [36]. .....**Erreur ! Signet non défini.**

Notations et Abréviations

Notations et abréviations

BSF Béton de sable fluide

BSFT Béton de sable fluide témoin

BSF1, 2,….18 Béton de sable fluide à base de déchets DG, DC, DM, PV, PQ.

CPA Ciment Portland Artificiel

CPJ Ciment Portland Composée

E/C Rapport eau sur ciment

R Résistance

RC Résistance à la compression

SR Sable recyclé

SP Superplastifiant

NA Norme Algérienne

NE Norme Européenne

Mf Module de finesse

E Quantité d'eau

M Moment de flexion

L Liant

F Filler

PG poudre de granite

PC poudre de céramique

PM poudre de marbre

PV poudre de verre

PQ poudre de coquillage

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un monde confronté à des défis environnementaux croissants, l'industrie du génie civil se trouve à un carrefour crucial où il est impératif de répondre à la demande accrue en infrastructures tout en réduisant l'empreinte écologique. La fabrication traditionnelle des matériaux de construction, notamment du ciment, est responsable d'une part substantielle des émissions mondiales de dioxyde de carbone, contribuant ainsi au réchauffement climatique. Pour pallier cette problématique, l'innovation dans les matériaux de construction est devenue une nécessité impérieuse. Le béton de sable fluide (BSF) se distingue comme une solution novatrice et prometteuse, répondant aux enjeux de durabilité grâce à l'utilisation de matériaux locaux et recyclés. Formulé spécifiquement pour surmonter les défis liés à la pénurie d'agrégats grossiers dans certaines régions, telles que les zones sahariennes de l'Algérie, le BSF exploite des ressources abondantes comme le sable des dunes pour offrir une alternative viable et écologique aux matériaux traditionnels. Ce mémoire se propose d'explorer les multiples facettes du BSF, de sa formulation à ses applications, en mettant en lumière ses avantages en termes de performance mécanique, de durabilité et d'impact environnemental réduit.

Les chapitres qui suivent détaillent les aspects théoriques et expérimentaux de cette étude. Nous commencerons par une présentation détaillée des caractéristiques des matériaux utilisés, des techniques de formulation et des méthodes de préparation des échantillons, indispensables pour assurer la qualité et la fiabilité des résultats obtenus. Ensuite, nous examinerons la performance du BSF à l'état frais et durci à travers divers essais portant sur la maniabilité, la résistance à la compression, la durabilité, ainsi que d'autres propriétés essentielles pour garantir la pérennité des structures construites. L'impact environnemental et économique sera également analysé, mettant en exergue les bénéfices du BSF en matière de réduction de l'empreinte carbone et de valorisation des déchets.

En intégrant des matériaux recyclés comme le verre, la céramique, les coquillages et le granite, le BSF contribue non seulement à la durabilité environnementale mais aussi à l'innovation dans le domaine des matériaux de construction. Enfin, nous aborderons les perspectives et les voies de recherche futures, discutant des défis techniques à surmonter et des potentielles directions de recherche pour optimiser et généraliser l'utilisation du BSF. À

travers cette investigation, notre objectif est de démontrer que le béton de sable fluide représente non seulement une réponse adéquate aux défis actuels du génie civil, mais aussi une avancée significative vers un avenir plus durable et respectueux de l'environnement. Ce mémoire se veut une contribution importante à la transition écologique de l'industrie de la construction, en promouvant des pratiques innovantes et durables qui répondent aux besoins croissants d'infrastructures tout en préservant notre planète.

Chapitre 1 :

Synthèse Bibliographique et État de l'Art sur les Matériaux Durables en Génie Civil

I.1. Introduction

Dans le contexte actuel de crise environnementale globale, l'industrie du génie civil se trouve à la croisée des chemins, confrontée à la double nécessité de répondre à la demande croissante en infrastructures tout en réduisant son empreinte écologique. Dans cette quête d'innovation durable, le béton de sable fluide (FSC) émerge comme une solution prometteuse, exploitant la valorisation des matériaux locaux et recyclés pour alléger l'impact environnemental des constructions [1]. La fabrication traditionnelle des matériaux de construction, en particulier du ciment, est l'une des principales sources d'émissions de dioxyde de carbone, contribuant significativement au réchauffement climatique. Face à cette problématique, la recherche sur les matériaux écologiques apparaît comme une démarche essentielle pour transformer le secteur. Les travaux de Muhedin et Ibrahim (2023) et de Sangeetha et al. (2023) mettent en lumière l'importance de développer des alternatives durables, telles que l'utilisation de poudre de verre et de déchets de coquillages, non seulement pour minimiser l'impact environnemental de la construction mais aussi pour promouvoir le recyclage des déchets [2][3]. Ces études révèlent que l'incorporation de ces matériaux alternatifs dans le béton non seulement améliore ses propriétés mécaniques et sa durabilité mais contribue également à la conservation des ressources naturelles et à la réduction de la pollution. Ainsi, elles soulignent l'urgence et la pertinence de poursuivre les recherches dans ce domaine, ouvrant la voie à une révolution écologique dans le génie civil pour un avenir plus durable.

I.2. Béton de sable fluide

La formulation du béton de sable fluide (FSC) a été développée dans un contexte spécifique, visant à répondre aux défis posés par la pénurie d'agrégats grossiers dans certaines régions, telles que les zones sahariennes de l'Algérie. Cette situation a stimulé la recherche sur l'utilisation de matériaux locaux, comme le sable des dunes, disponible en abondance, pour créer des alternatives viables aux matériaux de construction traditionnels. Le FSC, avec sa composition ajustée pour maximiser la teneur en sable tout en conservant les propriétés requises de résistance et de maniabilité, apparaît comme une solution innovante. En optimisant la fluidité du mélange, cette formulation vise non seulement à surmonter les contraintes liées à la disponibilité des ressources mais aussi à améliorer l'efficacité de la mise en œuvre sur les chantiers, offrant ainsi des avantages significatifs en termes de coût, de durabilité et de performance environnementale[1].

I.2.1.Définition et composition

Le béton de sable fluide (FSC) est un mélange composé de sables, de ciment, fillers, superplastifiants, et d'eau. Il est défini comme un béton qui répond à la combinaison des caractéristiques du béton de sable avec une fluidité suffisante pour s'adapter au niveau actuel de développement dans les constructions de génie civil. Ce type de béton, rendu possible grâce à l'élaboration de superplastifiants performants, peut couler et se consolider sous son propre poids sans aucune consolidation externe. Il se caractérise par une homogénéité adéquate et l'absence de ségrégation ou de saignement. La haute fluidité de ce béton facilite sa pompabilité et son placement dans des zones difficilement accessibles, ainsi que dans des pièces complexes et fortement armées, résultant en un niveau élevé de finition de surface et de durabilité des structures[4].

I.2.2.Domaines d'application du béton de sable fluide dans le Génie civil

Les applications potentielles du béton de sable fluide (FSC), telles qu'identifiées dans [1], incluent :

- **Réparations de béton :** Le FSC offre une bonne adhérence et une excellente fluidité, ce qui le rend idéal pour les réparations de structures en béton, où il peut efficacement remplir les fissures et les vides sans nécessiter de vibration pour la compaction.
- **Coulis pour le sol :** Grâce à sa capacité à s'écouler et à se consolider sous son propre poids, le FSC peut être utilisé pour le coulis de sol, améliorant ainsi la stabilité et la capacité de charge du sol sous les fondations des bâtiments.
- **Fondations profondes :** Le FSC est applicable dans la construction de fondations profondes pour les bâtiments, où sa fluidité facilite le pompage et le placement dans des zones difficiles d'accès ou fortement armées, garantissant une finition de surface de haute qualité et la durabilité des structures.

Ces applications illustrent la polyvalence du béton de sable fluide et son potentiel à répondre à divers défis dans le domaine de la construction, en particulier dans les environnements exigeants ou lorsque les matériaux de construction traditionnels sont limités.

I.3. Fondamentaux du béton et des bio-composites cimentaires

Le béton traditionnel, essentiel à l'industrie du bâtiment, se compose de ciment, eau, sable, et gravier, offrant solidité et polyvalence. Néanmoins, sa production consomme beaucoup d'énergie et émet une quantité significative de CO_2, principalement en raison de la fabrication

du ciment Portland, soulevant de sérieuses préoccupations environnementales. En réponse, les bio-composites cimentaires, incorporant des déchets organiques ou des sous-produits industriels comme la poudre de verre et les déchets de coquillages, émergent comme alternatives durables. Ces matériaux visent à minimiser l'empreinte carbone du béton tout en valorisant les déchets. Cependant, le développement de bio-composites cimentaires présente des défis, notamment l'amélioration des propriétés mécaniques et la durabilité, tout en gagnant l'acceptation de l'industrie de la construction. Cette innovation vers des solutions de construction plus durables et respectueuses de l'environnement représente une avancée cruciale malgré ces obstacles [5][6][7].

I.4. Revue des matériaux alternatifs dans le béton

I.4.1. Poudre de coquillage

L'intégration de la poudre de coquillages en tant que substitut partiel du ciment dans le domaine de la construction constitue une approche novatrice visant à atténuer l'impact environnemental associé à l'élimination des déchets solides et à la surexploitation des ressources naturelles. L'exploitation des coquillages, une ressource renouvelable, en remplacement du calcaire, un minéral non renouvelable fréquemment utilisé dans le mélange du ciment Portland, s'aligne sur les principes du développement durable. La prédominance du carbonate de calcium (CaCO3) dans la composition des coquillages, leur confère des caractéristiques chimiques propices à leur utilisation comme matière première dans la fabrication du ciment. En outre, le processus de calcination transforme le carbonate de calcium en oxyde de calcium (CaO), enrichissant le béton de propriétés pozzolaniques bénéfiques. Cette valorisation des coquillages en tant que matériau de recyclage contribue à la diminution de l'empreinte carbone du secteur de la construction tout en promouvant une gestion optimale des déchets [8][9].

Le tableau suivant résume la composition chimique principale des coquillages selon Soltanzadeh et *al.* :

Tableau 1 : Composition chimique des coquillages [10]

Composant	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O	K_2O	MgO	Cl	LOI
Pourcentage (%)	52.34	3.65	1.15	0.20	0.47	0.35	0.13	0.42	0.038	41.252

**LOI : Loss on Ignition (Perte au feu), qui mesure la quantité de matière organique et d'eau libérée lors de la calcination.



Figure 1 : (a) Échantillon de coquillage utilisé dans cette étude (avant broyage) [10].

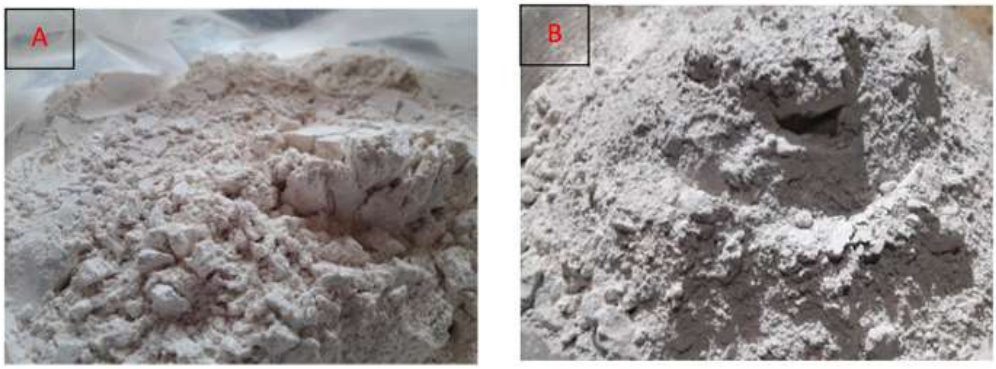


Figure 2 : (A) Poudre de coquillage avant calcination, (B) **Coquillage après calcination [6].**

Les propriétés physiques et la composition chimique des coquillages ont été examinées à travers plusieurs études, ainsi que les propriétés de durabilité du béton telles que l'absorption d'eau, la perméabilité à l'eau, la pénétration des ions chlorure, la corrosion, les attaques par acides et sulfates, le retrait, le fluage et les propriétés microstructurales. L'utilisation de déchets de coquillages comme substitut du ciment à divers niveaux de remplacement a montré une augmentation du temps de prise initial et final proportionnelle à la teneur en coquillages.[11][6][8].

Des travaux expérimentaux ont été menés pour évaluer les propriétés mécaniques du béton, utilisant des coquillages comme substitut du ciment à cinq niveaux différents : 0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Il a été observé que l'ajout accru de coquillages dans les mélanges de béton améliore la maniabilité du béton. Cela pourrait être attribué au processus d'hydratation des coquillages, qui requiert plus de temps que celui du ciment. [6]

L'incorporation de poudre de coquillage dans le béton affecte ses propriétés physiques et mécaniques. Elle peut réduire la résistance à la compression, surtout à jeune âge, mais

améliore la flexibilité et la ténacité grâce à une bonne liaison entre les agrégats et la matrice de ciment. Les niveaux de remplacement faibles à modérés contribuent à une meilleure densité et durabilité du béton, réduisant la porosité et augmentant la résistance aux agressions chimiques et à la perméabilité. On note que le temps de prise du béton à base de coquillages augment avec le ,taux de remplacement, dû principalement au CaO des coquillages qui retarde la prise du ciment [6][12][13].

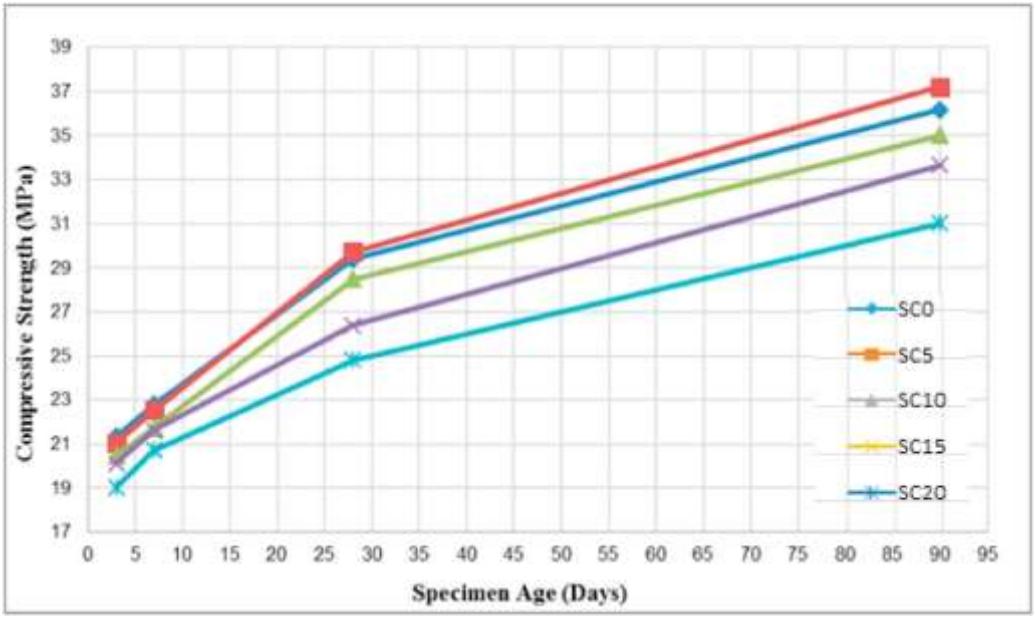


Figure 3: Influence de la poudre de coquillage sur le développement de la résistance à la compression du béton[6].

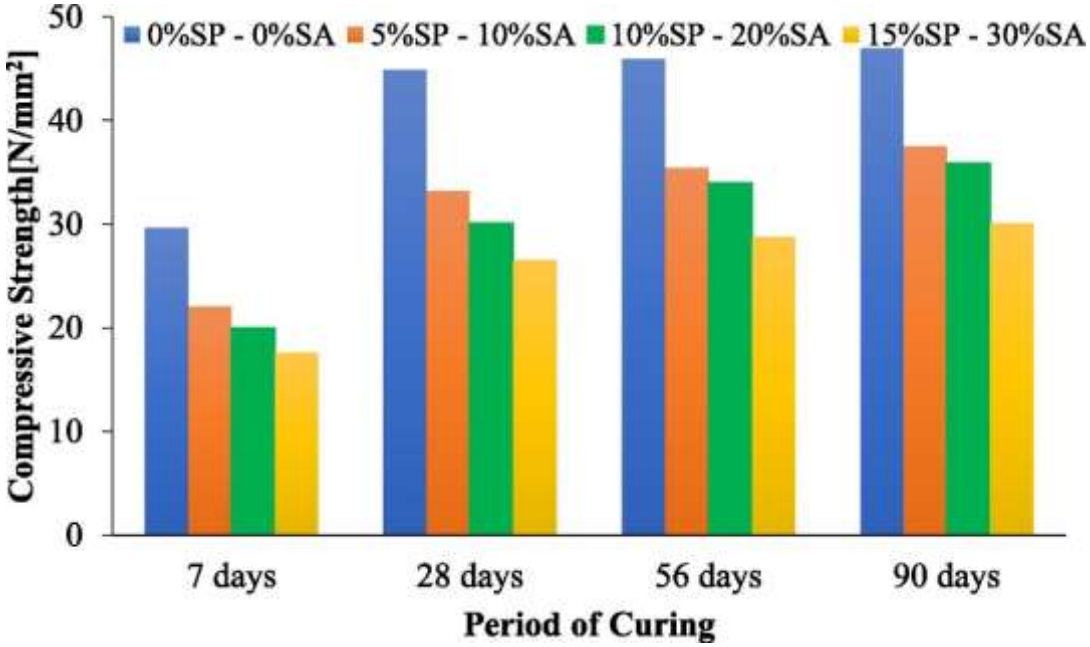


Figure 4 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps [13].

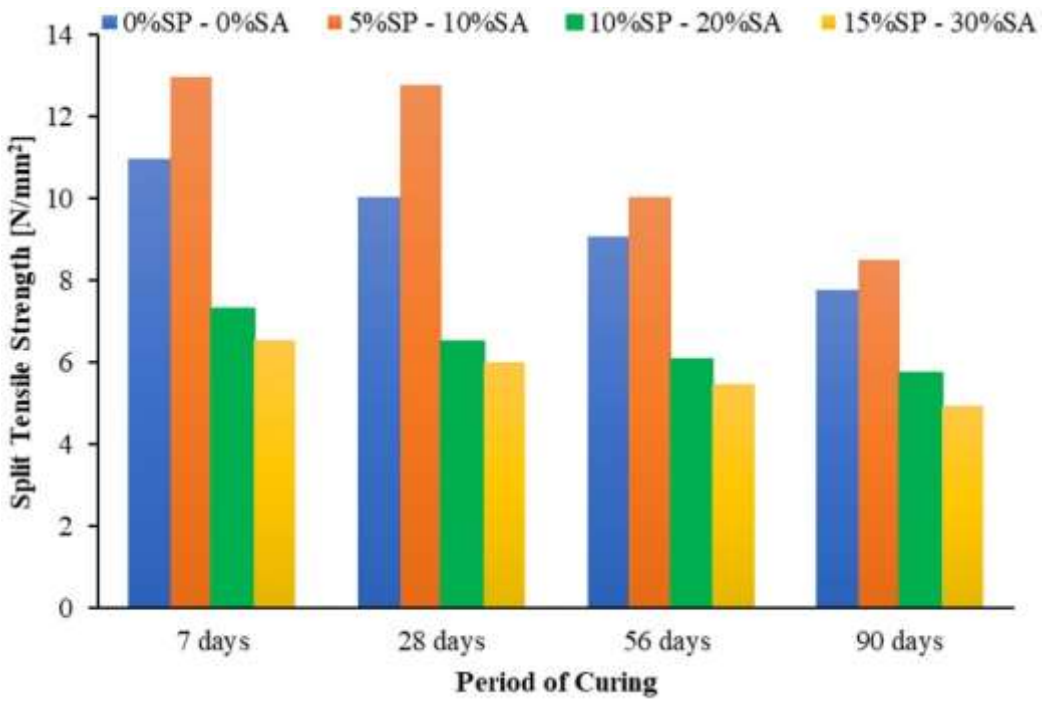


Figure 5 : Evolution de la résistance à la traction dans le temps[13].

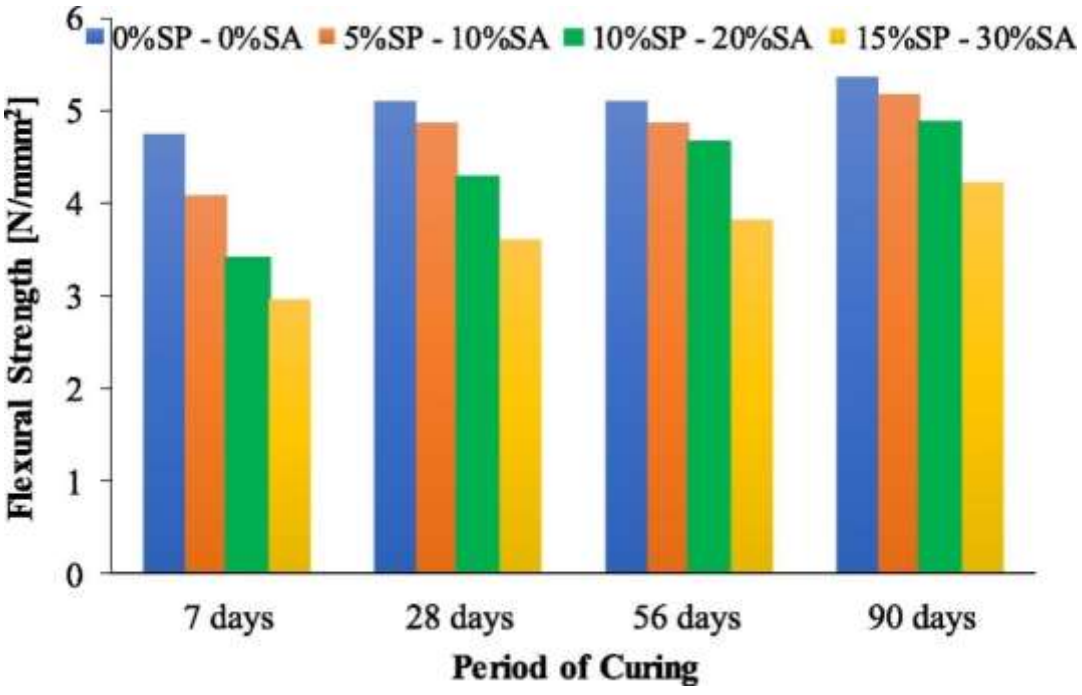


Figure 6 : Evolution de la résistance à la flexion dans le temps[13].

Le module d'élasticité du béton intégrant de la poudre de coquillages comme substitut du ciment est initialement plus bas que celui du béton traditionnel, mais il augmente à un rythme plus élevé pendant le processus de cure. Cette augmentation peut être attribuée à la riche teneur en oxyde de calcium (CaO) des coquillages, particulièrement bénéfique aux

premiers stades de cure. Ainsi, malgré une résistance initiale moindre, le béton à base de coquillages démontre un potentiel d'amélioration significative de ses propriétés mécaniques avec le temps [14][15].

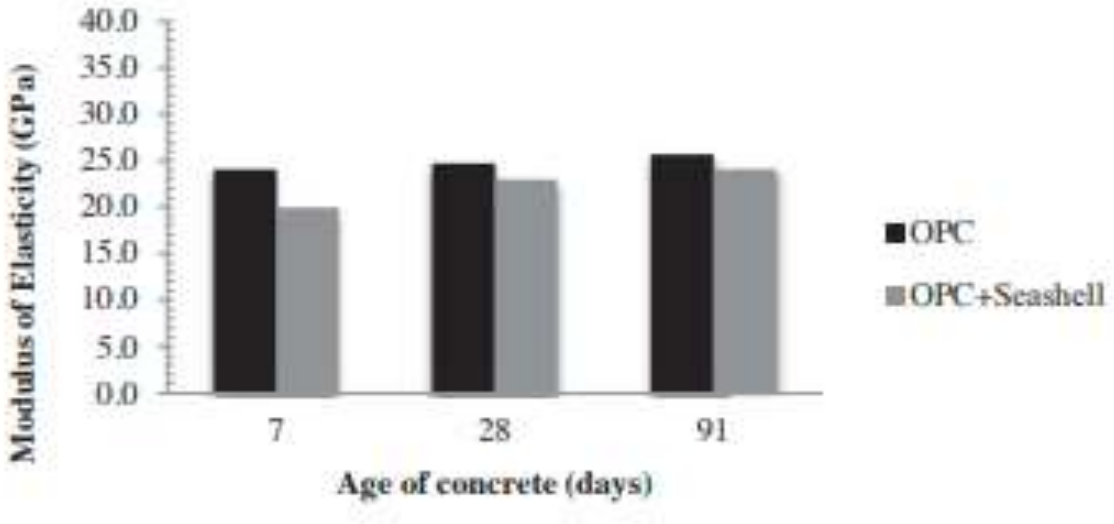


Figure 7 : Module d'élasticité du béton ordinaire et un béton contenant de la poudre de coquillages à 7, 28 et 91 jours[14].

I.4.2. Poudre de verre

La poudre de verre recyclée est principalement constituée d'oxyde de silicium (SiO_2), lui conférant une classification dans la famille des verres de type silico-sodocalcique. Cette composition riche en composants réactifs, incluant SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3, représente souvent plus de 70% de sa composition totale, surpassant ainsi les critères minimaux pour être considérée comme un matériau pouzzolanique selon les normes courantes. Cette caractéristique souligne le potentiel de la poudre de verre à contribuer efficacement aux propriétés pouzzolaniques lorsqu'elle est intégrée dans des mélanges cimentaires. La composition chimique de la poudre de verre, selon [16], se résument comme suit :

Tableau 2 : Composition chimique de la poudre de verre [16]

Composants	SiO_2	CaO	Na_2O	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	K_2O	SO_3
Pourcentages (%)	72,72	14,35	8,58	2,06	0,97	0,52	0,42	0,18	-

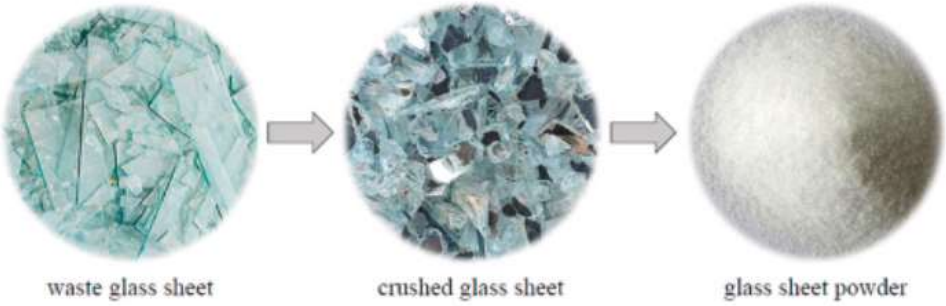


Figure 8 : Préparation de la poudre de verre recyclé [17].

La poudre de verre usagé (GP), considérée comme un matériau cimentaire supplémentaire prometteur, présente d'excellentes propriétés pouzzolaniques grâce à sa teneur élevée en silice. Cette caractéristique permet d'améliorer de manière significative les performances mécaniques et la durabilité du béton, en particulier lorsque les périodes de cure sont prolongées. L'incorporation de la poudre de verre dans le béton a montré une capacité à améliorer significativement la résistance à la pénétrabilité des ions chlorure, augmentant ainsi la durabilité du béton. La diminution de la pénétrabilité des ions chlorure résulte du raffinement des pores et des grains, et encore plus de la réaction pouzzolanique des ajouts. Les travaux récents ont démontré que la poudre de verre a la capacité d'améliorer considérablement la résistance à la pénétrabilité des ions chlorure, augmentant ainsi la durabilité du béton.[18]

Des recherches sur l'intégration de la poudre de verre recyclée (GPR) dans le béton comme substitut partiel au ciment révèlent une potentialité prometteuse pour améliorer la résistance à la compression et atténuer la réaction alcali-silice (ASR) [18][16][19]. Les études montrent qu'un remplacement jusqu'à 20% de poudre de verre ne diminue pas la résistance mécanique des mortiers et peut même égaler celle du ciment pur après 91 jours, illustrant l'efficacité du de poudre de verre en tant que matériau pouzzolanique. Les résultats indiquent également que le broyage optimal du de poudre de verre pour obtenir une granulométrie inférieure à celle du ciment est de quatre heures, soulignant l'importance de l'ajustement du processus de broyage pour maximiser l'efficacité de poudre de verre dans les applications de béton. AbderraoufBelkadi et al.,[20] ont constaté une amélioration significative de l'ouvrabilité des mortiers de ciment avec l'ajout de la poudre de verre recyclée, qui est proportionnelle au taux de substitution du ciment. Cette amélioration est due à la texture de surface de poudre de verre, qui diminue la friction entre les particules et améliore leur dispersion dans la matrice de ciment.

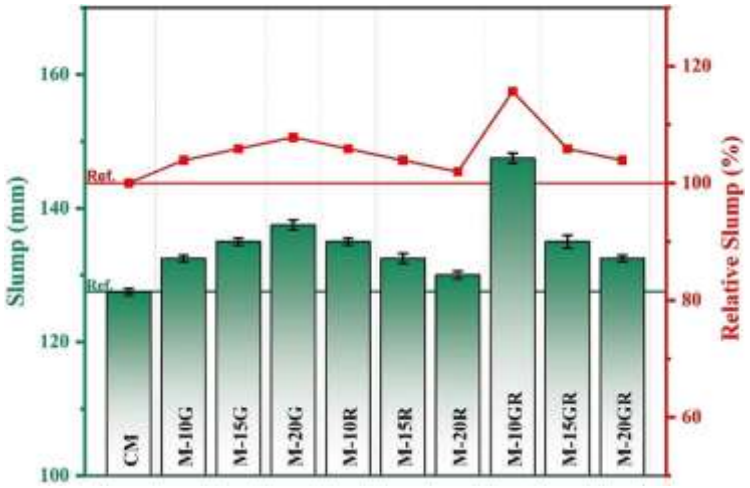


Figure 9 : Résultats du test d'affaissement pour différents mélanges de mortier avec ajout de poudre de verre (GP) [19].

À 7 jours, les mortiers contenant de la poudre de verre (GP) montrent une résistance à la compression inférieure à celle du mortier de contrôle. À 28 jours, certains mélanges avec GP présentent une légère augmentation de la résistance grâce à la finesse des particules qui accélère la réaction pouzzolanique, tandis que d'autres mélanges enregistrent des baisses de résistance due à une adhérence limitée entre le ciment et les particules de GP. À 90 jours, des augmentations significatives de la résistance sont observées, attribuées à l'accélération de la réaction pouzzolanique par la finesse des particules de GP[20].

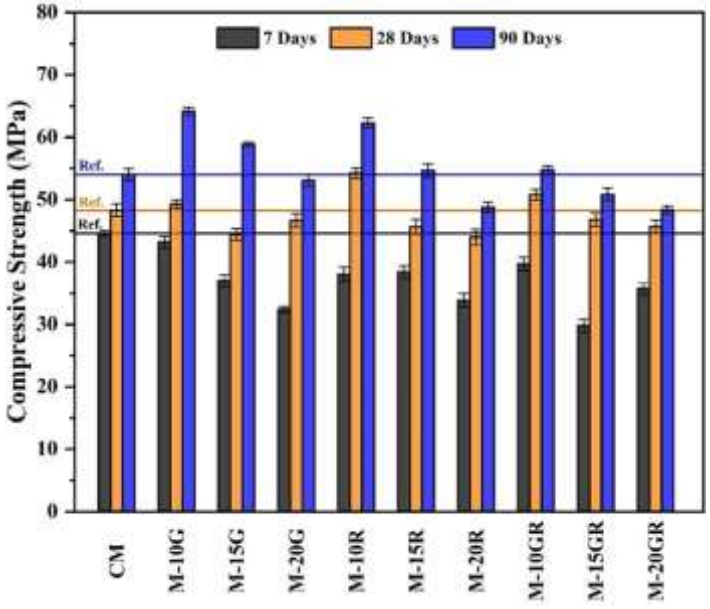


Figure 10 : Comparaison de la résistance à la compression des différents mélanges de mortier à 7, 28 et 90 jours[19].

I.4.3. Poudre de marbre

Le marbre, fréquemment utilisé dans la construction, génère d'importants déchets lors de son extraction, traitement et polissage, affectant l'environnement à hauteur de 70%. Ces déchets contribuent à divers problèmes environnementaux tels que la pollution de l'air, l'obstruction des égouts et la dégradation des terres agricoles. Toutefois, des recherches récentes ont mis en évidence que ces déchets de marbre, utilisés sous forme d'agrégat fin ou de poudre, peuvent améliorer esthétiquement, mécaniquement et écologiquement le béton.

La poudre de marbre est principalement composée de $CaCO_3$ (carbonate de calcium) [21]. La composition chimique de la poudre de marbre se présente comme suit :

Tableau 3 : Composition chimique de la poudre de marbre [5].

Composant chimique (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Cl
Pourcentages (%)	0,27	4,39	0,12	94,31	0,56	0,06	0,1



Figure 11 : poudre de marbre [5].

L'intégration de marbre dans le béton en tant que substitut au ciment ou comme agrégat fin améliore significativement ses propriétés de résistance et de durabilité, offrant ainsi une solution plus durable et écologique pour la production de béton [22]. Plusieurs études ont montré que l'utilisation du marbre en tant qu'agrégat fin est préférable en raison de sa nature inerte. Par rapport au béton fabriqué avec du marbre comme substitut de ciment, celui utilisant le marbre comme substitut de sable présente de meilleures caractéristiques [23]. L'ajout de 20% de poudre de marbre au mélange améliore la durabilité et la résistance à la carbonatation du béton, ainsi que sa capillarité. L'utilisation de déchets de marbre dans le

béton a également entraîné une augmentation de 20% de la résistance et une réduction de 30% du retrait [24].

I.4.4. Poudres de céramique

La poudre de déchets céramiques, issue de la découpe et du polissage des céramiques, représente un potentiel substitut partiel du ciment dans le béton. En 2018, plus de 22 milliards de tonnes de ces déchets ont été générées, souvent disposées en décharge, causant pollution de l'air, du sol et des eaux souterraines. Contenant des composants comme le dioxyde de silicium et l'oxyde d'aluminium, la poudre de céramique peut nuire à la faune et à la flore. Son intégration dans la production de béton pourrait cependant réduire ces impacts environnementaux en évitant l'accumulation en décharge [25][26].

Pour envisager l'utilisation de déchets de céramique comme substitut partiel du ciment dans la production de béton, il est essentiel de considérer leurs propriétés pouzzolaniques. Selon la norme ASTM C618-08a, un matériau est qualifié de pouzzolanique si la somme des pourcentages de SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 (S + A + F) dépasse 70 %, le contenu en SO_3 ne dépasse pas 3 %, et la perte au feu (LOI) reste inférieure à 10 %. Les analyses montrent que la composition chimique des déchets de céramiques est similaire à celle des pouzzolanes naturelles. Néanmoins, ces déchets provenant de différentes sources, une vérification préalable de leur réactivité pouzzolanique est recommandée avant leur utilisation comme matériau supplémentaire dans le ciment, afin d'assurer une performance adéquate et une compatibilité avec les normes existantes [25]. Le tableau ci-dessous montre la composition chimique de la poudre de déchets de céramique utilisée par divers auteurs pour produire du béton en remplaçant le ciment partiellement.

Tableau 4 : Composition chimique de poudre de céramique selon divers auteurs.

	Composants chimiques (%)							
Auteurs	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
[27]	70.88	18.32	1.11	1.23	3.50	0.02	1.82	3.12
[28]	65.80	22.20	0.60	0.10	-	-	-	-
[29]	71.03	18.22	2.59	0.57	-	-	-	-
[30]	69.40	18.20	0.73	1.24	-	-	-	-

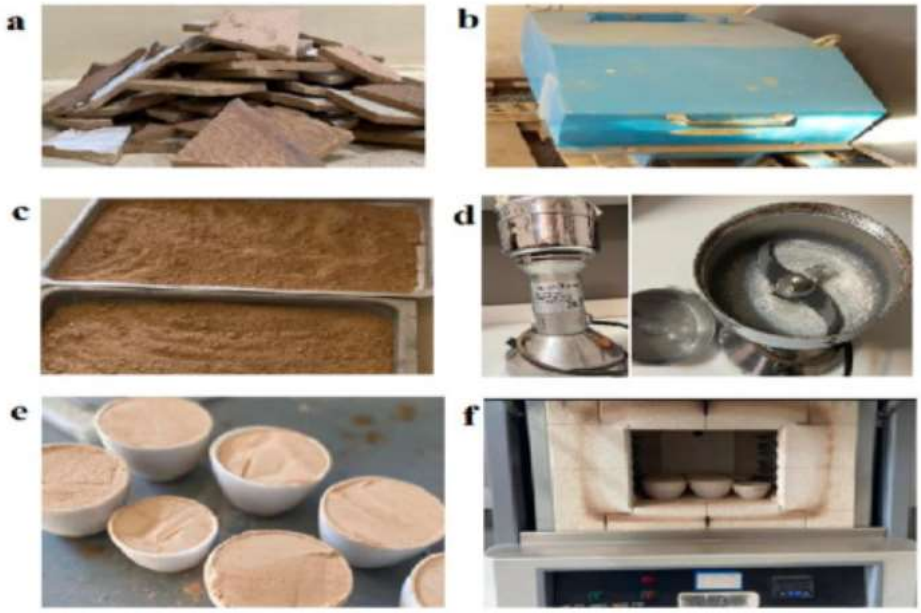


Figure 12 : Processus d'obtention de poudre de céramique (a) morceaux de déchets de céramique concassés (b) type de machine de concassage (c) particules de céramique de grosse taille (d) broyeur (e) poudre de déchets de céramique (CWP) (f) four à combustion [31].

L'utilisation de la poudre de déchets de céramique comme substitut partiel du ciment Portland affecte significativement les propriétés du béton. En intégrant de 10 à 40 % de celle-ci, les performances initiales en termes de résistance mécanique peuvent diminuer, mais les caractéristiques de durabilité telles que la résistance à la perméabilité et l'augmentation de la résistivité électrique s'améliorent. Les analyses microstructurales révèlent que la poudre de déchets de céramiques fonctionne principalement comme un matériau de remplissage, favorisant ainsi un système de particules denses. Malgré une activité pouzzolanique limitée aux premières étapes, elle devient plus notable après 28 jours, contribuant à la formation de silicates de calcium hydratés essentiels pour la résistance à long terme [30].

Li et al. ont exploré l'utilisation de la poudre de déchets de céramique comme substitut partiel du ciment dans le béton. Leurs résultats indiquent que remplacer 10% du ciment par de la poudre de céramique augmente la résistance à la compression de 8,75%, tandis que 20% de substitution réduit cette résistance de 10,3%. La fluidité du béton diminue également avec l'augmentation du taux de substitution, mais l'absorption d'eau reste dans des limites acceptables. De plus, l'amélioration de la conductivité thermique et la résilience aux dommages après une exposition au feu avec 20% de poudre de déchets de céramique démontrent la viabilité de cette substitution pour une production de béton plus durable et écologiquement responsable [32].

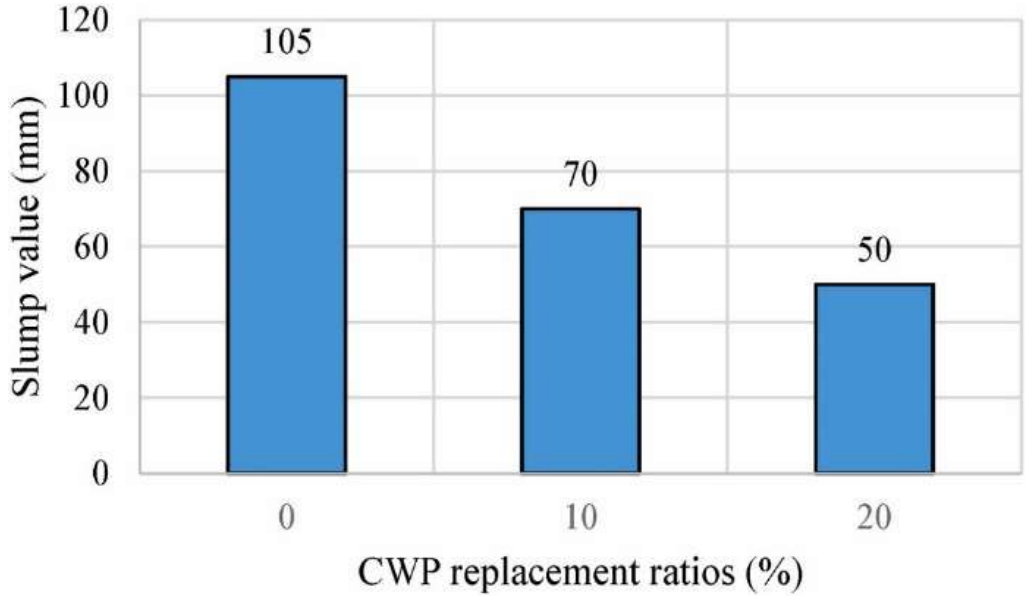


Figure 13 :Variation de l'affaissement du béton

avec les taux de substitution de la poudre de céramique.

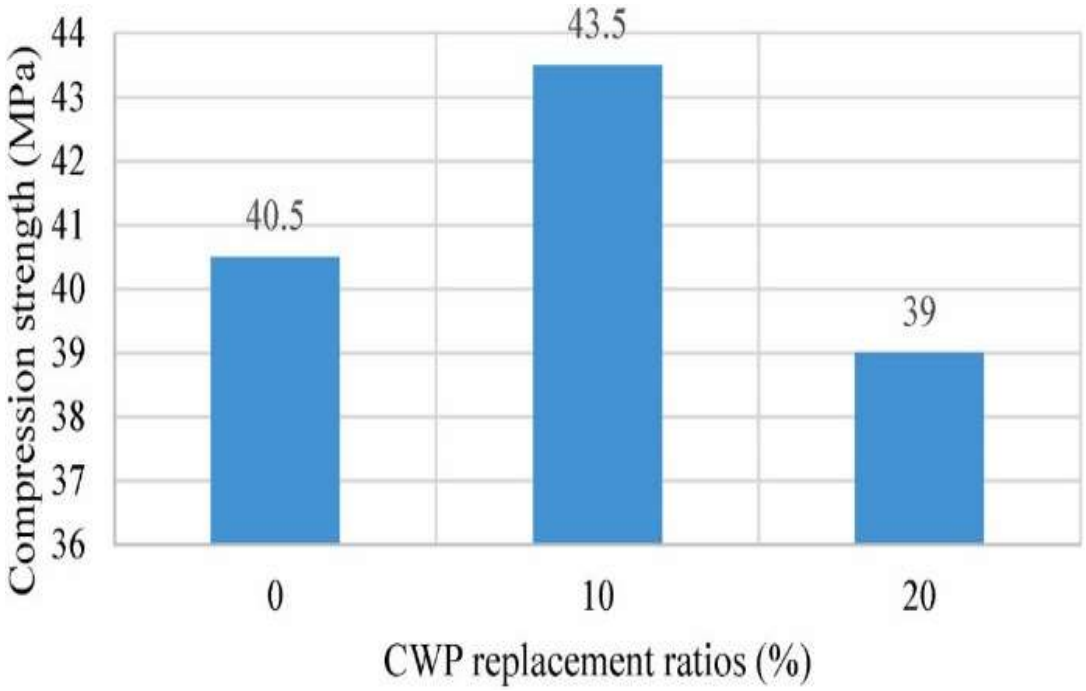


Figure 14 : Résistance à la compression du

béton en fonction du taux de substitution par la poudre de céramique.

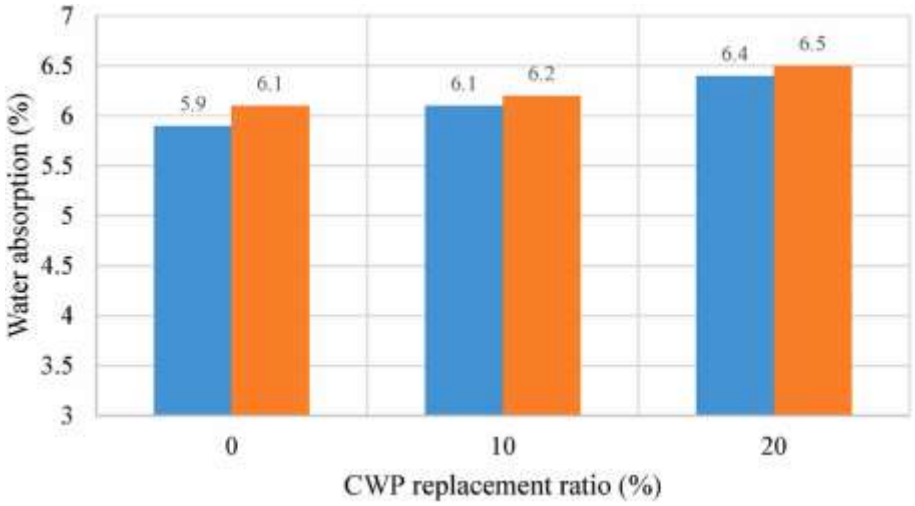


Figure 15 : Absorption d'eau du béton en fonction du taux de substitution par la poudre de céramique à 28 jours.

I.4.5. Poudre de granite

Le granite est une roche magmatique couramment utilisée dans la construction et la décoration en raison de sa robustesse et de son esthétique. Lors de sa transformation en produits finis, il génère des déchets constitués principalement de fines particules riches en silice. Cette silice joue un rôle clé dans l'amélioration des propriétés mécaniques, de la durabilité et de l'ouvrabilité du béton [33].

Abukersh et Fairfield [34] ont remplacé la poussière de déchets de granit jusqu'à 50 % et ont révélé que la résistance à la compression est affectée par un niveau de substitution plus élevé, bien que l'effet observé sur la résistance à la traction soit presque négligeable. Dans une étude expérimentale, Martins et al. [35] ont révélé que l'inclusion de déchets de granit améliorait la matrice de ciment et empêchait la pénétration des agents nocifs dans le béton. Les déchets de granit présentent une composition chimique relativement homogène, ce qui facilite leur incorporation en tant que pouzzolanes dans la fabrication du béton. Des études montrent que lorsque la granulométrie des déchets est plus fine que celle du ciment, cela entraîne une nette augmentation de la résistance aux chlorures pouvant aller jusqu'à 70% d'amélioration [36].

Dans ses travaux [37], Elmoaty a incorporé de la poudre de granit à des taux de 5%, 8%, 10% et 15% en substitution partielle du ciment dans la composition du béton. Cette étude a analysé l'effet de cette poudre sur les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et les produits d'hydratation. Les résultats ont montré une amélioration du temps avant fissuration par corrosion ainsi que des caractéristiques mécaniques pour un taux de remplacement de 5%. De plus, aucun changement significatif n'a été constaté au niveau de la microstructure, du degré d'hydratation et de la nature des produits d'hydratation suite à l'utilisation de la poudre de granit.

Tableau 5 : Composition chimique de poudre de céramique selon [38].

Composants chimiques (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	LOI
Pourcentage (%)	72.90	13.40	1.08	1.25	1.58	0.06	3.64	3.83	0.14	0.04	1.81

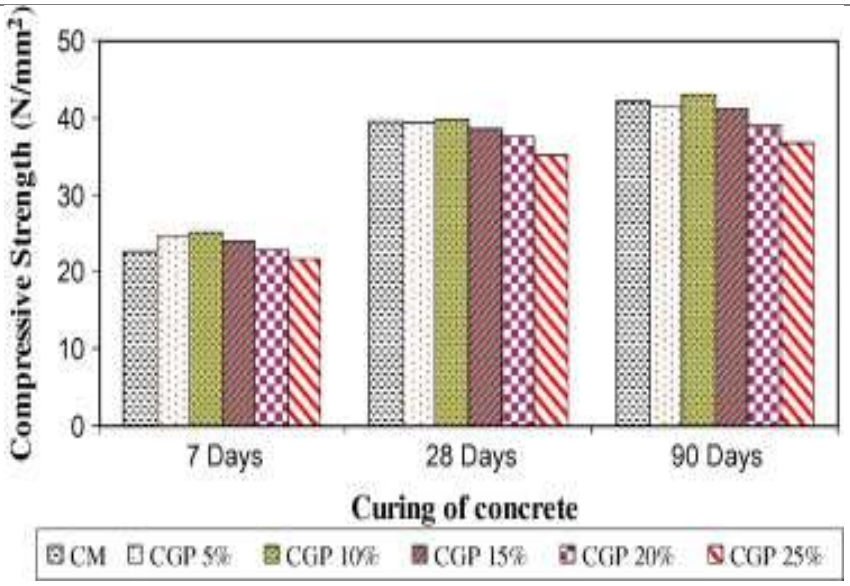


Figure 16 : Résistance à la compression des mélanges de béton à différents âges – comparaison[36].

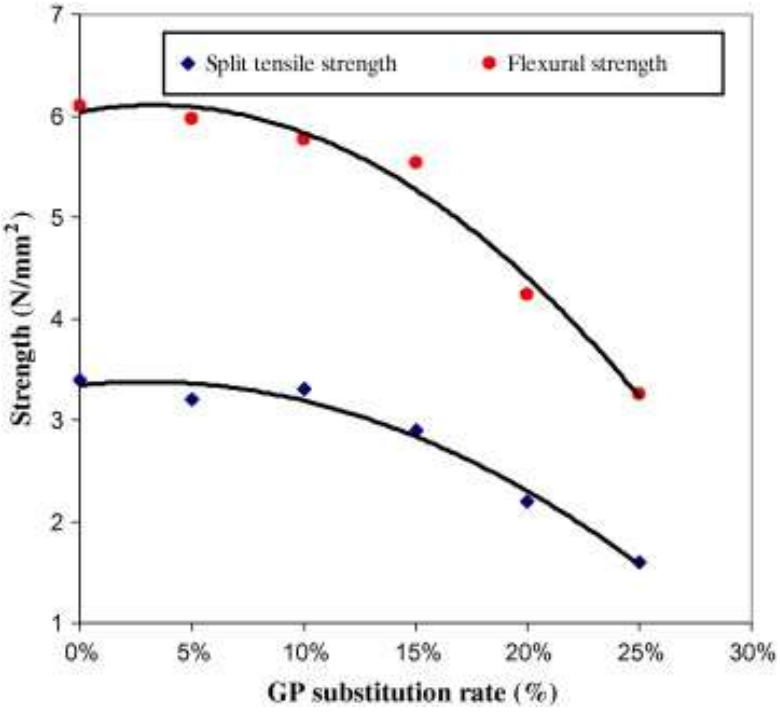


Figure 17 :
Relation entre les taux de substitution de GP et la résistance à la traction par fendage, la résistance à la flexion du béton GP [36].

I.5. Mécanismes d'action des substituts cimentaires

Les substituts cimentaires jouent un rôle crucial dans la réduction de l'empreinte carbone de l'industrie du ciment en réduisant la quantité de clinker utilisée dans la production de béton. Les substituts tels que la poudre de coquillage marin, la poudre de verre, la poudre de céramique et la poudre de granite sont souvent choisis pour leurs propriétés pozzolaniques ou en raison de leur contenu en composants réactifs tels que le calcaire ou la silice.

Les poudres substitutives du ciment dans le béton peuvent être classifiées principalement en deux catégories : matériaux siliceux et matériaux calcaires, en fonction de leur composition chimique principale et de leur mécanisme réactionnel dans le béton.

Les matériaux siliceux, tels que la poudre céramique et le verre, possèdent une forte teneur en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3), ce qui leur confère des propriétés pouzzolaniques. La poudre céramique, par exemple, réagit avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment pour former un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), qui améliore la résistance et la durabilité du béton. De même, le verre broyé, lorsque réduit à une taille de particule inférieure à 75 µm, réagit avec les hydrates de calcium pour former également des CSH, contribuant ainsi à l'amélioration de la microstructure du béton [39].

En intégrant des matériaux tels que la poudre de granite, qui agit aussi comme un remplissage pozzolanique, on observe une réaction similaire à celle des matériaux siliceux, bien que le granite soit généralement moins réactif que le verre ou la céramique. Il contribue néanmoins à la formation de CSH grâce à la réaction de ses composants minéraux avec l'hydroxyde de calcium, améliorant ainsi la densité et la résistance du béton [40].

D'autre part, les matériaux calcaires comme la poudre de coquillage sont riches en carbonate de calcium ($CaCO_3$), similaire au calcaire conventionnellement utilisé dans la production de ciment. Ces matériaux contribuent à rallonger le temps de prise du béton, ce qui est avantageux dans des climats chauds en permettant une meilleure maniabilité et une hydratation plus progressive du ciment. Les fines particules de ces poudres agissent comme un matériau de remplissage, réduisant la porosité et améliorant les propriétés mécaniques du béton [10].

Ces substitutions non seulement valorisent des déchets industriels, réduisant ainsi l'impact environnemental, mais améliorent également les propriétés physiques et durables du béton, contribuant à une construction plus écologique et durable.

I.6. Avantages environnementaux et durabilité

Les avantages environnementaux de l'utilisation de matériaux substitutifs dans le béton sont significatifs et s'alignent avec les objectifs de durabilité dans le secteur du génie civil. Les principaux avantages incluent la réduction de l'empreinte carbone et la valorisation des déchets solides, ainsi que l'amélioration de la durabilité du béton modifié.

I.6.1. Réduction de l'empreinte carbone et valorisation des déchets solides.

L'utilisation de déchets tels que la poudre de verre, de céramique, de coquillage et de granite comme substituts partiels du ciment dans le béton présente une double vertu écologique. Premièrement, cela permet de réduire la quantité de clinker de ciment Portland nécessaire, ce qui est directement lié à une réduction significative de l'empreinte carbone du béton. La fabrication de clinker est en effet une des principales sources d'émissions de CO2 dans l'industrie du bâtiment. Deuxièmement, la valorisation de ces déchets solides en les intégrant dans le béton contribue à la réduction des déchets envoyés en décharge, favorisant ainsi une économie circulaire où les matériaux sont réutilisés plutôt qu'éliminés.

I.6.2. Durabilité du Béton Modifié

Le béton modifié avec des additifs tels que les bio-composites cimentaires montre une amélioration notable de la résistance aux agressions chimiques et physiques, ce qui prolonge son cycle de vie et réduit le besoin de réparation ou de remplacement fréquent. Par exemple, l'intégration de poudre de coquillage peut augmenter la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure et à la corrosion, des problématiques courantes dans les environnements maritimes ou fortement salés. De même, la poudre de verre dans le béton améliore la résistance à la réaction alcali-silice, une autre forme d'agression chimique qui peut compromettre l'intégrité structurelle du béton.

En termes de durabilité, ces matériaux augmentent également la densité et la compacité du béton, réduisant la porosité et améliorant ainsi la résistance à de nombreux facteurs de dégradation environnementale tels que les cycles de gel/dégel et les attaques par les sulfates. L'ajout de ces matériaux peut également influencer positivement le comportement mécanique du béton à long terme, en améliorant les propriétés telles que la résistance à la compression et à la flexion au fil du temps.

Ces améliorations contribuent non seulement à la durabilité structurelle du béton mais favorisent également la durabilité environnementale en réduisant la fréquence des

interventions de maintenance et de remplacement, et en optimisant l'utilisation des ressources naturelles et des matériaux recyclés.

I.7. Défis techniques et économiques

Il existe plusieurs difficultés et défis majeurs associés à l'utilisation de sous-produits industriels tels que les déchets de poudre de céramique de porcelaine tendre et les déchets de coupe de granit dans le béton autoplaçant. Premièrement, la disponibilité et la cohérence de ces sous-produits peuvent constituer un défi. La qualité et les propriétés des sous-produits peuvent varier en fonction du procédé de fabrication, ce qui peut avoir un impact sur les performances du mélange de béton. Deuxièmement, la compatibilité des sous-produits avec d'autres composants du mélange de béton, tels que le ciment et les granulats, peut constituer un défi. Si la compatibilité n'est pas bien comprise, cela peut entraîner des problèmes tels qu'une mauvaise maniabilité, une résistance réduite et une susceptibilité accrue à la fissuration et à d'autres formes de détérioration. Troisièmement, il peut exister des obstacles réglementaires et juridiques à l'utilisation de sous-produits industriels dans les mélanges de béton. Celles-ci peuvent inclure des préoccupations liées à la santé et à la sécurité, à l'impact environnemental et aux questions de responsabilité. Enfin, des coûts supplémentaires peuvent être associés à l'approvisionnement, à la manipulation et à la transformation des sous-produits industriels destinés à être utilisés dans le béton. Cela peut inclure les frais de transport, les frais de stockage et les coûts de l'équipement et du personnel spécialisés pour le traitement des matériaux [41].

I.8. Perspectives et voies de recherche futures

Les perspectives et les voies de recherche futures dans le domaine des bio-composites cimentaires, des nouveaux matériaux et des technologies émergentes en génie civil révèlent un potentiel d'innovation significatif. La diversification des matériaux substitutifs tels que les poudres de verre, de céramique et de coquillage dans le béton illustre une étape prometteuse vers la réduction de l'empreinte carbone et l'amélioration de la durabilité des infrastructures. Ces matériaux, grâce à leurs propriétés pouzzolaniques, améliorent les propriétés mécaniques et la durabilité du béton tout en valorisant des déchets autrement destinés à l'enfouissement.

L'adoption d'une approche multidisciplinaire est cruciale pour le développement durable dans le génie civil. Cette approche permet l'intégration de compétences et de connaissances variées, allant de la chimie des matériaux et de la science de l'environnement à l'ingénierie

civile et à l'architecture, favorisant ainsi des innovations holistiques qui répondent aux exigences environnementales, économiques et fonctionnelles.

La recherche future devrait se concentrer sur le développement de normes et de protocoles pour l'évaluation et l'utilisation efficace des bio-composites cimentaires dans la construction. De plus, il est nécessaire de poursuivre le développement de technologies qui facilitent l'intégration de ces nouveaux matériaux dans les processus de construction existants, tout en assurant leur performance à long terme et leur acceptabilité sur le marché. En explorant ces avenues, le génie civil peut jouer un rôle pivot dans la conduite vers des constructions plus respectueuses de l'environnement tout en répondant aux besoins infrastructurels croissants.

I.9. Conclusion

En conclusion, l'analyse approfondie des développements récents dans le secteur des matériaux de construction durables, y compris les bio-composites cimentaires et divers substituts cimentaires, met en évidence une synergie notable entre l'innovation technologique et les exigences écologiques en génie civil. L'adoption de matériaux alternatifs tels que la poudre de verre, de céramique, de coquillage, et de granite contribue efficacement à la réduction de l'impact environnemental du secteur de la construction, tout en offrant d'importantes améliorations en termes de propriétés mécaniques et de longévité des infrastructures.

L'adoption d'une approche interdisciplinaire, qui intègre des avancées en chimie des matériaux, écologie industrielle, et ingénierie civile, est cruciale pour relever les défis liés à l'acceptation et à la performance à long terme de ces nouveaux matériaux. Le potentiel d'innovation dans les bio-composites cimentaires est particulièrement prometteur pour encourager une utilisation accrue de déchets industriels et naturels, réduisant ainsi la dépendance aux ressources non renouvelables et la production de déchets.

Il est essentiel de continuer à mener des recherches pour élaborer des normes et des méthodologies d'évaluation qui assureront la qualité et l'efficacité de ces matériaux novateurs. Le génie civil, grâce à ces innovations, ne se limite pas à répondre aux besoins techniques et économiques mais joue un rôle prépondérant dans la transition vers des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement. Cette transformation représente une réponse adéquate aux défis actuels de durabilité et trace de nouvelles pistes pour l'évolution future de l'industrie de la construction.

Chapitre 2 :

Matériaux et Essais

III.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux et les techniques expérimentales utilisées dans notre étude sur le béton de sable fluide (BSF). Une compréhension approfondie des matériaux et des méthodes est cruciale pour assurer la qualité et la fiabilité des résultats obtenus. En conséquence, nous avons structuré ce chapitre de manière à fournir une vue d'ensemble complète et détaillée de tous les aspects pertinents de notre investigation.

Dans une première partie, nous décrivons les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition du béton de sable fluide. Les matériaux de base incluent divers types de ciment, de sable, de granulats et d'additifs chimiques, chacun ayant un impact spécifique sur les propriétés mécaniques et physiques des bétons. Une attention particulière est accordée à la granulométrie des sables, à la nature et à la forme des granulats, ainsi qu'aux propriétés chimiques et physiques des ciments utilisés. La sélection rigoureuse de ces matériaux est essentielle pour garantir la performance optimale des bétons.

Ensuite, dans une seconde partie, nous exposons la méthode de formulation adoptée pour les différentes compositions des bétons de sable. Cette méthode comprend la détermination des proportions optimales des différents constituants en tenant compte des exigences spécifiques de chaque application. Nous discutons également des techniques de mélange et des procédures de préparation des échantillons en veillant à minimiser les variations et à garantir la reproductibilité des résultats. La méthode de formulation vise à obtenir un équilibre optimal entre la maniabilité du béton frais et les performances mécaniques du béton durci.

Enfin, nous présentons les essais réalisés au cours de notre investigation sur les mortiers et les composites obtenus à l'état frais et à l'état durci. Les différents essais effectués au cours de ce travail sont essentiels pour évaluer les performances des bétons dans diverses conditions d'utilisation. Les essais sur béton frais permettent de mesurer des propriétés telles que l'étalement, indicateurs clés de la maniabilité et de l'homogénéité du mélange. Une bonne maniabilité est cruciale pour assurer une mise en œuvre facile et une bonne compacité des bétons. Pour les bétons à l'état durci, les essais réalisés visent à évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. Parmi ces essais, la résistance à la compression est primordiale pour déterminer la capacité du béton à supporter des charges compressives, ce qui est crucial pour la stabilité et la sécurité des structures. La résistance à la traction, bien que généralement plus faible que la résistance à la compression, est également testée pour évaluer la capacité du béton à résister aux forces de traction qui peuvent provoquer des

fissures. La résistance à l'abrasion est un autre aspect important testé, notamment pour les surfaces de béton exposées à des conditions de frottement ou d'usure afin de garantir leur durabilité dans des environnements exigeants. En outre, les essais aux ultrasons permettent d'inspecter la qualité interne et l'intégrité du béton durci sans endommager l'échantillon, offrant ainsi une méthode de contrôle non destructif efficace. Des tests supplémentaires de porosité sont également effectués pour évaluer la perméabilité du béton à l'eau, ce qui est crucial pour sa durabilité. La conductivité thermique est testée pour comprendre la capacité du béton à conduire la chaleur, ce qui peut être important pour certaines applications spécifiques telles que les planchers chauffants ou les structures exposées à des variations thermiques. Ces essais garantissent ainsi la pérennité et la performance des structures construites.

En résumé, ce chapitre fournit une base solide pour comprendre les matériaux et les méthodes expérimentales utilisés dans notre étude, constituant ainsi un socle indispensable pour les analyses et les conclusions qui suivront.

III.1. Caractérisation des Matériaux Utilisés

Pour la fabrication du béton, nous avons eu recours à des matériaux locaux provenant de la wilaya de Médéa. Ces matériaux ont été soumis à une série de tests expérimentaux au sein du laboratoire de génie civil, afin de garantir leur conformité avec les normes et recommandations en vigueur. Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux ont été minutieusement évaluées pour assurer leur adéquation aux exigences spécifiques de notre projet de construction.

III.1.1.Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland artificiel CEM I, produit par la cimenterie LAFARGE, avec une résistance minimale à la compression de 42,5 MPa à 28 jours. Ce ciment inclut un ajout de calcaire, conforme à la norme [NA442].

Le tableau 10 résume l’Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment.

Tableau 6 : composition chimique du ciment.

Composition chimique (%)	CEM I
SiO2	23,73
Al2O3	7,05
Fe2O3	3,96
CaO	57,25
MgO	3,04
K2O	0,73
Na2O	0,53
SO3	2,66
LOI	2,05
P2O5	-

Tableau 7: L'analyse chimique du ciment et composition du clinker.

Analyse chimique Du ciment	**Perte au feu (%) (NA 5042) 7.00-9.50**	**7.00-9.50**
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C3A (%)	6.00-8.00



Figure 18 : ciment.

III.1.2.Granulats

III.1.2.1.Sable

Nous avons utilisé un sable de dune provenant de l'Oued Souf, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 11 La figure 5 illustre la courbe granulométrique du sable utilisé.

Tableau 8 : Propriétés physiques d'identification de sable utilisés.

Caractéristiques	Sable
Provenance	Oued souf
Classe granulaire	0/3
Module de finesse	2.23
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.63
Masse volumique apparent (g/cm3)	1.18
Equivalent de sable (%)	81
Taux d'absorption d'eau (%)	0.96
Compacité (%)	50
Porosité (%)	50

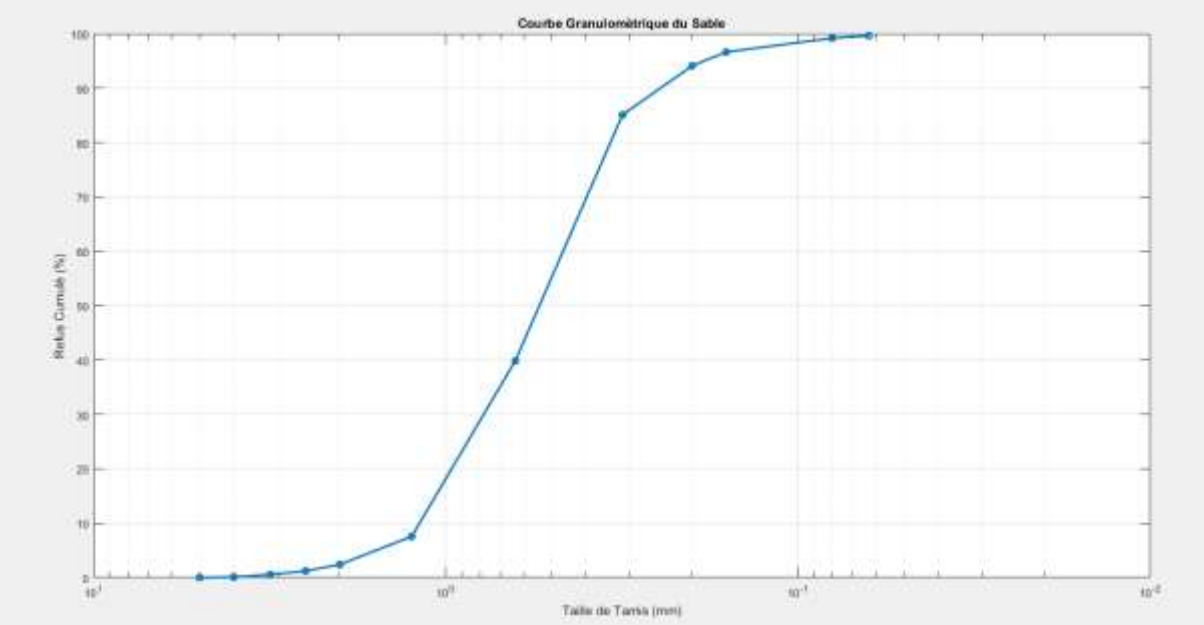


Figure 19 : Courbe granulométrique du sable utilisé.



Figure 20: Sable moyenne d'Oued sauf

III.1.3.Poudre de déchets de Granite

Les déchets de granite utilisés dans cette étude proviennent de l'usine de l'industrie du granite. Ces déchets, initialement sous forme de fragments et de chutes, ont été récupérés et soumis à un processus de préparation rigoureux pour être réutilisés de manière optimale.

Dans un premier temps, les fragments de granite récupérés sont acheminés vers une station de concassage, où ils sont réduits en morceaux plus petits grâce à des concasseurs à mâchoires et à impact. Cette étape permet de fragmenter efficacement les gros blocs de granite, facilitant ainsi les étapes ultérieures de broyage. Les fragments concassés sont ensuite transportés vers une unité de broyage, où ils sont transformés en une poudre fine avec une granulométrie inférieure à 80 µm à l'aide de broyeurs à boulets ou de broyeurs à cylindres. Le contrôle de la finesse est assuré par des tamis vibrants et des analyseurs granulométriques, garantissant ainsi une homogénéité parfaite de la poudre de granite obtenue. Cette poudre de granite a ensuite été incorporée comme substitut partiel du ciment dans la fabrication du béton de sable fluide. L'objectif principal de cette substitution est d'améliorer les propriétés mécaniques et environnementales du béton, tout en valorisant les déchets industriels. En effet, l'utilisation de la poudre de granite non seulement réduit la quantité de déchets envoyés en décharge, mais contribue également à la diminution de la consommation de ciment, un matériau énergivore à produire. Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de granite, telles que sa finesse et sa composition minérale, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la performance du béton. La granulométrie inférieure à 80 µm assure une bonne réactivité et une intégration homogène dans la matrice cimentaire, ce qui peut conduire à une amélioration de la compacité et de la résistance du béton de sable fluide.



Figure 21 : Processus de préparation de la poudre de granite

Le tableau 4 présente les propriétés physiques de la poudre de granite utilisée dans cette étude. La classe granulaire de la poudre de granite est de 0/3, ce qui indique une granulométrie fine et bien définie. La surface spécifique de cette poudre est de 4000 cm²/g, reflétant sa grande finesse et sa capacité à améliorer la réactivité au sein de la matrice cimentaire. La masse volumique absolue de la poudre de granite est de 3,12 g/cm³, ce qui témoigne de sa densité élevée et de son potentiel à contribuer à la compacité et à la résistance du béton de sable fluide. Ces caractéristiques physiques sont essentielles pour optimiser les propriétés mécaniques et environnementales du béton, assurant une bonne intégration et une performance améliorée de la poudre de granite dans la composition du matériau.

Tableau 9 : Propriétés physiques de la poudre de granit.

Caractéristique	
Classe granulaire	0/3
Surface spécifique (cm^2/g)	4000
Masse volumique absolue (g/cm^3)	3.12

III.1.4.Poudre de déchets de Céramique

Les déchets de céramique utilisés dans cette étude proviennent d'une usine de l'industrie céramique. Ces déchets, initialement sous forme de fragments et de chutes, ont été récupérés et soumis à un processus de préparation rigoureux pour leur réutilisation optimale. Dans un premier temps, les fragments de céramique récupérés sont acheminés vers une station de concassage, où ils sont réduits en morceaux plus petits grâce à des concasseurs à mâchoires et à impact, permettant de fragmenter efficacement les gros blocs de céramique et facilitant les étapes ultérieures de broyage. Ensuite, ces fragments concassés sont transportés vers une unité de broyage, où ils sont transformés en une poudre fine avec une granulométrie inférieure à 80 µm, à l'aide de broyeurs à boulets ou de broyeurs à cylindres. Le contrôle de la finesse est assuré par des tamis vibrants et des analyseurs granulométriques, garantissant ainsi une homogénéité parfaite de la poudre de céramique obtenue.

Cette poudre de céramique a ensuite été incorporée comme substitut partiel du ciment dans la fabrication du béton de sable fluide. L'objectif principal de cette substitution est d'améliorer les propriétés mécaniques et environnementales du béton, tout en valorisant les déchets industriels. En effet, l'utilisation de la poudre de céramique permet non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais aussi de diminuer la consommation

de ciment, un matériau énergivore à produire. Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de céramique, telles que sa finesse et sa composition minérale, jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances du béton. La granulométrie inférieure à 80 µm assure une bonne réactivité et une intégration homogène dans la matrice cimentaire, ce qui peut conduire à une amélioration de la compacité et de la résistance du béton de sable fluide.



Figure 22 : Processus de préparation de la poudre de céramique.

Le tableau 5 présente les propriétés physiques de la poudre de céramique utilisée dans cette étude. La classe granulaire de la poudre de céramique est de 0/3, indiquant une granulométrie fine et homogène. La surface spécifique de cette poudre est de 4000 cm²/g, ce qui témoigne d'une grande finesse et d'une capacité à améliorer la réactivité dans la matrice cimentaire. La masse volumique absolue de la poudre de céramique est de 2,56 g/cm³, reflétant sa densité et sa capacité à contribuer efficacement à la compacité du béton de sable fluide. Ces caractéristiques physiques jouent un rôle crucial dans l'optimisation des propriétés mécaniques et environnementales du béton, en assurant une bonne intégration de la poudre de céramique dans la matrice cimentaire.

Tableau 10 : Propriétés physiques de la poudre de céramique.

Caractéristique	
Classe granulaire	0/3
Surface spécifique (cm^2/g)	4000
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.56

III.1.5.Poudre de coquillage

Les déchets de coquillages utilisés dans cette étude ont été minutieusement collectés sur les plages du littoral algérien. Après leur collecte, les échantillons ont été ramenés au laboratoire où ils ont subi plusieurs cycles de lavage intensif pour les purifier et éliminer toutes les impuretés. Ce processus de nettoyage approfondi est essentiel pour garantir la qualité et la pureté de la matière première.

Ensuite, les coquillages nettoyés ont été placés dans une étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures pour assurer une dessiccation complète. Cette étape de séchage est cruciale pour éliminer toute trace d'humidité, ce qui pourrait affecter les propriétés physiques et mécaniques de la poudre obtenue.

Une fois bien séchés, les coquillages ont été broyés pour obtenir une poudre fine. Ce broyage a été suivi d'un tamisage à travers un tamis de 80 µm pour homogénéiser la taille des particules, garantissant ainsi une granulométrie uniforme.



Figure 23 : préparation de la poudre de coquillage.

Le tableau ci-dessous présente les propriétés physiques de la poudre de coquillages obtenue :

Tableau 11 : Propriétés physiques de la poudre de coquillage.

Caractéristique	
Classe granulaire	0/3
Surface spécifique (cm^2/g)	4000
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.73

La classe granulaire de 0/3 indique une granulométrie fine et uniforme, idéale pour son incorporation dans le béton de sable fluide. La surface spécifique de 4000 cm²/g témoigne de la grande finesse de la poudre, permettant une réactivité optimale dans la matrice cimentaire. La masse volumique absolue de 2,56 g/cm³ reflète la densité adéquate de la poudre de coquillages, contribuant à la compacité et à la performance mécanique du béton.

Ces caractéristiques physiques jouent un rôle crucial dans l'optimisation des propriétés mécaniques et environnementales du béton. L'incorporation de la poudre de coquillages dans la matrice cimentaire améliore la compacité, la durabilité et la résistance du béton de sable fluide. De plus, l'utilisation de ces déchets marins comme substitut partiel du ciment valorise des matériaux naturels et contribue à la réduction de l'empreinte environnementale de la construction, tout en offrant une solution durable et efficace pour la gestion des déchets de coquillages.

III.1.6.Poudre de déchets de verre

Les déchets utilisés dans notre étude proviennent de la récupération de verre, principalement des pare-brise rejetés dans la nature. Après leur collecte, ces déchets de verre ont été soumis à un processus de traitement rigoureux pour les rendre aptes à une utilisation dans le béton de sable fluide.

Tout d'abord, les morceaux de verre récupérés ont été concassés pour les réduire en fragments plus petits. Ensuite, ces fragments ont été broyés afin d'obtenir une poudre fine et homogène. Ce broyage minutieux permet d'augmenter la réactivité du verre lorsqu'il est incorporé dans la matrice cimentaire.

Le processus s'est poursuivi par un tamisage, garantissant une granulométrie uniforme et fine, nécessaire pour une bonne intégration dans le béton. Le granulat de verre ainsi obtenu a été soigneusement analysé pour vérifier sa compatibilité et son efficacité en tant que substitut partiel du ciment.

L'incorporation de ce granulat de verre dans le béton de sable fluide vise à améliorer les propriétés mécaniques du matériau tout en apportant une dimension écologique significative. En remplaçant partiellement le ciment, matériau énergivore à produire, par du verre recyclé, nous contribuons non seulement à la réduction de l'empreinte carbone de la construction, mais aussi à la valorisation de déchets qui autrement pollueraient l'environnement.

Ce procédé permet également de tirer parti des propriétés spécifiques du verre, telles que sa durabilité et sa capacité à renforcer la structure du béton. Ainsi, l'utilisation de granulat de verre dans le béton de sable fluide offre une solution innovante et durable, alliant performance technique et respect de l'environnement.



Figure 24 : Processus de préparation de la poudre de verre

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques physiques de la poudre de verre utilisée dans cette étude. La poudre de verre, obtenue à partir de la récupération et du traitement des déchets de verre, a été analysée pour déterminer ses propriétés essentielles en vue de son utilisation comme substitut partiel du ciment dans le béton de sable fluide.

Tableau 12 : Propriétés physiques de la poudre verre.

Caractéristique	
Classe granulaire	0/3
Surface spécifique (cm^2/g)	2000
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.63

III.1.7.Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons provient du robinet et est considérée comme potable, ce qui signifie qu'elle est dépourvue de toute impureté pouvant nuire à la qualité du béton. Cette eau respecte les exigences de la norme NF EN 1008, garantissant ainsi sa conformité pour les applications dans la construction. En outre, la température de cette eau est soigneusement contrôlée, se situant entre 18 et 20°C, ce qui est optimal pour assurer une bonne prise et durabilité du béton. Cette attention particulière à la qualité et à la température de l'eau de gâchage contribue de manière significative à la performance finale du béton, en assurant sa résistance et sa longévité.

III.1.8.Super plastifiant

Afin de garantir une ouvrabilité optimale du béton, nous avons utilisé un superplastifiant de haute performance, un réducteur d'eau à base de polycarboxylate d'éther. Ce produit, formulé à partir de polymères de synthèse avancés, est commercialisé par la société SikaCem sous le nom de "Tempo 10".



Figure 25: Superplastifiant tempo 10.

Tableau 13 : Propriétés physiques de super-plastifiant.

Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 – 6.5
Densité	1.07 ± 0.01
Teneur en chlore	< 0.1 g/L
Extrait sec	30%

III.1.9.Poudre de marbre

Les déchets de marbre utilisés dans cette étude proviennent de marbreries industrielles. Après leur récupération, ces déchets, initialement sous forme de fragments et de chutes, subissent un processus de préparation rigoureux pour une réutilisation optimale. Les fragments de marbre sont d'abord acheminés vers une station de concassage, où ils sont réduits en morceaux plus petits grâce à des concasseurs à mâchoires et à impact. Cette étape permet de fragmenter efficacement les gros blocs de marbre, facilitant ainsi les étapes ultérieures de broyage et assurant une taille de particules appropriée pour les utilisations futures.

Ensuite, les fragments concassés sont transportés vers une unité de broyage, où ils sont transformés en une poudre de marbre fine. Ce processus minutieux, réalisé avec des équipements de pointe, permet d'obtenir une poudre de marbre de haute qualité, avec une surface spécifique de 3000 cm^2/g. La finesse de la poudre est contrôlée à l'aide de tamis vibrants et d'analyseurs granulométriques, garantissant ainsi une homogénéité parfaite du produit final. Ce contrôle strict de la granulométrie assure que la poudre de marbre répond aux normes de qualité requises pour diverses applications industrielles.

De plus, le processus de transformation des déchets de marbre en poudre fine s'inscrit dans une démarche de développement durable, réduisant ainsi l'impact environnemental des déchets de marbrerie. En valorisant ces déchets, l'industrie contribue non seulement à la réduction des déchets, mais aussi à la conservation des ressources naturelles en fournissant une matière première alternative pour diverses utilisations, telles que la production de matériaux de construction, la fabrication de revêtements de sol et d'autres applications décoratives. Ce cycle de valorisation des déchets de marbre illustre parfaitement l'intégration des principes de l'économie circulaire dans l'industrie de la marbrerie.



Figure 26 : poudre de marbre.

III.2. Formulation du béton de sable fluide

L'objectif de cette formulation est de déterminer la quantité optimale de chaque matériau entrant dans la composition du béton de sable fluide (BSF) afin d'obtenir des propriétés mécaniques et physiques spécifiques. Cette étude se concentre principalement sur l'influence de la poudre de divers déchets – coquillage (PCQ), verre (PV), céramique (PCR) et granite (PGR) - utilisés en substitution partielle du ciment, sur les caractéristiques du béton de sable fluide à l'état frais et durci.

Nous cherchons à évaluer comment l'incorporation de ces poudres de déchets affecte les propriétés rhéologiques et mécaniques du BSF. À l'état frais, nous analyserons la maniabilité, la fluidité et la temps de prise du béton. À l'état durci, nous nous intéresserons à la résistance à la compression, à la traction, à la flexion, ainsi qu'à la durabilité et à la perméabilité du béton. L'objectif est de comprendre si ces substitutions partielles peuvent non seulement conserver, mais aussi améliorer les performances du béton par rapport à un béton conventionnel.

De plus, cette approche s'inscrit dans une démarche de développement durable, en visant à valoriser des déchets industriels et à réduire la consommation de ciment, un matériau à fort impact environnemental. En intégrant des poudres de déchets, nous contribuons à la réduction des déchets et à la préservation des ressources naturelles, tout en explorant des voies pour améliorer les performances du béton. Cette étude pourrait ouvrir la voie à de nouvelles pratiques de construction plus écologiques et économiquement viables.

Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, filer, eau et adjuvant, nousnous sommes basés sur le rapport E/(C+F)= 0.4.

Lesdifférentes compositions sont présentées dans le tableau suivant :

%	**Sable**	**Filler**	**Ciment**	**Eau**	SSP	**Sp %**
0	1400	200	400	240		0,8
5	1400	200	380	240	20	0,8
10	1400	200	360	240	40	0,8
15	1400	200	340	240	60	0,8
20	1400	200	320	240	80	0,8

%	Sable	Filler	Ciment	Eau	GP	Sp %
0	1400	200	400	240		0,8
5	1400	200	380	240	20	0,8
10	1400	200	360	240	40	0,8
15	1400	200	340	240	60	0,8
20	1400	200	320	240	80	0,8

%	Sable	Filler	Ciment	Eau	GP	Sp %
0	**1400**	**200**	**400**	**240**		**0,8**
5	**1400**	**200**	**380**	**240**	**20**	**0,8**
10	**1400**	**200**	**360**	**240**	**40**	**0,8**
15	**1400**	**200**	**340**	**240**	**60**	**0,8**
20	**1400**	**200**	**320**	**240**	**80**	**0,8**

Tableau 14 : les composantes des bétons formulés à base des déchets de granite.

%	Sable (kg/m^3)	Filler (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)	PGR (kg/m^3)	Sp %
0	1400	200	400	240		0,8
5	1400	200	380	240	20	1,2
10	1400	200	360	240	40	1,4
15	1400	200	340	240	60	1,6
20	1400	200	320	240	80	1,8

Tableau 15 : les composantes des bétons formulés à base des déchets de céramique.

%	Sable (kg/m^3)	Filler (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)	PCR (kg/m^3)	Sp %
0	1400	200	400	240		0,8
5	1400	200	380	240	20	1,2
10	1400	200	360	240	40	1,4
15	1400	200	340	240	60	1,6
20	1400	200	320	240	80	1,8

La composition du béton de sable pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode expérimentale du projet SABLOCRETE de 1994. Les déchets de coquillage, granit,céramique et verre sont incorporés dans la masse du béton de sable par substitution massique du ciment.

III.2.1.Séquence de malaxage du béton

Pour obtenir un mélange homogène, suivez les étapes ci-dessous :

- Malaxage à sec : Mélanger à sec le ciment, le sable, le filler de marbre et les déchets de coquillage,granit,verre et céramique pendant 30 secondes à l'aide d'un malaxeur .
- Ajout d'eau initial : Ajouter la première quantité d'eau (w1 = 70% de l'eau totale) et mélanger pendant 1 minute.
- Ajout d'eau et superplastifiant : Ajouter le restant de l'eau de gâchage (w2 = 30% de l'eau totale) mélangée avec le superplastifiant, et Malaxer pendant 1 minute.
- Repos du mélange : Laisser le mélange reposer pendant 3 minutes.
- Malaxage final : Malaxer à nouveau le mélange pendant 1 minute.

Cette séquence de malaxage est appliquée de manière identique pour tous les mélanges de béton de sable fluide.

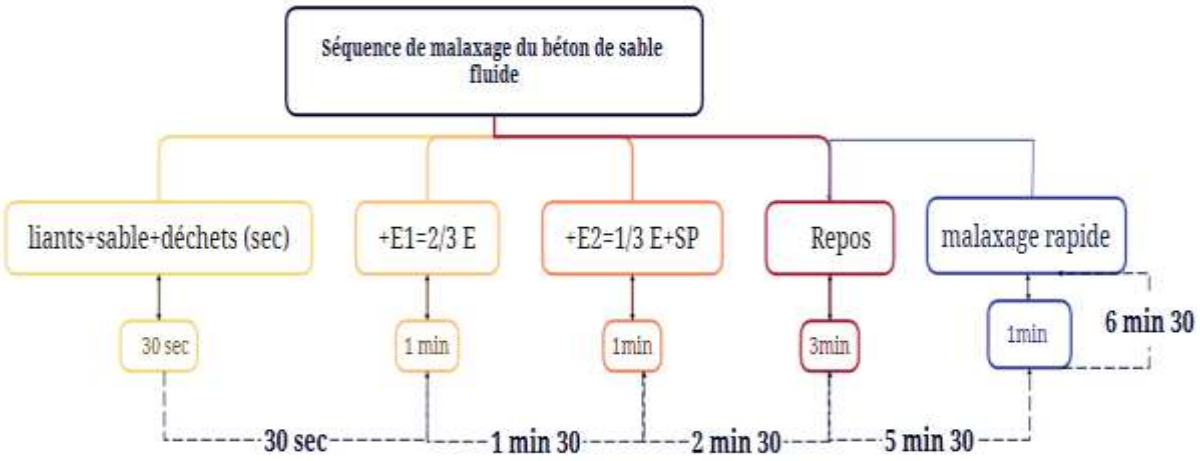


Figure 27: Séquence de malaxage du béton de sable fluide.



Figure 28: protocole de malaxage.

III.2.2.Préparation et conservation des éprouvettes

Les différents types de bétons de sable fluide sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le béton de sable fluide a été coulé dans des moules métalliques de forme prismatiques **4x4x16cm** destinées aux essais de compression conformément à la norme NFEN12390-2.

La conservation des éprouvettes de béton dans l'eau, également connue sous le nom de cure, est une étape cruciale pour assurer le développement optimal des propriétés mécaniques du béton. Après le démoulage, les éprouvettes sont immergées dans un bain d'eau à une température contrôlée, généralement autour de 20°C. Cette immersion permet d'éviter la perte d'humidité du béton, assurant ainsi une hydratation continue du ciment. La cure dans l'eau favorise le durcissement et améliore la résistance du béton, minimisant les risques de fissuration et de retrait. Cette méthode est maintenue pendant une période spécifique, souvent 28 jours, pour garantir que le béton atteigne ses performances maximales.



Figure 29: Préparation et conservation des éprouvettes.

III.3. Essais réalisés sur le BSF

III.3.1.Etat frais

III.3.1.1.L'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre d'étalement du mortier est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure 15 montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône selon la recommandation NF EN 12350-8.



Figure 30: Mesure de l'étalement du béton de sable fluide.

III.3.1.2.Densité

La densité des mélanges a été calculée en fonction de l'échantillon introduit dans le moule de volume (V= 1 L) est déterminée suivant la norme NF EN 12350-6



Figure 31: Mesure de la densité du béton.

III.3.2.Etat durci

III.3.2.1.Essais de compression

Larésistanceàlacompressionaétémesuréeselonlanorme**[NFEN196-1**]parcompressionaxialepourdemi-prismed'éprouvettesprismatiquesdedimensions4×4×16cm,à 7, 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN conforme àlanorme [**NFP 18-412**]



Figure 32: Dispositif de mesure de la résistance à la compression.

III.3.2.2.Essais de traction

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme [**EN196-1**]. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (Par trois points), une éprouvette prismatique **(4x4x16)** cm de côté **a** et de longueur **L**.



Figure 33: Dispositif de mesure de la résistance à la traction.

III.3.2.3.Conductivité thermique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesurés à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme ISO 8497-1

Le CT METRE Norme de référence NF EN 993-15

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.



Figure 34: Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique.

III.3.2.4.Essai ultrasonique

Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage pour chaque éprouvette. Les essais à l'ultrason ont été effectués en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection. Sur les faces opposées de l'éprouvette on a placé les deux transducteurs en interposant entre eux une couche mince de vaseline, puis l'enregistrement du temps de transit en micro seconde est réalisé.La figure 19 montre les étapes de l'essai. NF EN 12504-4.

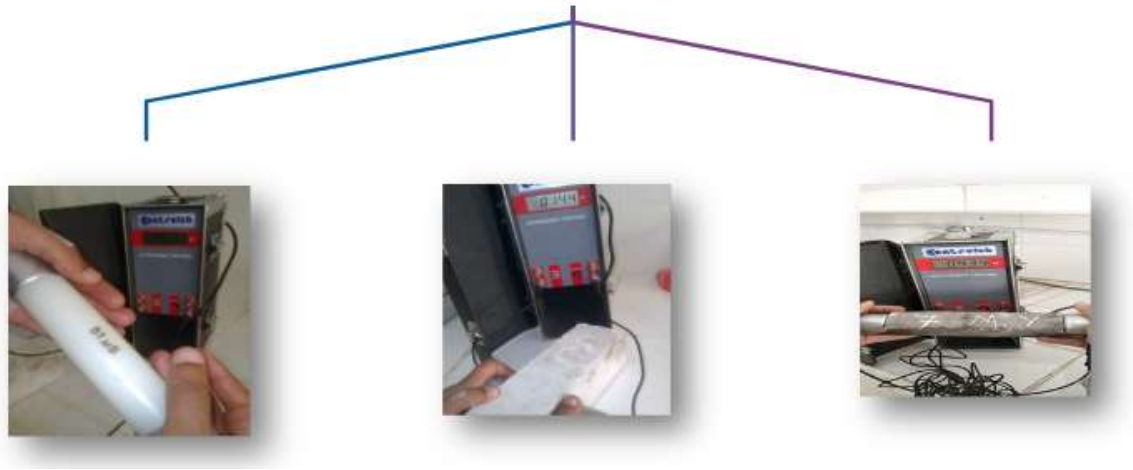


Figure 35: Etalonnage et mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores.

III.3.2.5.La densité apparente à l'état durci

La densité est déterminée en plaçant l'éprouvette de béton à l'état durci sur une balance afin de mesurer sa masse, conformément à la norme NF EN 206/CN.



Figure 36: densité apparente à l'état durci.

III.3.2.6.La porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau du matériau peut être déterminée par pesée hydrostatique. Les essais de porosité accessible à l'eau sont effectués selon le mode opératoire AFPC-AFREM [AFPC, 1997] sur des éprouvettes de béton. Les éprouvettes sont placées dans un dessiccateur sous vide pendant 4 heures, puis saturées dans l'eau sous vide pendant une durée de 24 heures. Les échantillons sont ensuite soumis à une pesée hydrostatique pour évaluer

leur masse (Meau) et à une pesée dans l'air, après avoir essuyé leur surface, qui est assimilée à la masse saturée en eau (Mair). Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve, et la masse finale obtenue (Msec) correspond à l'état sec du matériau, selon la norme NF P18-459. La porosité accessible à l'eau calculée par l'équation :

$$\varepsilon\% = \frac{(\text{Mair} - \text{Msec})}{(\text{Mair} - \text{Meau})}$$

Avec

ε : La porosité accessible à l'eau en %

Mair : la masse de l'éprouvette saturée d'eau pesée dans l'air (en g)

Meau : la masse de l'éprouvette saturée d'eau pesée dans l'eau (en g)

Msec : la masse de l'éprouvette sèche pesée dans l'air (en g)



Figure 37: Essai de Porosité accessible à l'eau.

III.3.2.7.Absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion est une mesure importante des propriétés d'un matériau cimentaire, indiquant sa porosité et sa capacité à retenir l'eau. Ce test consiste à immerger des échantillons de béton durci dans l'eau et à mesurer l'augmentation de masse due à l'absorption d'eau.Les éprouvettes de béton sont d'abord séchées à l'étuve jusqu'à atteindre une masse constante, puis refroidies à température ambiante. Elles sont ensuite immergées dans l'eau pendant une période définie, souvent 24 ou 48 heures, pour permettre une absorption maximale de l'eau. Après l'immersion, les échantillons sont retirés, la surface est essuyée pour enlever l'excès d'eau, puis les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse saturée.

L'absorption d'eau par immersion est calculée en pourcentage selon la formule suivante :

$$A\% = \frac{(\text{Msat} - \text{Msec}) * 100}{\text{Msec}}$$

Où :

Msat : est la masse de l'éprouvette après immersion (en g).

Msec : est la masse de l'éprouvette sèche (en g).

Cette méthode permet de déterminer la quantité d'eau que le béton peut absorber et est conforme à la norme **NF P18-554**. Cette norme spécifie les conditions et les procédures pour mesurer l'absorption d'eau par immersion des matériaux cimentaires, garantissant des résultats précis et reproductibles.



Figure 38: Essai absorption d'eau par immersion.

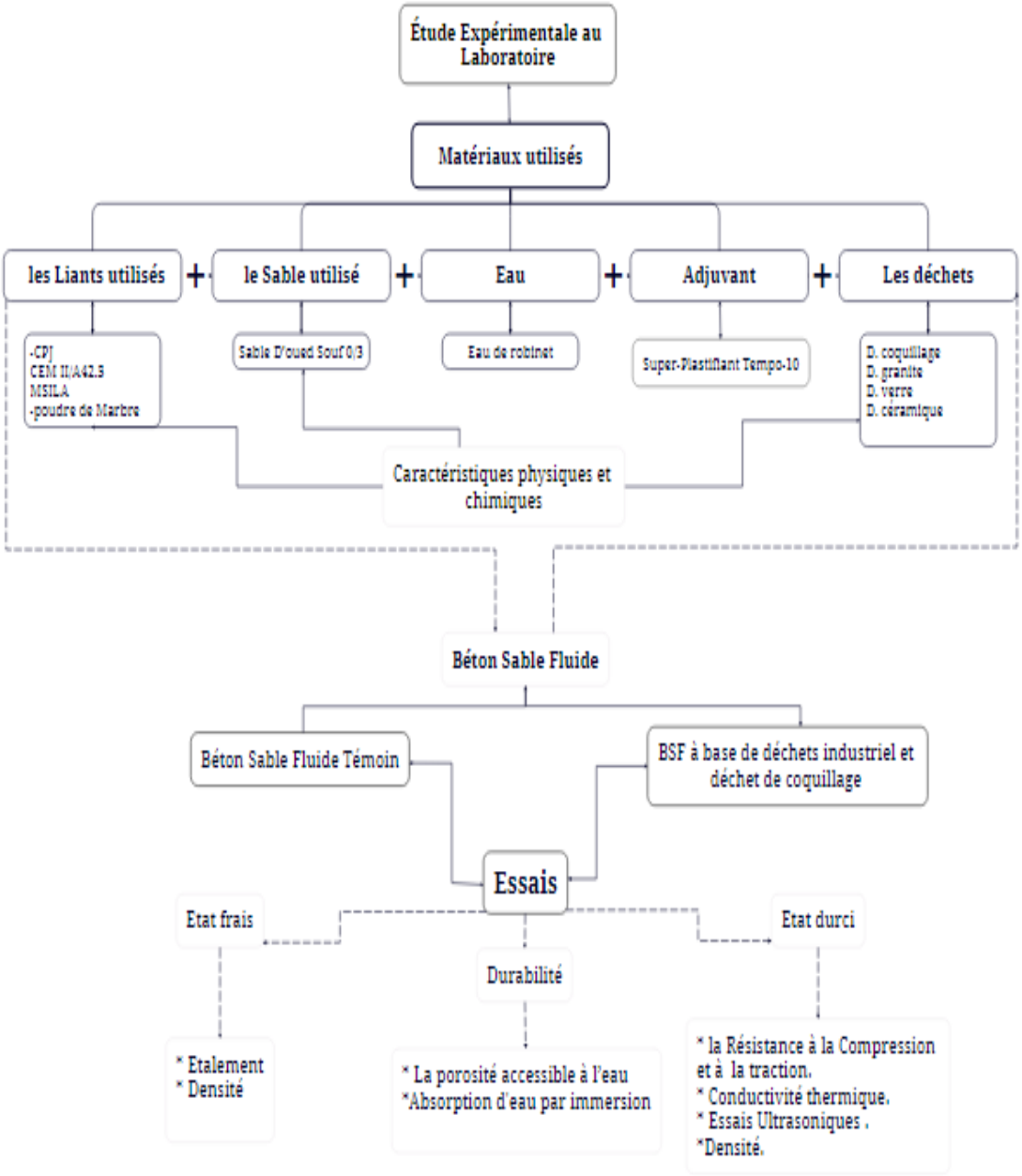


Figure 39: protocole expérimental.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a fourni une présentation détaillée des matériaux et des techniques expérimentales utilisées dans notre étude sur le béton de sable fluide (BSF). L'analyse minutieuse des matériaux de base, incluant divers types de ciment, de sable, de granulats et d'additifs chimiques, est essentielle pour garantir la performance optimale des bétons. En accordant une attention particulière à la granulométrie, à la nature des granulats et aux propriétés physico-chimiques des ciments, nous avons pu sélectionner rigoureusement les matériaux nécessaires à la fabrication du BSF.

La méthode de formulation adoptée vise à déterminer les proportions optimales des différents constituants pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application. Cette méthode, accompagnée des techniques de mélange et des procédures de préparation des échantillons, permet de minimiser les variations et de garantir la reproductibilité des résultats. L'objectif est d'obtenir un équilibre parfait entre la maniabilité du béton frais et les performances mécaniques du béton durci.

Les essais réalisés sur les mortiers et les composites à l'état frais et durci sont cruciaux pour évaluer les performances des bétons dans diverses conditions d'utilisation. Les essais à l'état frais, tels que la mesure de l'étalement et de la densité, permettent de vérifier la maniabilité et l'homogénéité du mélange. À l'état durci, les essais de résistance à la compression, à la traction, et à l'abrasion, ainsi que les essais de conductivité thermique et de porosité, fournissent des indications précises sur la durabilité et les propriétés mécaniques du béton.

L'intégration de poudres de déchets industriels comme le coquillage, le verre, la céramique et le granite dans le béton, non seulement valorise des matériaux autrement destinés à l'enfouissement, mais contribue également à la réduction de l'empreinte environnementale de la construction. Cette approche durable et innovante offre des perspectives prometteuses pour le développement de nouveaux bétons performants et écologiques.

En conclusion, ce chapitre a établi les fondations méthodologiques et matérielles nécessaires à la suite de notre investigation, permettant ainsi une évaluation rigoureuse et détaillée des impacts des différentes poudres de déchets sur les propriétés du béton de sable fluide. Les résultats obtenus devraient fournir des indications précieuses pour l'amélioration des pratiques de construction durable et la valorisation des déchets industriels dans l'industrie du béton.

Chapitre 3 :

Résultats et Discussions

VI.1. Introduction

L'objectif de l'étude expérimental est d'étudier l'effet du substitution partielle du ciment par les déchets (coquillag ; verre ; ceramique ; granite)industriel et les déchets bio sources (coquillage) sur les caractéristiques mécanique et

rhéologique d'un (BSF) à base des matériaux locaux .Les résultats obtenus suites aux essais

entrepris, sont regroupés, selon l'âge, le type d'essai et le type de béton afin de permettre la

compréhension et l'exploitation de ces derniers de la manière la plus pratique et la plus aisée.

VI.2. Effet de la substitution partielle du ciment dans le béton de sable fluide sur l'état frais

VI.2.1. Etalement

Il est essentiel d'évaluer en détail l'étalement des différents bétons de sable fluides (BSF) incorporant divers déchets comme substituts partiels du ciment (coquillages, verre, céramique et granite). Cette analyse approfondie permettra de mesurer l'impact spécifique de chaque type de déchet sur la fluidité du mélange, et de comparer les performances de ces bétons écologiques par rapport aux formulations conventionnelles. L'objectif est d'établir des recommandations claires pour optimiser la composition des BSF, en maximisant l'utilisation de matériaux recyclés tout en maintenant ou améliorant leur ouvrabilité, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables pour l'environnement.

VI.2.1.1. Effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de coquillage

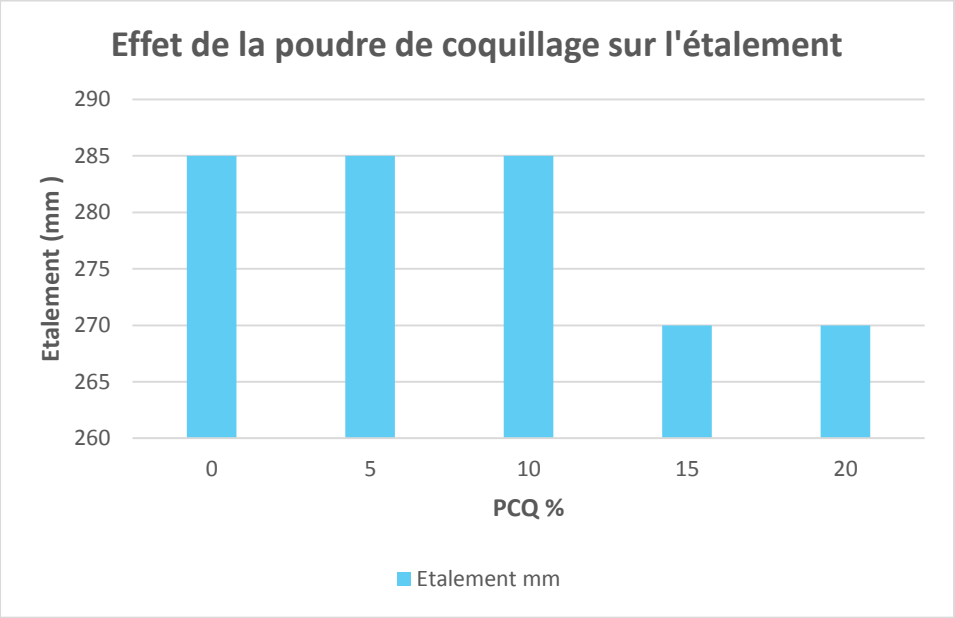


Figure 40 : Effet de la poudre de coquillage sur l'étalement du béton de sable fluide avec dosage en Sp constant 0,8 %.

Les résultats obtenus montrent que la substitution du ciment par la poudre de coquillage affecte l'étalement du béton de sable fluide, en comparant chaque mélange au mélange témoin à 0% PCQ qui enregistre un étalement maximal d'environ 285 mm. À 5% de substitution, l'étalement reste très proche du témoin, diminuant légèrement à environ 280 mm, indiquant que cette faible quantité de substitution n'altère pas significativement la fluidité du béton.

Avec 10% de poudre de coquillage, l'étalement diminue encore légèrement, mais maintient une bonne ouvrabilité. Toutefois, en augmentant la substitution à 15% et surtout à 20%, l'étalement chute à environ 270 mm, révélant une réduction plus marquée de l'ouvrabilité qui au-delà pourrait affecter négativement la facilité de mise en œuvre et la qualité du béton comparé au mélange témoin.

Cela démontre que généralement, plus on augmente la quantité de coquillages substituée dans le béton, plus l'ouvrabilité de ce dernier se réduit [1]. Cette réduction peut être expliquée par l'accroissement de la surface des particules de coquillage, petites et de forme irrégulière[2], nécessitant ainsi une grande quantité de pâte pour compenser la friction interparticulaire.

VI.2.1.2. Effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de verre

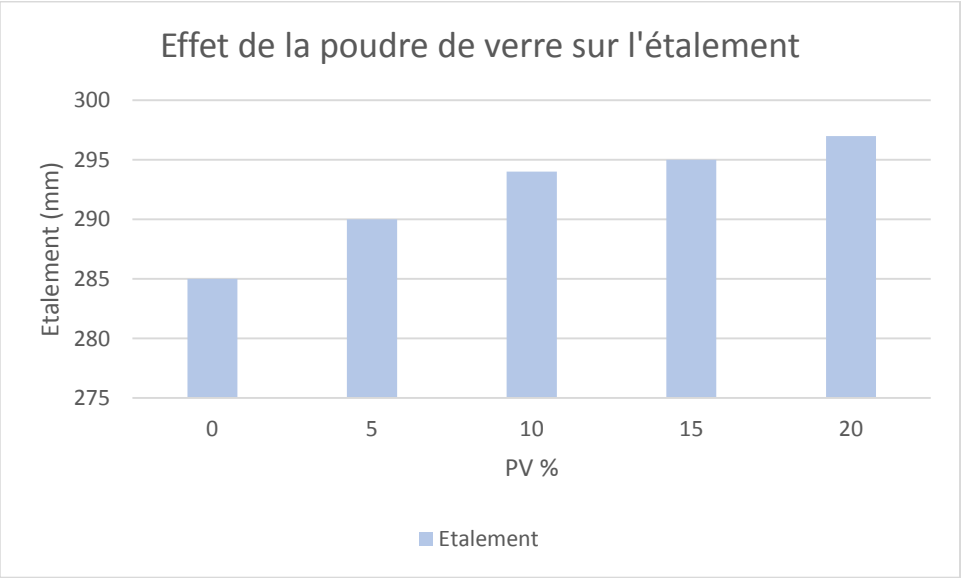


Figure 41 : Effet de la poudre de verre sur l'étalement du béton de sable fluide avec dosage en Sp constant 0,8 %.

L'incorporation de poudre de verre (PV) en tant que substitut partiel du ciment dans le béton de sable fluide affecte son étalement. En effet, des observations sur le graphique indiquent une augmentation de l'étalement avec l'augmentation du pourcentage de PV. Cette augmentation est plus prononcée pour les hautes teneurs en PV, se stabilisant ensuite à partir de 10%.Ce comportement pourrait s'expliquer par le fait que la poudre de verre, étant plus fine que le ciment, peut améliorer la répartition de l'eau et ainsi faciliter l'étalement du béton. Elle peut également agir comme un filler, diminuant la viscosité du mélange et améliorant la

maniabilité du béton.Selon les observations de AbderraoufBelkadi et ses collaborateurs,[3], l'intégration de poudre de verre recyclée aux mortiers de ciment entraîne une augmentation notable de leur ouvrabilité, en relation directe avec le pourcentage de remplacement du ciment par cette poudre. Cette amélioration est attribuable à la texture particulière de la poudre de verre, qui réduit la friction entre les particules, facilitant ainsi une meilleure dispersion à travers la matrice cimentaire.

VI.2.1.3. Effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de céramique

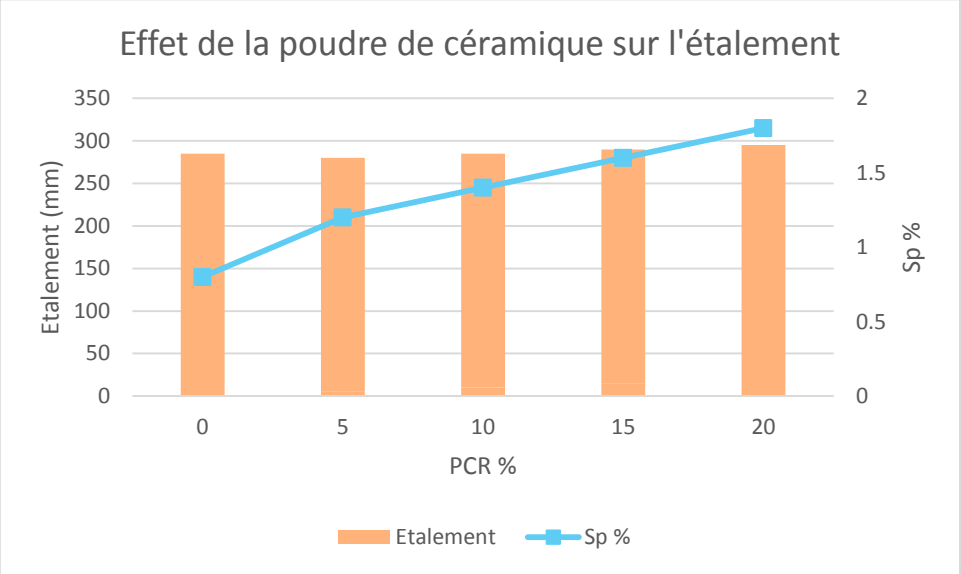


Figure 42 : Effet de la poudre de céramique sur l'étalement du béton de sable fluide avec dosage en Sp variable.

La figure 3 illustre que pour obtenir un étalement d'environ 275 mm, requis pour le béton de sable fluide, l'ajout de superplastifiant doit être augmenté proportionnellement à la quantité de ciment remplacée par la poudre de déchet de céramique. À mesure que le taux de substitution augmente, la fluidité du béton tend à diminuer, bien que cette réduction reste gérable grâce à l'ajustement des adjuvants. Néanmoins, l'absorption d'eau du béton modifié par la poudre de céramique demeure dans des niveaux acceptables, comme indiqué dans la source[4]. Cette approche assure que les propriétés du béton restent optimales pour son application tout en intégrant des matériaux recyclés.

VI.2.1.4. Effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de granite

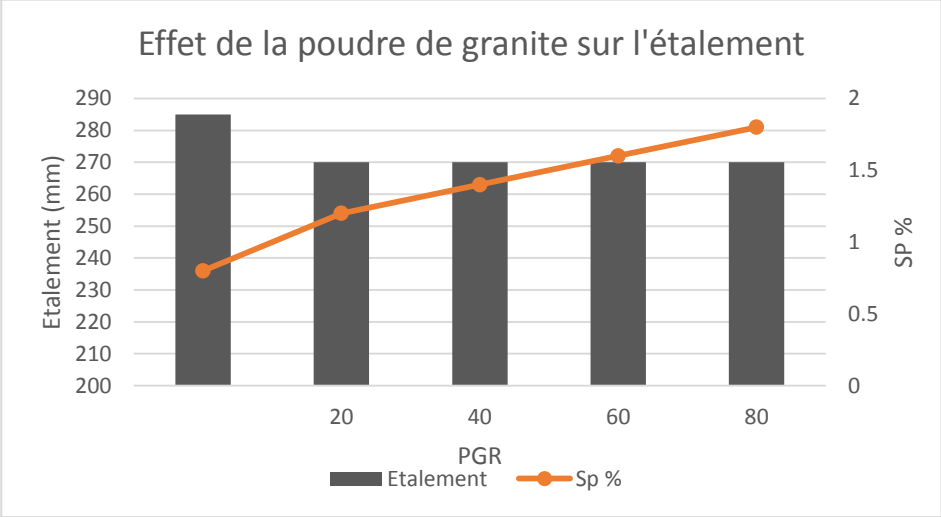


Figure 43 : Effet de la poudre de granite sur l'étalement du béton de sable fluide avec dosage en Sp variable.

Les données illustrées sur la figure 4 montrent que pour obtenir un étalement requis d'environ 270 mm, caractéristique du béton sable fluide, il est nécessaire d'augmenter le dosage en superplastifiant proportionnellement au taux de substitution du ciment par la poudre de déchet de granit. En effet, une incorporation accrue de cette poudre entraîne une diminution de la maniabilité du mélange, bien que cette perte de fluidité puisse être contrôlée en ajustant la teneur en adjuvants. Néanmoins, le béton modifié par l'ajout de poudre de granit conserve une absorption d'eau située dans des valeurs acceptables. Cette approche permet donc de conserver les propriétés requises du béton tout en valorisant des matériaux de réemploi.

VI.3. Effet de la substitution partielle du ciment dans le béton de sable fluide sur l'état durci

VI.3.1. Résistance à la compression

Pour une compréhension approfondie de l'évolution de la résistance à la compression des différentes familles de béton de sable fluide (BSF) en fonction de leur âge et du taux de substitution du ciment par divers déchets : coquillage, verre, céramique et granite, il est essentiel d'étudier ces variations détaillées. Cette analyse permettra non seulement de déterminer l'impact de chaque type de déchet sur la résistance du béton, mais aussi de

faciliter la comparaison de ces bétons écologiques avec des bétons traditionnels. L'objectif est d'établir des lignes directrices claires pour l'optimisation de la composition des BSF, en maximisant l'utilisation de matériaux recyclés tout en maintenant ou améliorant leurs propriétés mécaniques, ce qui contribue à la durabilité environnementale.

VI.3.1.1. Effet de le poudre de coquillage

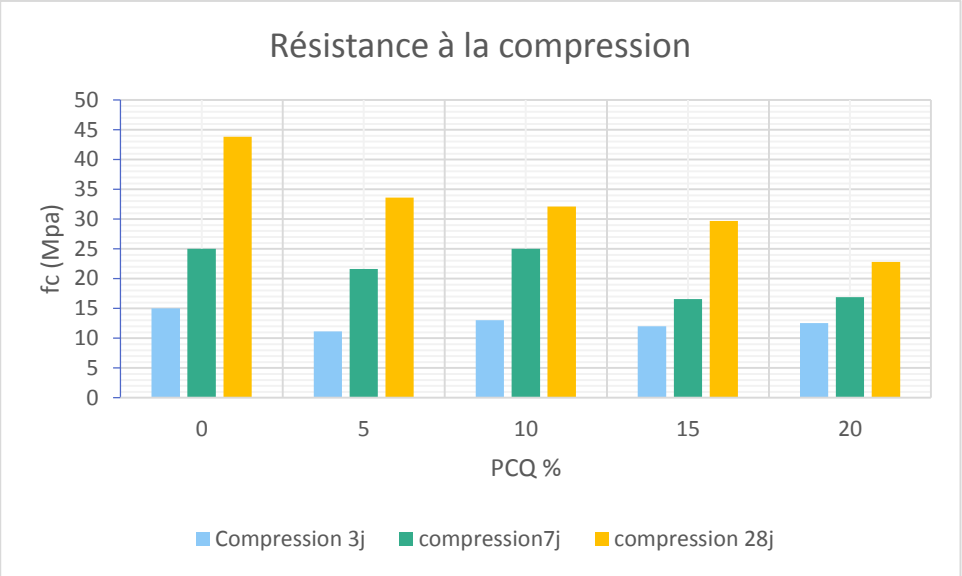


Figure 44 : Effet de la poudre de coquillage sur la résistance à la compression du béton de sable fluide.

La figure 5illustre les variations de la résistance à la compression du béton de sable fluide incorporant la poudre de coquillage (PCQ) en remplacement partiel du ciment, avec une observation des résultats à 3, 7 et 28 jours. À 3 jours, tous les mélanges substitués montrent une résistance inférieure au mélange témoin (0% de PCQ). À 7 jours, le mélange avec 5% de PCQ surpasse le mélange témoin en termes de résistance à la compression, indiquant une amélioration initiale lorsqu'une petite quantité de poudre de coquillage est utilisée. Cependant, à 28 jours, ce bénéfice s'atténue, la résistance du mélange avec 5% de PCQ restant juste légèrement supérieure à celle du mélange témoin, tandis que les mélanges avec des substitutions plus élevées (10%, 15% et 20%) continuent de présenter des résistances inférieures. Cette observation souligne que la poudre de coquillage peut améliorer la résistance initiale du béton à faible taux de substitution, mais des taux plus élevés compromettent la résistance sur le long terme par rapport au béton standard sans substitution.

VI.3.1.2. Effet de la poudre de verre

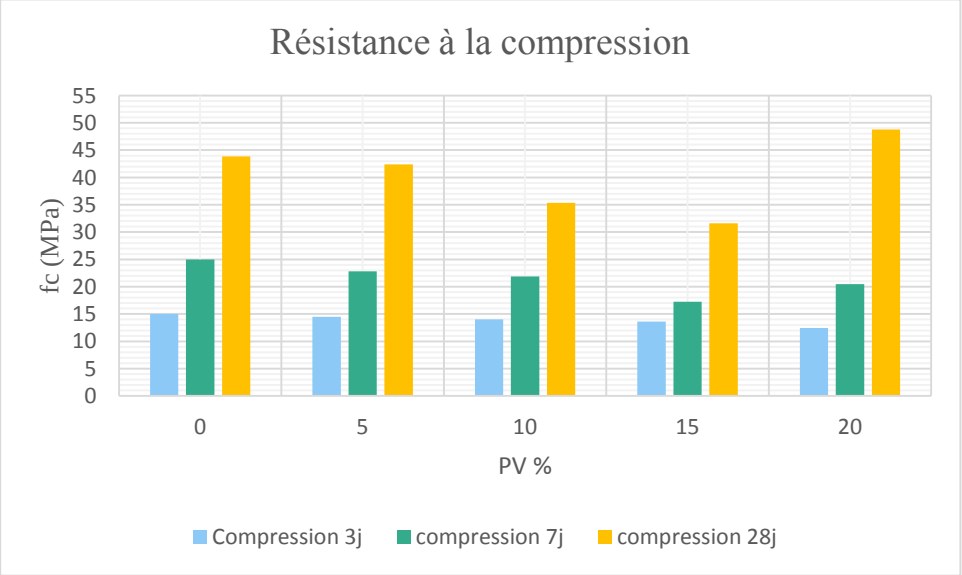


Figure 45 : Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression du béton de sable fluide.

Le graphique illustre l'impact de l'incorporation de poudre de verre (PV) comme substitut partiel du ciment dans le béton de sable fluide sur la résistance à la compression à différentes périodes : 3, 7, et 28 jours. Initialement, à 3 jours, les mélanges avec un taux de substitution de 15% et 20% présentent une résistance à la compression inférieure à celle du mélange témoin sans PV, indiquant un démarrage plus lent du processus de prise. Cependant, à 7 jours, ces mêmes mélanges (15% et 20% PV) commencent à montrer une amélioration, approchant la résistance du mélange témoin. À 28 jours, ces proportions démontrent une capacité supérieure, surpassant significativement la résistance du mélange témoin. Cette progression suggère que la poudre de verre, bien qu'affectant négativement la résistance initiale, contribue positivement à la résistance à long terme du béton, probablement due à ses caractéristiques pouzzolaniques qui améliorent la structure du matériau avec le temps.Les études complémentaires confirment que le remplacement du ciment par jusqu'à 20% de poudre de verre ne réduit pas la résistance mécanique des mortiers et peut même atteindre celle du ciment pur après 91 jours, mettant en lumière l'efficacité de la poudre de verre en tant que matériau pouzzolanique. De plus, il est indiqué que le broyage optimal de la poudre de verre pour obtenir une granulométrie inférieure à celle du ciment est de quatre heures, ce qui souligne l'importance de l'ajustement du processus de broyage pour maximiser l'efficacité de la poudre de verre dans les applications de béton. Ces informations étayent davantage les observations faites à partir du graphique, prouvant que la poudre de verre peut être un substitut viable et bénéfique dans la fabrication du béton[5][3].

VI.3.1.3. Effet de la poudre de céramique

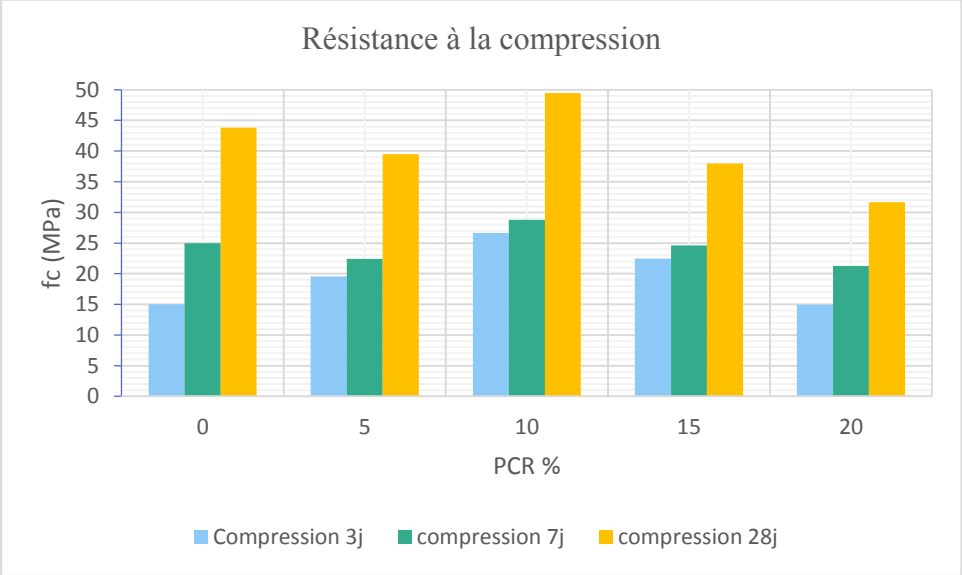


Figure 46 : Effet de la poudre de déchet de céramique sur la résistance à la compression du béton de sable fluide.

Le graphique démontre l'impact de l'intégration de la poudre de déchet de céramique (PCR) comme substitut partiel du ciment sur la résistance à la compression du béton de sable fluide à divers intervalles après le coulage : 3, 7 et 28 jours. À 3 jours, bien que la majorité des mélanges avec PCR montrent une diminution de la résistance par rapport au mélange témoin sans substitution, le mélange avec 15% de PCR se distingue en affichant une résistance supérieure. Cette tendance se confirme à 7 jours, où la résistance du mélange avec 15% de PCR est nettement plus élevée que celle des autres mélanges substitués, suggérant une interaction bénéfique entre la PCR et les composants du béton qui pourrait favoriser le durcissement. À 28 jours, le mélange avec 15% de PCR maintient une résistance proche de celle du mélange témoin, indiquant que ce taux de substitution est optimal pour conserver une bonne résistance à la compression sur le long terme, alors que les mélanges avec des taux de substitution plus élevés ou plus bas montrent une réduction significative de la résistance.

Ces observations sont soutenues par des études qui révèlent que la poudre de déchets de céramiques fonctionne principalement comme un matériau de remplissage, contribuant à un système de particules plus dense. Bien que son activité pouzzolanique soit limitée aux premières étapes, elle devient plus notable après 28 jours, favorisant la formation de silicates de calcium hydratés qui sont essentiels pour la résistance à long terme [6]. Ces résultats mettent en lumière le rôle crucial de la PCR non seulement comme remplisseur mais aussi comme activateur de propriétés pouzzolaniques qui améliorent la durabilité et la résistance mécanique du béton de sable fluide.

VI.3.1.4. Effet de la poudre de granite

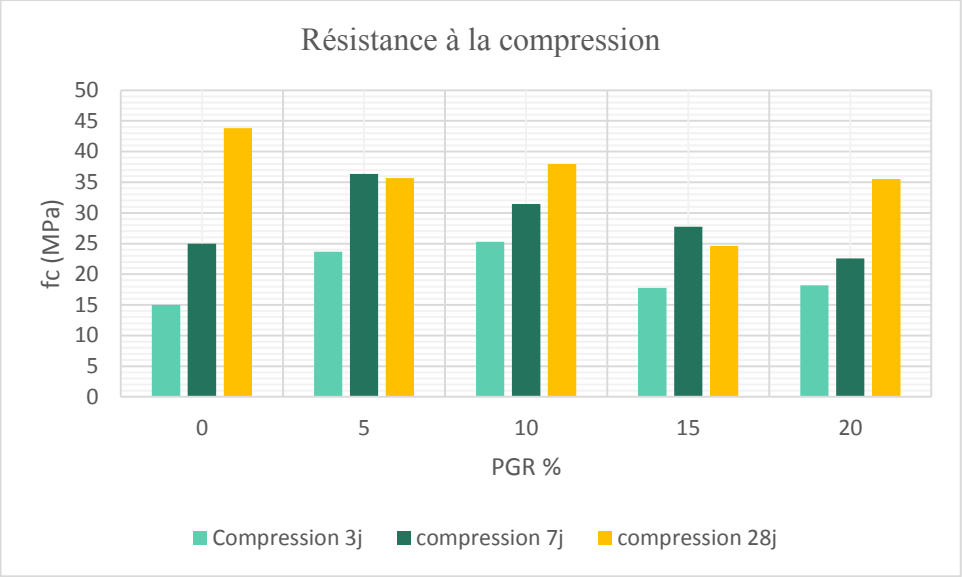


Figure 47 : Effet de la poudre de déchet de granite sur la résistance à la compression du béton de sable fluide.

Le graphique illustre l'effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de déchet de granite (PGR) dans le béton de sable fluide sur la résistance à la compression, mesurée à 3, 7, et 28 jours après le coulage. À 3 jours, on observe une baisse générale de la résistance à la compression à mesure que le pourcentage de PGR augmente, avec une chute particulièrement notable pour les mélanges avec 15% et 20% de PGR. Cette tendance indique que, dans les premières étapes du durcissement, le granite en poudre ne contribue pas efficacement aux réactions chimiques nécessaires pour le développement initial de la résistance du béton. À 7 jours, bien que la résistance continue d'être inférieure pour les mélanges avec des taux élevés de substitution, le mélange à 10% montre une légère amélioration par rapport aux jours précédents, suggérant que certaines réactions pouzzolaniques pourraient commencer à se manifester, bien que pas suffisamment pour rivaliser avec le béton témoin. Finalement, à 28 jours, les mélanges avec 5% et 10% de PGR montrent une amélioration de la résistance par rapport aux résultats à 7 jours, ce qui peut être attribué à une progression des réactions pouzzolaniques à long terme. Cependant, cette amélioration ne suffit pas pour atteindre ou surpasser la résistance du béton sans substitution, et les mélanges à 15% et 20% continuent de montrer une baisse significative. Ces résultats soulignent que bien que le granite puisse offrir certains avantages en termes de durabilité et de coût, sa capacité à remplacer le ciment dans le béton de sable fluide est limitée, surtout à des taux de substitution élevés où il ne parvient pas à maintenir des propriétés mécaniques comparables au béton témoin.

VI.3.2.Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un béton de sable fluide est généralement inférieure à celle d'un béton ordinaire en raison de sa composition plus légère et de l'absence de granulats grossiers. Cette caractéristique lui confère de meilleures propriétés isolantes, le rendant avantageux pour des applications nécessitant une isolation thermique accrue. Afin d'améliorer encore ces propriétés et de promouvoir des pratiques de construction durables, nous avons étudié l'effet de la substitution partielle du ciment par des déchets, tels que la poudre de coquillage, de verre, de céramique et de granite. Les résultats suivants présentent l'impact de différentes proportions de ces déchets sur la conductivité thermique du béton de sable fluide, démontrant les avantages potentiels de l'utilisation de matériaux recyclés dans le béton.

VI.3.2.1. Effet de la poudre de coquillage sur la conductivité thermique

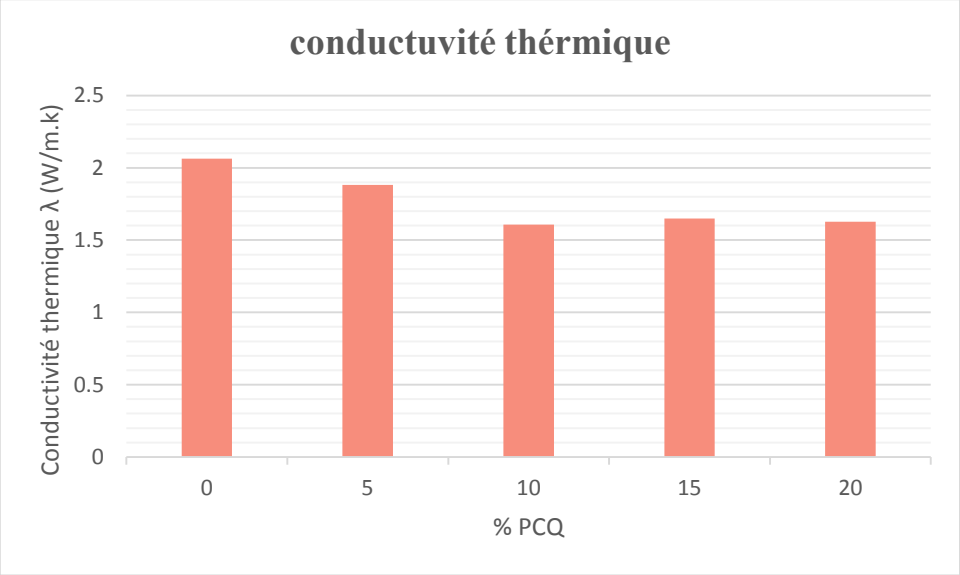


Figure 48 : Effet de la poudre de coquillage sur la conductivité thermique.

Le graphique ci-dessus illustre la variation de la conductivité thermique (λ) d'un béton de sable fluide en fonction du pourcentage de substitution du ciment par de la poudre de coquillage (PCQ). La conductivité thermique est mesurée en watts par mètre-kelvin (W/m.K) et les pourcentages de substitution étudiés sont 0%, 5%, 10%, 15% et 20%. La conductivité thermique du mélange témoin, sans aucune substitution, est d'environ 2.1 (W/m.K). En remplaçant 5% du ciment par de la PCQ, la conductivité thermique diminue légèrement à environ 1.9 (W/m.K), soit une réduction de 9.5% par rapport au mélange témoin. Avec une

substitution de 10%, la conductivité thermique continue de diminuer pour atteindre environ 1.7 (W/m.K), représentant une réduction de 19% par rapport au témoin. À 15% de substitution, la conductivité thermique se stabilise autour de 1.7 (W/m.K), indiquant un effet de seuil. À 20% de substitution, la conductivité thermique reste stable, confirmant que l'impact de la PCQ se stabilise au-delà de 15%. En conclusion, la substitution du ciment par de la PCQ améliore les propriétés isolantes du béton, avec un effet notable jusqu'à 10% de substitution.

VI.3.2.2. Effet de la poudre de verre sur la conductivité thermique

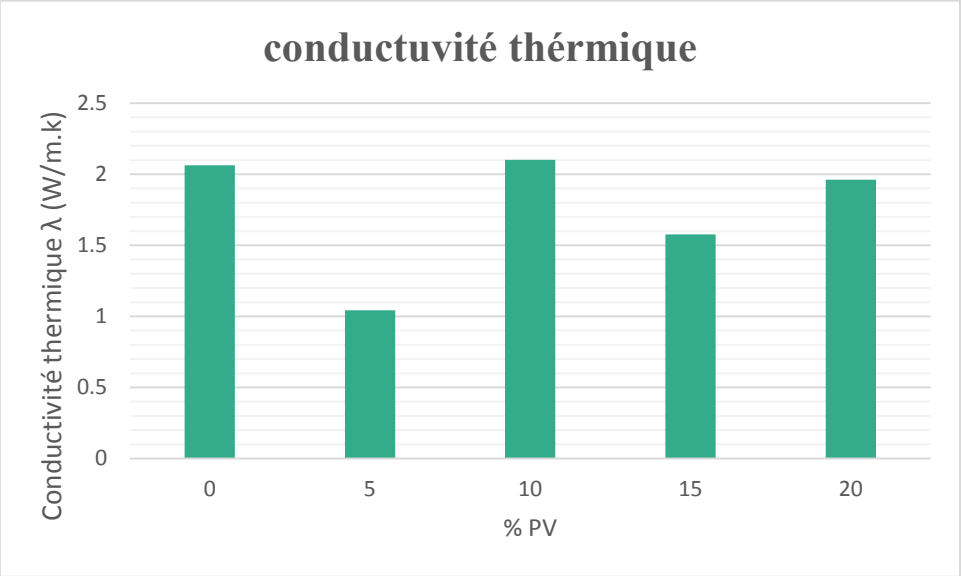


Figure 49 : Effet de la poudre de verre sur la conductivité thermique.

Le graphique ci-dessus illustre la variation de la conductivité thermique (λ) d'un béton de sable fluide en fonction du pourcentage de substitution du ciment par de la poudre de verre (PV), avec des pourcentages de substitution de 0%, 5%, 10%, 15% et 20%. La conductivité thermique du mélange témoin sans substitution est d'environ 2.0 (W/m.K). En remplaçant 5% du ciment par de la PV, la conductivité thermique diminue de manière significative à environ 1.0 (W/m.K), soit une réduction de 50% par rapport au témoin. Avec une substitution de 10%, la conductivité thermique augmente à environ 2.2(W/m.K), représentant une augmentation de 10% par rapport au témoin. À 15% de substitution, la conductivité thermique diminue de nouveau à environ 1.5 (W/m.K), soit une réduction de 25%. Enfin, à 20% de substitution, la conductivité thermique augmente légèrement à environ 1.7 (W/m.K), indiquant une réduction

de 15% par rapport au témoin. En conclusion, la substitution partielle du ciment par de la PV affecte de manière variable la conductivité thermique du béton de sable fluide, avec des réductions notables à 5% et 15% de substitution, mais des variations complexes aux pourcentages intermédiaires.

VI.3.2.3. Effet de la poudre de céramique sur la conductivité thermique

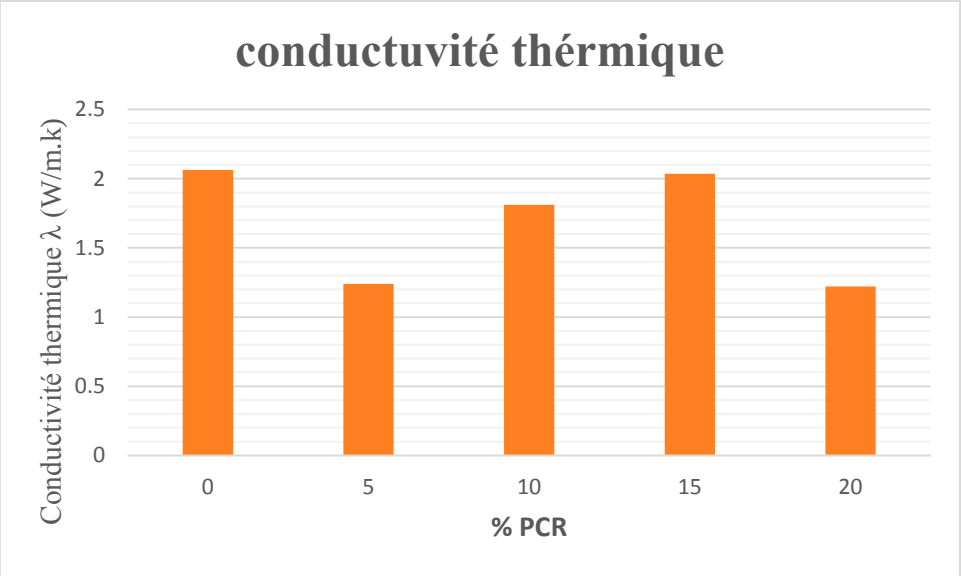


Figure 50 : Effet de la poudre de céramique sur la conductivité thermique

Le graphique ci-dessus illustre la variation de la conductivité thermique (λ) d'un béton de sable fluide en fonction du pourcentage de substitution du ciment par de la poudre de céramique (PCR), avec des pourcentages de substitution de 0%, 5%, 10%, 15% et 20%. La conductivité thermique du mélange témoin sans substitution est d'environ 2.0 (W/m.K). En remplaçant 5% du ciment par de la PCR, la conductivité thermique diminue significativement à environ 1.1 (W/m.K), soit une réduction de 45% par rapport au témoin. Avec une substitution de 10%, la conductivité thermique augmente pour atteindre environ 1.7 (W/m.K), représentant une réduction de 15% par rapport au témoin. À 15% de substitution, la conductivité thermique augmente davantage à environ 2.2(W/m.K), indiquant une augmentation de 10% par rapport au témoin. Enfin, à 20% de substitution, la conductivité thermique diminue de nouveau à environ 1.4 (W/m.K), soit une réduction de 30% par rapport au témoin. En conclusion, la substitution partielle du ciment par de la PCR affecte de manière

variable la conductivité thermique du béton de sable fluide, avec des réductions notables à 5% et 20% de substitution, mais des augmentations aux pourcentages intermédiaires.

VI.3.2.4. Effet de la poudre de granite sur la conductivité thermique

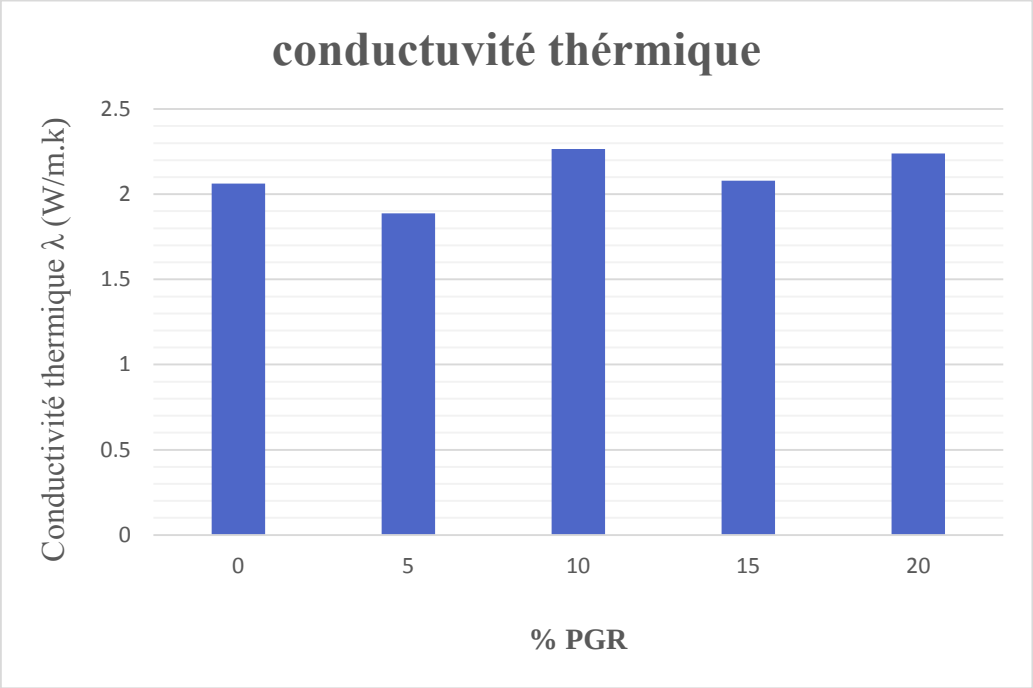


Figure 51 : Effet de la poudre de granite sur la conductivité thermique.

Le graphique ci-dessus illustre la variation de la conductivité thermique (λ) d'un béton de sable fluide en fonction du pourcentage de substitution du ciment par de la poudre de granite (PGR). La conductivité thermique est mesurée en watts par mètre-kelvin (W/m.K) et les pourcentages de substitution étudiés sont 0%, 5%, 10%, 15% et 20%. La conductivité thermique du mélange témoin, sans aucune substitution, est d'environ 2.1 (W/m.K).En remplaçant 5% du ciment par de la PGR, la conductivité thermique diminue légèrement à environ 1.8 (W/m.K), soit une réduction de 14.3% par rapport au mélange témoin. Avec une substitution de 10%, la conductivité thermique augmente pour atteindre environ 2.2 (W/m.K), représentant une augmentation de 4.8% par rapport au témoin. À 15% de substitution, la conductivité thermique diminue de nouveau à environ 1.9 (W/m.K), soit une réduction de 9.5% par rapport au témoin. Enfin, à 20% de substitution, la conductivité thermique augmente légèrement à environ 2.0 (W/m.K), montrant une réduction de 4.8% par rapport au témoin.En conclusion, la substitution partielle du ciment par de la PGR affecte de manière

variable la conductivité thermique du béton de sable fluide, avec des réductions notables à 5% et 15% de substitution, mais des augmentations à 10% de substitution.

VI.3.2.5. Effet des Déchets sur la Conductivité Thermique

La substitution partielle du ciment par des déchets tels que la poudre de coquillage, de verre, de céramique et de granite a un effet significatif sur la conductivité thermique du béton de sable fluide. En général, ces matériaux recyclés tendent à réduire la conductivité thermique, améliorant ainsi les propriétés isolantes du béton. Les variations observées peuvent être attribuées aux propriétés intrinsèques de chaque matériau de substitution. Par exemple, la poudre de coquillage et la poudre de céramique montrent des réductions substantielles à faibles taux de substitution, probablement en raison de leurs structures micro-poreuses qui limitent la conductivité thermique. En revanche, la poudre de verre et la poudre de granite présentent des variations plus complexes, avec des augmentations de conductivité thermique à certains pourcentages de substitution, ce qui pourrait être dû à une meilleure compacité et à des liaisons plus denses entre les particules. En somme, l'utilisation de ces déchets comme substituts partiels du ciment offre une opportunité prometteuse pour améliorer les performances thermiques et la durabilité des matériaux de construction.

VI.3.3.Porosité accessible à l'eau

L'essai de porosité accessible à l'eau fournit des données cruciales sur la perméabilité et la compacité des mélanges de béton de sable fluide avec les différents taux de divers substituts. Les valeurs de porosité, exprimées en pourcentage, montrent des variations significatives en fonction des proportions de substitution utilisées. En effet, la porosité est un indicateur essentiel pour évaluer la qualité du béton, car elle influence directement sa durabilité, sa résistance et son comportement face aux agents agressifs. Une porosité élevée peut indiquer une plus grande perméabilité, ce qui rend le béton plus susceptible aux infiltrations d'eau et à la dégradation par les cycles de gel et dégel ou par l'action des sels et des produits chimiques.

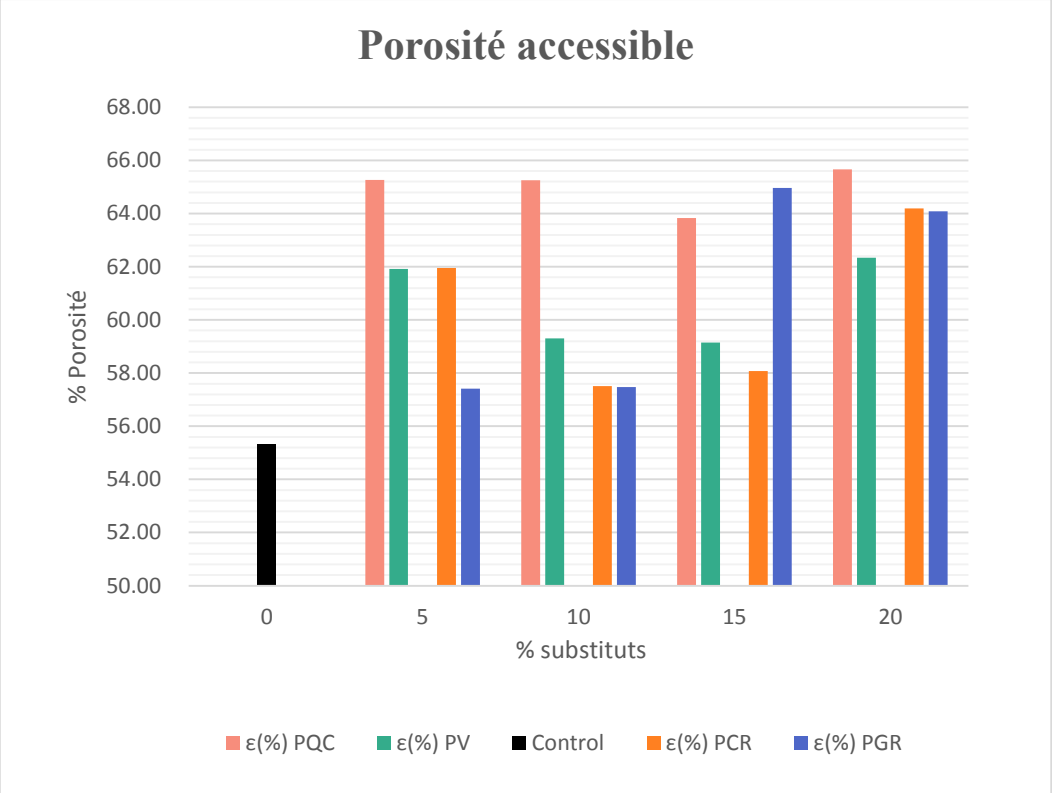


Figure 52 : Porosité accessible à l'eau.

Le graphique ci-dessus illustre la porosité accessible à l'eau des mélanges de béton de sable fluide en fonction du pourcentage de substitution du ciment par différents matériaux : poudre de coquillage (PQC), poudre de verre (PV), poudre de céramique (PCR) et poudre de granite (PGR). La porosité du mélange témoin, sans substitution, est d'environ 54%. En remplaçant 5% du ciment par de la PQC, la porosité augmente significativement à 64%, et reste élevée à 66% avec des taux de substitution plus élevés, probablement en raison de la structure poreuse de la PQC qui introduit plus de vides dans le mélange. La substitution par la PV diminue la porosité à environ 60% à 5% de substitution et à 58% à 15%, indiquant une meilleure compacité grâce à la finesse de la PV qui comble les espaces entre les particules de ciment. La PCR réduit la porosité à environ 56% pour tous les taux de substitution, ce qui suggère que la céramique, par sa structure dense, remplit efficacement les vides et améliore la compacité. Enfin, la PGR réduit la porosité à environ 57% à 5% de substitution, mais l'augmente légèrement à 62% à 15% et 20%, probablement en raison de sa granulométrie plus grossière qui peut créer des espaces supplémentaires à des taux de substitution plus élevés. En conclusion, les substituts tels que la poudre de verre et la poudre de céramique améliorent

la compacité du béton, tandis que la poudre de coquillage et la poudre de granite tendent à augmenter la porosité, influençant la perméabilité et les propriétés isolantes du matériau.

La substitution partielle du ciment par des déchets tels que la poudre de coquillage (PQC), la poudre de verre (PV), la poudre de céramique (PCR) et la poudre de granite (PGR) a des effets variés sur la porosité du béton de sable fluide. La PQC tend à augmenter la porosité du béton en raison de sa structure poreuse, introduisant plus de vides dans le mélange. De plus, les coquillages peuvent contenir des composés organiques et des sels qui, lorsqu'ils réagissent avec l'eau et les autres composants du béton, peuvent entraîner des réactions chimiques expansives. Ces réactions expansives génèrent des pressions internes, augmentant la porosité et provoquant potentiellement des fissurations et une détérioration structurelle. En revanche, la PV réduit la porosité grâce à sa finesse qui comble les espaces entre les particules, améliorant ainsi la compacité du béton. La PCR maintient une porosité plus basse et stable, suggérant que sa structure dense remplit efficacement les vides, ce qui améliore la compacité. La PGR réduit initialement la porosité mais l'augmente légèrement à des taux plus élevés, probablement à cause de sa granulométrie plus grossière qui peut créer des espaces supplémentaires. En conclusion, la poudre de verre et la poudre de céramique améliorent la compacité et réduisent la porosité, tandis que la poudre de coquillage et la poudre de granite tendent à augmenter la porosité, influençant ainsi la perméabilité du béton.

VI.3.4.Analyse de l'Impulsion Ultrasonique

L'analyse de l'impulsion ultrasonique constitue une méthode non destructive puissante pour évaluer la qualité et l'intégrité des mélanges de béton de sable fluide. Cette technique permet d'obtenir des informations détaillées sur la structure interne des échantillons, notamment la compacité, la cohésion et les propriétés acoustiques. En utilisant des impulsions ultrasoniques, il est possible de détecter des variations dans la densité et la porosité, ainsi que de repérer des fissures ou des défauts internes sans endommager les échantillons.

VI.3.4.1. Effet de la poudre de coquillage

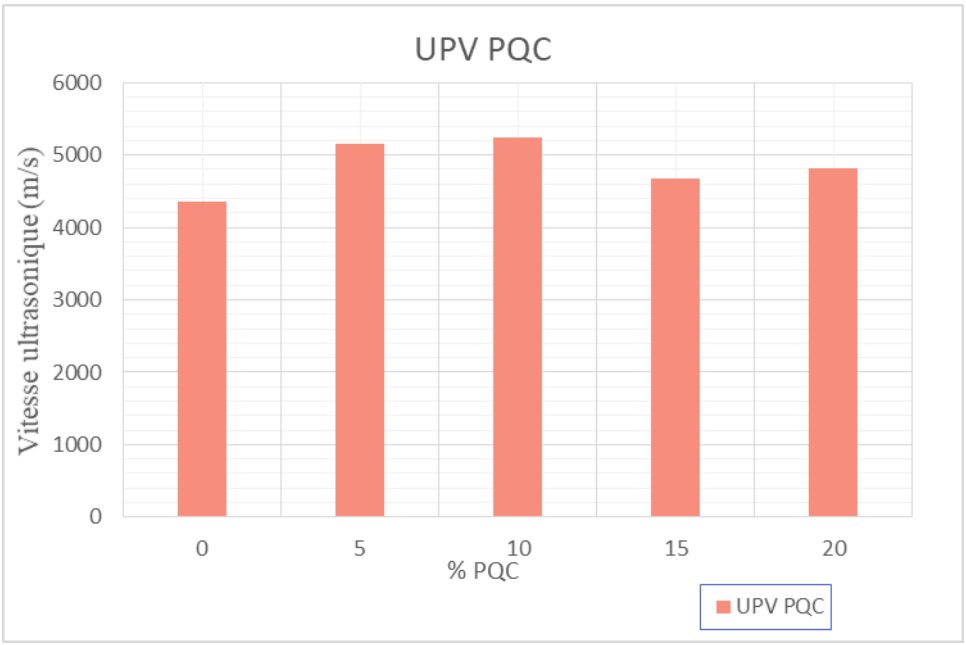


Figure 53 : Vitesse Ultrasonique (UPV) pour le Béton de Sable Fluide avec Substitution de Poudre de Coquillage (PQC)

Le graphique ci-dessus montre l'analyse de l'impulsion ultrasonique pour un béton de sable fluide où le ciment est partiellement substitué par de la poudre de coquillage (PQC), avec des taux de substitution allant de 0% à 20%. Le mélange témoin sans substitution présente une vitesse ultrasonique d'environ 4500 m/s. À 5% de substitution, la vitesse ultrasonique augmente significativement à environ 5200 m/s, indiquant une amélioration de la compacité et de la cohésion interne du béton, probablement due à une meilleure liaison entre les particules de PQC et le ciment. Cette valeur reste élevée à 10% de substitution, suggérant que la structure interne du béton est maintenue de manière optimale. Cependant, à 15% de substitution, la vitesse ultrasonique diminue à environ 4800 m/s, et continue de baisser à environ 4700 m/s à 20% de substitution. Cette tendance descendante aux taux plus élevés de PQC peut être attribuée à une augmentation de la porosité et une réduction de la compacité, ce qui indique une moindre cohésion entre les particules. En conclusion, de faibles taux de substitution de ciment par de la PQC (jusqu'à 10%) améliorent la compacité et la cohésion interne du béton, tandis que des taux plus élevés augmentent la porosité, réduisant ainsi la qualité et l'intégrité structurelle du béton.

VI.3.4.2. Effet de la poudre de verre

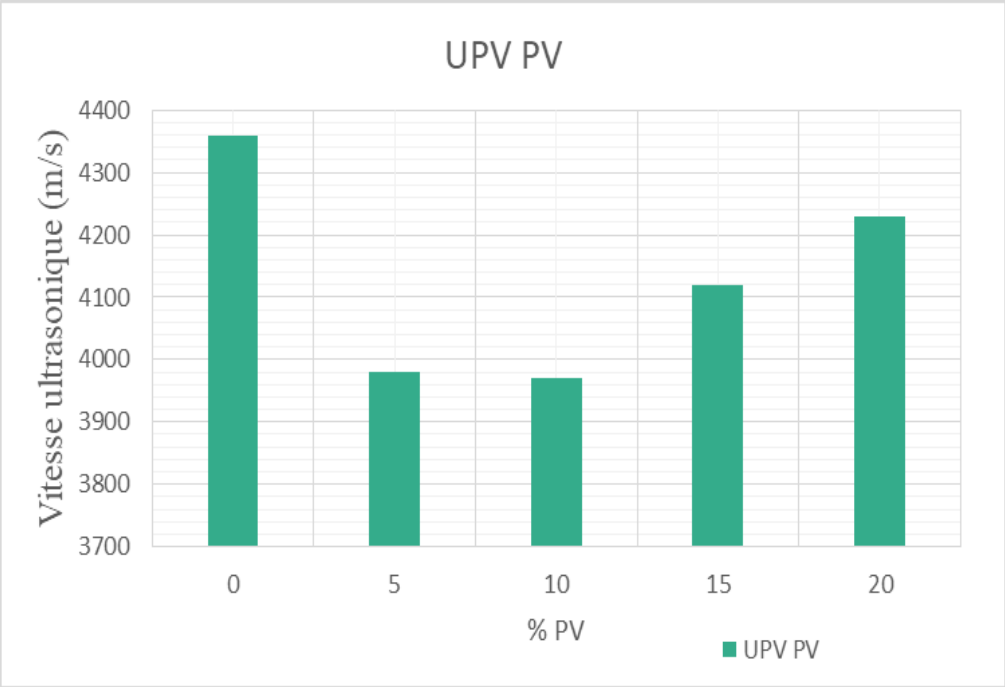


Figure 54 : Vitesse Ultrasonique (UPV) pour le Béton de Sable Fluide avec Substitution de Poudre de Verre (PV)

Le graphique ci-dessus représente l'analyse de l'impulsion ultrasonique pour un béton de sable fluide où le ciment est partiellement substitué par de la poudre de verre (PV), avec des taux de substitution allant de 0% à 20%. Le mélange témoin sans substitution présente une vitesse ultrasonique d'environ 4350 m/s. À 5% de substitution, la vitesse ultrasonique diminue à environ 4000 m/s, indiquant une légère augmentation de la porosité et une réduction de la compacité du béton. Cette tendance se poursuit à 10% de substitution, où la vitesse ultrasonique baisse encore à environ 3950 m/s, suggérant une augmentation continue de la porosité. Cependant, à 15% de substitution, la vitesse ultrasonique augmente à environ 4100 m/s, indiquant une amélioration de la compacité et une réduction de la porosité. Cette amélioration se maintient à 20% de substitution, avec une vitesse ultrasonique atteignant environ 4200 m/s. Ces résultats montrent que de faibles taux de substitution de PV augmentent initialement la porosité et réduisent la compacité du béton, mais que des taux plus élevés de substitution (15% et 20%) permettent d'améliorer la compacité et de réduire la porosité. Cela peut être dû à une meilleure intégration et interaction des particules de verre à des taux plus élevés, comblant les espaces vides et renforçant la cohésion interne du béton.

VI.3.4.3. Effet de la poudre de céramique

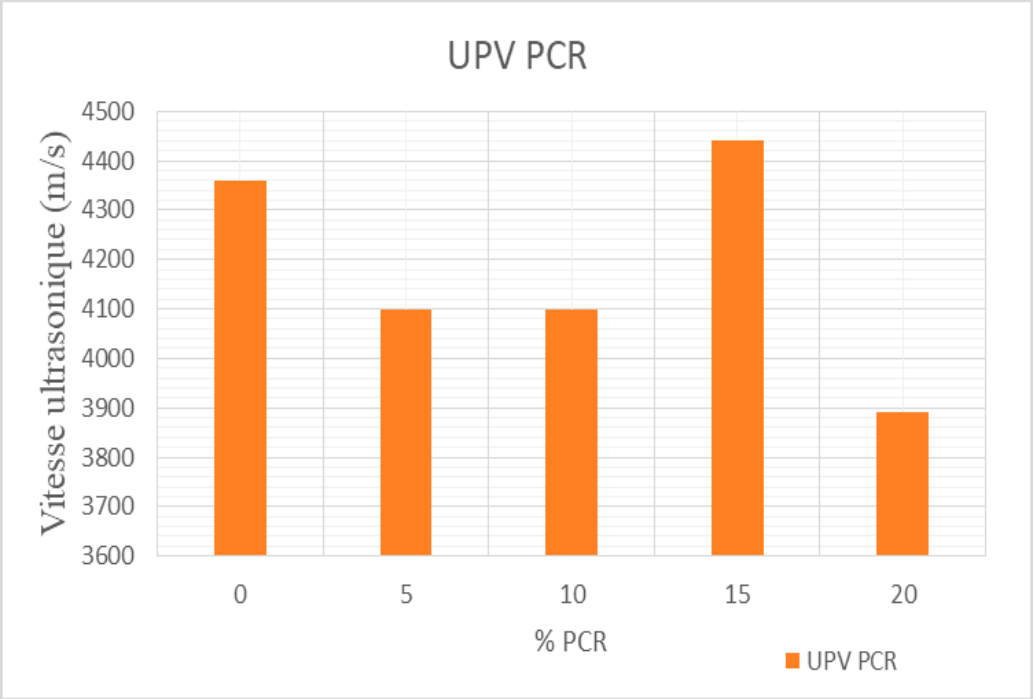


Figure 55 : Vitesse Ultrasonique (UPV) pour le Béton de Sable Fluide avec Substitution de Poudre de Céramique (PCR)

Le graphique ci-dessus représente l'analyse de l'impulsion ultrasonique pour un béton de sable fluide où le ciment est partiellement substitué par de la poudre de céramique (PCR), avec des taux de substitution allant de 0% à 20%. Le mélange témoin sans substitution présente une vitesse ultrasonique d'environ 4350 m/s. À 5% de substitution, la vitesse ultrasonique diminue à environ 4100 m/s, indiquant une légère augmentation de la porosité et une réduction de la compacité du béton. Cette tendance se poursuit à 10% de substitution, où la vitesse ultrasonique baisse encore à environ 4000 m/s, suggérant une augmentation continue de la porosité. Cependant, à 15% de substitution, la vitesse ultrasonique augmente significativement à environ 4300 m/s, indiquant une amélioration de la compacité et une réduction de la porosité. À 20% de substitution, la vitesse ultrasonique diminue de manière marquée à environ 3800 m/s, indiquant une augmentation significative de la porosité et une réduction de la compacité. Ces résultats montrent que de faibles taux de substitution de PCR augmentent initialement la porosité et réduisent la compacité du béton, tandis qu'un taux de 15% améliore la cohésion interne et la compacité. Toutefois, une substitution trop élevée (20%) conduit à une augmentation significative de la porosité, probablement due à une surcharge de particules de céramique qui perturbe la structure du béton.

VI.3.4.4. Effet de la poudre de granite

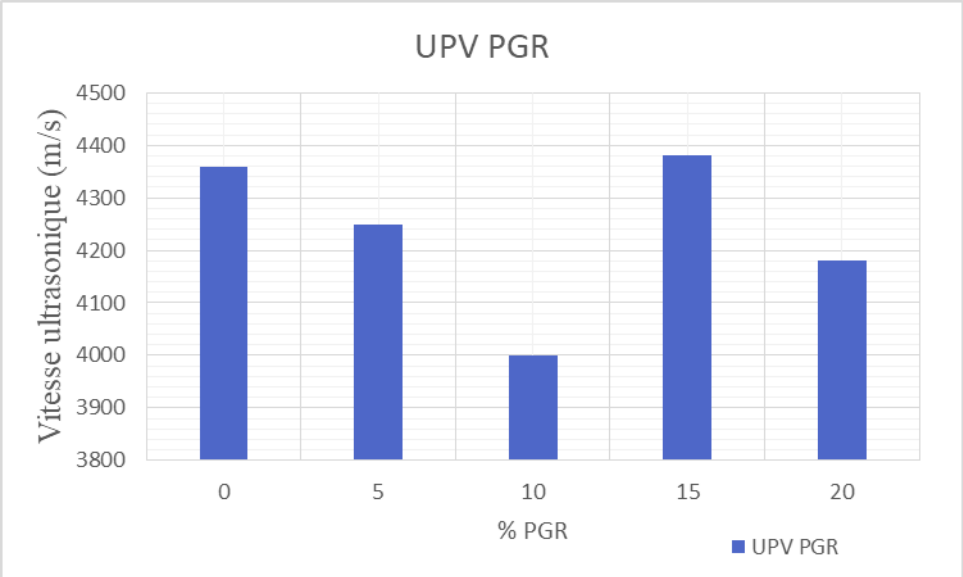


Figure 56 : Vitesse Ultrasonique (UPV) pour le Béton de Sable Fluide avec Substitution de Poudre de Granite (PGR).

Le graphique ci-dessus représente l'analyse de l'impulsion ultrasonique pour un béton de sable fluide où le ciment est partiellement substitué par de la poudre de granite (PGR), avec des taux de substitution allant de 0% à 20%. Le mélange témoin sans substitution présente une vitesse ultrasonique d'environ 4350 m/s. À 5% de substitution, la vitesse ultrasonique diminue légèrement à environ 4200 m/s, indiquant une légère augmentation de la porosité et une réduction de la compacité du béton. À 10% de substitution, la vitesse ultrasonique chute de manière plus marquée à environ 3950 m/s, suggérant une augmentation significative de la porosité. Cependant, à 15% de substitution, la vitesse ultrasonique augmente à environ 4300 m/s, indiquant une amélioration de la compacité et une réduction de la porosité. À 20% de substitution, la vitesse ultrasonique diminue de nouveau à environ 4100 m/s, montrant une augmentation de la porosité par rapport à des taux de substitution plus faibles.

Ces résultats montrent que de faibles taux de substitution de PGR (jusqu'à 5%) n'ont qu'un effet modéré sur la porosité et la compacité du béton. Une substitution à 10% augmente la porosité et réduit la compacité de manière significative, probablement en raison de la granulométrie plus grossière de la PGR, qui introduit des espaces supplémentaires dans la matrice du béton. À 15%, la PGR semble intégrer mieux dans la matrice, réduisant la porosité et améliorant la compacité, comme en témoigne l'augmentation de la vitesse ultrasonique. Toutefois, à 20%, la porosité augmente de nouveau, ce qui pourrait indiquer une surcharge de particules de granite perturbant la cohésion interne du béton.

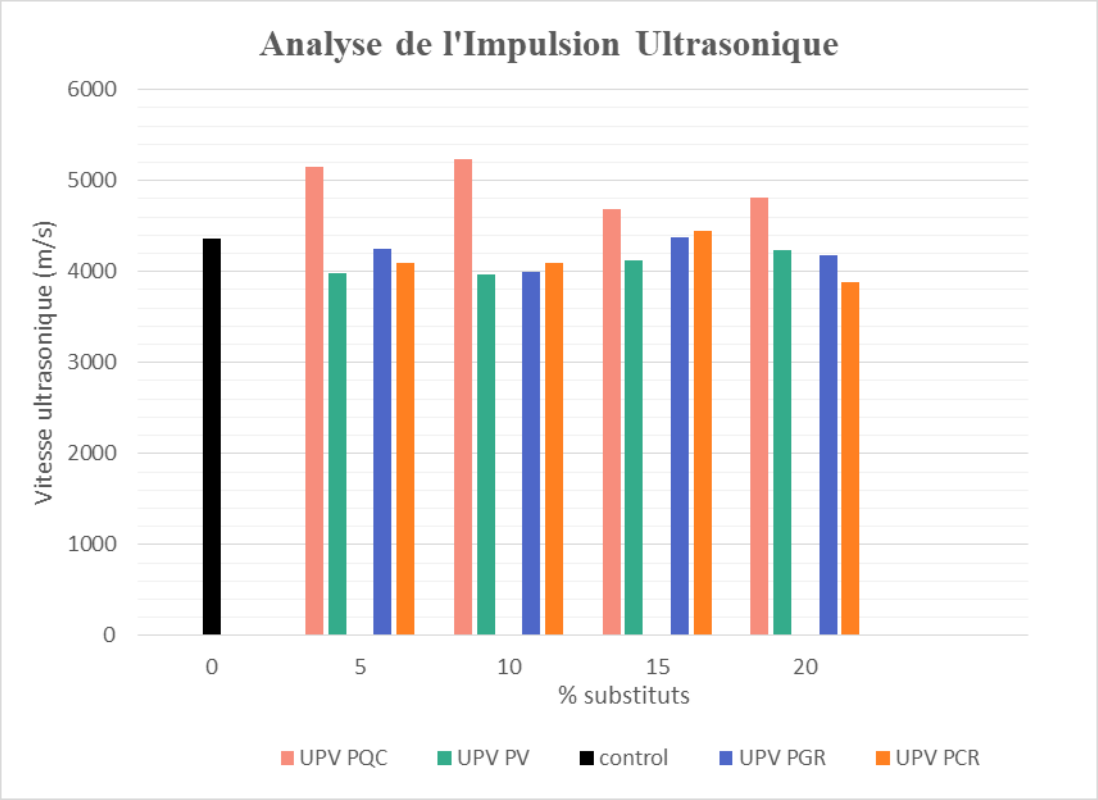


Figure 57 : Analyse Comparative de la Vitesse Ultrasonique des Bétons de Sable Fluide avec Différents Substituts de Ciment.

Les résultats montrent que la poudre de coquillage (PQC) présente les vitesses ultrasoniques les plus élevées à 5% et 10% de substitution, indiquant une compacité et une cohésion interne optimales à ces taux. Cette amélioration peut être attribuée à la structure des coquillages, qui améliore la liaison entre les particules de béton. Cependant, des taux plus élevés (15% et 20%) montrent une légère diminution, probablement due à une augmentation de la porosité causée par un excès de PQC. La poudre de verre (PV) montre une augmentation initiale de la porosité aux taux de 5% et 10%, due à la finesse du verre qui crée des micro-vides, mais une amélioration notable de la compacité à 15% et 20%, suggérant une meilleure intégration des particules de verre à des taux plus élevés. La poudre de céramique (PCR) réduit initialement la compacité à 5% et 10%, probablement en raison de sa granulométrie, mais montre une amélioration significative à 15%, avant une forte diminution à 20%, indiquant une surcharge de particules de céramique qui perturbe la structure du béton. Enfin, la poudre de granite (PGR) présente une légère réduction de la compacité à 5% et une diminution marquée à 10%, suivie d'une amélioration à 15% et d'une nouvelle diminution à 20%. En conclusion, la PQC est le meilleur substitut en termes de compacité et de cohésion interne jusqu'à 10% de substitution, tandis que la PCR montre les pires résultats à des taux de substitution élevés (20%), affectant négativement la structure du béton.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, l'étude approfondie du béton de sable fluide (BSF) présentée dans ce travail met en lumière les avantages significatifs et les potentialités de ce matériau novateur dans le domaine du génie civil. Face à l'urgence environnementale et aux besoins croissants en infrastructures, le BSF se positionne comme une solution viable pour conjuguer performance mécanique, durabilité et respect de l'environnement. L'utilisation de matériaux locaux et recyclés, comme le sable des dunes, le verre, la céramique, les coquillages et le granite, permet de réduire l'empreinte carbone tout en valorisant des déchets autrement destinés à l'enfouissement.

Les résultats expérimentaux ont démontré que le BSF, grâce à sa formulation optimisée, offre des propriétés mécaniques comparables, voire supérieures, aux bétons traditionnels, tout en présentant une meilleure maniabilité et une grande facilité de mise en œuvre. Les essais réalisés, tant à l'état frais qu'à l'état durci, ont validé les performances du BSF dans diverses conditions d'utilisation, confirmant ainsi son potentiel pour des applications variées dans le génie civil.

En outre, les bénéfices environnementaux du BSF sont indéniables. La réduction significative des émissions de dioxyde de carbone grâce à la diminution de la consommation de ciment, couplée à la valorisation des déchets, contribue à une approche plus durable de la construction. Cette démarche s'inscrit pleinement dans les objectifs de développement durable, visant à minimiser l'impact écologique tout en répondant aux exigences fonctionnelles et économiques du secteur.

Les perspectives de recherche future soulignées dans ce travail ouvrent des avenues prometteuses pour l'amélioration continue du BSF. L'adoption de normes et de protocoles pour l'évaluation et l'utilisation efficace des matériaux recyclés, ainsi que le développement de technologies facilitant leur intégration dans les processus de construction existants, sont essentiels pour garantir la performance à long terme et l'acceptabilité sur le marché.

Ainsi, ce travail contribue à la transition vers des pratiques de construction plus écologiques et durables, tout en démontrant que l'innovation dans les matériaux de construction peut jouer un rôle clé dans la résolution des défis environnementaux mondiaux. Le béton de sable fluide, en valorisant les ressources locales et en intégrant des matériaux recyclés, représente une avancée significative pour un avenir où l'industrie du génie civil peut répondre efficacement aux besoins croissants en infrastructures tout en préservant notre planète.

Références bibliographique

Références bibliographique

[1] T. Bouziani, M. Bederina, et M. Hadjoudja, « Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC) », *Int J Concr Struct Mater*, vol. 6, n° 1, p. 59□64, mars 2012, doi: 10.1007/s40069-012-0006-z.

[2] D. A. Muhedin et R. K. Ibrahim, « Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete », *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02512, déc. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02512.

[3] Dj. Boukhelkhal, M. Guendouz, A. Bourdot, H. Cheriet, K. Messaoudi, Elaboration of bio-based building materials made from recycled olive core, MRS Energy & Sustainab. 8 (2021) 98-109. doi:10.1557/s43581-021-00006-8

[4] H. Blaifi, M. Guendouz, A.E. Belhadj, Dj. Boukhelkhal, M. Hadjadj, Sustainable use of recycled plastic and ceramic industrial wastes in eco-friendly construction materials, Envir. Engineer. Manag. J. 22 (8) (2023) 1479-1494. http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/; http://www.eemj.eu

[5] Mohamed Guendouz, Farid Debieb, Othmane Boukendakdji, El-Hadj Kadri, Mohamed Bentchikou, Hamza Soualhi, Use of plastic waste in sand concrete, Journal of Materials and Environmental Science (**2016**)V.7(2):382-389. https://www.jmaterenvironsci.com/Journal/vol7-2.html

[6] Djamila Boukhelkhal, Othmane Boukendakdji, Said Kenai, Sarah Bachene. Effect of mineral admixture type on stability and rheological properties of self-compacting concrete. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. ffhal-01167737. https://hal.science/hal-01167737

[7] AC MAHIEDDINE, KE ZENAINI, D BOUKHELKHAL, L'influence de la vase du barrage GHRIB sur le comportement mécanique du béton de sable fluide, Mémoire de Master, 2020.

[8] A BERKANI-BOUMEHDI, D Boukhelkhal, S KENA, Etude de l'activation thermique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques d'un mortier de ciment normalisé, Mémoir de Master, 2015**.**

[9] P. Sangeetha, V. E. Annamalai, et P. Kaythry, « Durability studies on concrete with partial replacement of cement and coarse aggregate by seashell waste », *Materials Today: Proceedings*, déc. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.12.009.

[10] M. Guendouz, Dj. Boukhelkhal, Physical, mechanical and thermal properties of Crushed Sand Concrete containing Rubber waste. MATEC Web of Conferences. 149 (2018) 01076. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901076

[11] M. Guendouz et D. Boukhelkhal, « Properties of flowable sand concrete containing ceramic wastes », *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 33, n° 24, p. 2661□2683, déc. 2019, doi: 10.1080/01694243.2019.1653594.

[12] M. Hadjadj, M. Guendouz, et D. Boukhelkhal, « The effect of using a seashell as cementitious bio-material and granite industrial waste as fine aggregate on mechanical and durability properties of green flowable sand concrete », *Journal of Building Engineering*, p. 108968, mars 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108968.

[13] B. A. Tayeh *et al.*, « Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement », *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. 101328, sept. 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101328.

[14] E. Kuoribo et H. Mahmoud, « Utilisation of waste marble dust in concrete production: A scientometric review and future research directions », *Journal of Cleaner Production*, vol. 374, p. 133872, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133872.

[15] GUENDOUZ, Mohamed et DEBIEB, Farid. Contribution à la formation et à la Caractérisation d'un éco-materiau de construction à base de déchets Plastiques application au béton de Sable. 2017. Thèse de doctorat.

[16] F. Soltanzadeh, M. Emam-Jomeh, A. Edalat-Behbahani, et Z. Soltan-Zadeh, « Development and characterization of blended cements containing seashell powder », *Construction and Building Materials*, vol. 161, p. 292□304, févr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.111.

[17] J. Wang, E. Liu, et L. Li, « Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials », *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, p. 235□252, mai 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.122.

[18] F. Soltanzadeh, M. Emam-Jomeh, A. Edalat-Behbahani, et Z. Soltan-Zadeh, « Development and characterization of blended cements containing seashell powder », *Construction and Building Materials*, vol. 161, p. 292□304, févr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.111.

[19] Dj. Boukhelkhal, O. Boukendakdji, S. Kenai, E.H. Kadri, Combined effect of mineral admixture and curing temperature on mechanical behavior and porosity of SCC. Adv. Concret. Constr. 6(1) (2018) 69–85. https:// doi. org/ 10. 12989/ acc. 2018.6.1. 069

[20]O. Ketebu et S. T. Farrow, « Comparative study on cementitious content of ground mollusc snail and clam shell and their mixture as an alternative to cement. », 2017.

[21]H. M. Hamada, F. Abed, B. Tayeh, M. S. Al Jawahery, A. Majdi, et S. T. Yousif, « Effect of recycled seashells on concrete properties: A comprehensive review of the recent studies », *Construction and Building Materials*, vol. 376, p. 131036, mai 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131036.

[22]P. Sangeetha, M. Shanmugapriya, K. Santhosh Saravanan, P. Prabhakaran, et V. Shashankar, « Mechanical properties of concrete with seashell waste as partial replacement of cement and aggregate », *Materials Today: Proceedings*, vol. 61, p. 320□326, janv. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.501.

[23]M. Olivia, A. A. Mifshella, et L. Darmayanti, « Mechanical Properties of Seashell Concrete », *Procedia Engineering*, vol. 125, p. 760□764, janv. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.127.

[24]M. H. Ahsan *et al.*, « Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures », *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104226, juin 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104226.

[25]A. Magni Darwich Higuchi, M. Gorett dos Santos Marques, L. Farias Ribas, et R. Pereira de Vasconcelos, « Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material », *Construction and Building Materials*, vol. 304, p. 124640, oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124640.

[26] Dhouha Ben Hadj Tahar, Zakaria Triki , Mohamed Guendouz , Hichem Tahraoui, Meriem Zamouche ,Mohammed Kebir , Jie Zhang and Abdeltif Amrane , Characterization and Thermal Evaluation of a Novel Bio-Based Natural Insulation Material from Posidonia oceanic Waste: A Sustainable Solution for Building Insulation in Algeria., Chem Engineering 2024, 8, 18.https://doi.org/10.3390/ chemengineering8010018

[27]A. M. Maglad, M. A. Othuman Mydin, S. S. Majeed, B. A. Tayeh, et S. A. Mostafa, « Development of eco-friendly foamed concrete with waste glass sheet powder for mechanical, thermal, and durability properties enhancement », *Journal of Building Engineering*, vol. 80, p. 107974, déc. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107974.

[28]M. T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, L. K. Konan, A. Zidol, et W. C. N'Cho, « Reactivity of Recycled Glass Powder in a Cementitious Medium », *New Journal of Glass and Ceramics*, vol. 10, n° 03, Art. n° 03, juin 2020, doi: 10.4236/njgc.2020.103003.

[29]G. M. S. Islam, M. H. Rahman, et N. Kazi, « Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice », *International Journal of*

Sustainable Built Environment, vol. 6, n° 1, p. 37□44, juin 2017, doi: 10.1016/j.ijsbe.2016.10.005.

[30] A. Abderraouf Belkadi *et al.*, « Experimental investigation into the potential of recycled concrete and waste glass powders for improving the sustainability and performance of cement mortars properties », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 64, p. 103710, avr. 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103710.

[31] M. Meera et S. Gupta, « Performance evaluation of marble powder and fly ash concrete for non-structural applications », *Journal of Building Engineering*, vol. 84, p. 108499, mai 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108499.

[32] H. Binici et O. Aksogan, « Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate », *Journal of Building Engineering*, vol. 19, p. 109□121, sept. 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.04.022.

[33] V. Singhal, R. Nagar, et V. Agrawal, « Sustainable use of fly ash and waste marble slurry powder in concrete », *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, p. 975□981, janv. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.650.

[34] Moussa Hadjadj , Mohamed Guendouz , Djamila Boukhelkhal , The effect of using seashells as cementitious bio-material and granite industrial waste as fine aggregate on mechanical and durability properties of green flowable sand concrete., Journal of building, Journal of Building Engineering 87 (2024) 108968. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108968

[35] BADAOUI, Ahmed, Hicham KEFFAZ, and Mohamed GUENDOUZ. "Valorisation des déchets de coquillage dans le béton de sable fluide." (2020).

[36] K. Vardhan, R. Siddique, et S. Goyal, « Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 228, p. 116730, déc. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116730.

[37] M. Guendouz, Dj. Boukhelkhal, A. Mechantel, T. Boukerma, Valorization of coffee waste as bio-aggregates in crushed sand concrete production, Envir. Engineer. Manag. J. 22 (1) (2023) 147-156, http://doi.org/10.30638/eemj.2023.013,

[38] P. H. Joshi et D. N. Parekh, « Valorization of ceramic waste powder as cementitious blend in self-compacting concrete – A review », *Materials Today: Proceedings*, vol. 77, p. 1007□1015, janv. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.01.068.

[39]L. Li, P. Joseph, X. Zhang, et L. Zhang, « A study of some relevant properties of concrete incorporating waste ceramic powder as a cement replacement agent », *Journal of Building Engineering*, vol. 87, p. 109106, juin 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109106.

[40]M. Amin, A. M. Zeyad, I. S. Agwa, et M. S. Rizk, « Effect of industrial wastes on the properties of sustainable ultra-high-performance concrete: Ganite, ceramic, and glass », *Construction and Building Materials*, vol. 428, p. 136292, mai 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136292.

[41]F. Pacheco-Torgal et S. Jalali, « Reusing ceramic wastes in concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 24, n° 5, p. 832□838, mai 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023.

[42] Mohamed Guendouz, Djamila Boukhelkhal, Alexandra Bourdot, Oussama Babachikh and Amine Hamadouche., , The Effect of Ceramic Wastes on Physical and Mechanical Properties of Eco-Friendly Flowable Sand Concrete, *Ceramic Materials*, IntechOpen,2020. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95041

[43] HADJADJ, Moussa, Abdelrahman ZANAGUI, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence couplé de déchets plastique et de céramique sur les performances du béton autoplacant." (2020).

[44]Y. Ding, H. Dong, M. Cao, F. Pacheco-Torgal, et C. Azevedo, « 17 - Recycled household ceramic waste in eco-efficient cement: A case study », in *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R. Tuladhar, et A. Koutamanis, Éd., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. , Woodhead Publishing, 2020, p. 339□354. doi: 10.1016/B978-0-12-819055-5.00017-6.

[45]D. M. Kannan, S. H. Aboubakr, A. S. EL-Dieb, et M. M. Reda Taha, « High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement », *Construction and Building Materials*, vol. 144, p. 35□41, juill. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115.

[46]M. J. Taher, E. H. Abed, et M. S. Hashim, « Using ceramic waste tile powder as a sustainable and eco-friendly partial cement replacement in concrete production », *Materials Today: Proceedings*, avr. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.060.

[47] M. Guendouz, Dj. Boukhelkhal, A. Bourdot, O. Babachikh, A. Hamadouche, The effect of ceramic wastes on physical and mechanical properties of eco-friendly fowable sand concrete, Ceramic Materials, 2020, IntechOpen, 10-12. DOI: 10.5772/intechopen.95041

[48]L. Li, P. Joseph, X. Zhang, et L. Zhang, « A study of some relevant properties of concrete incorporating waste ceramic powder as a cement replacement agent », *Journal of Building Engineering*, vol. 87, p. 109106, juin 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109106.

[49] M. Guendouz, Dj. Boukhelkhal, A. Bourdot, Recycling of floor tile waste as fine aggregate in flowable sand concrete, Adva. gre. energ. mater. techn. Springer (2021) 223-229. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0378-5_30

[50] Mohamed Guendouz, Djamila Boukhelkhal, Zakaria Triki, Abdelah Mechantel and Tarek Boukerma, Effect of using spent coffee grounds wastes as aggregates on physical and thermal properties of sand concrete. Algerian Journal of Environmental Science and Technology, Vol.9. N°3. (**2023**). https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/894

[51]I. Taji *et al.*, « Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust », *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, p. 837□846, févr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.091.

[52] Djamila Boukhelkhal, **Mohamed Guendouz**, Zakaria Triki, Physical and thermal properties of lightweight self-compacting mortar made with recycled walnut shells as fine agreggrates. Algerian Journal of Environmental Science and Technology, Vol.9. No3. (**2023**). https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/898

[53] TAHRAOUI, Youcef, Nour Elislam DJEMAI, and Mohamed GUENDOUZ. "Fabrication d'un éco-matériaux à base de déchets de fonderie." Mémoire de Master, (2020).

[54]S. A. Abukersh et C. A. Fairfield, « Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 10, p. 4088□4094, oct. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.047.

[55] Dj. Boukhelkhal, M. Guendouz, The use of non-destructive tests to estimate Self-compacting concrete compressive strength, MATEC Web of Conferences. 149 (2018) 01036, https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901036

[56]M. A. B. Martins, L. R. R. Silva, B. H. B. Kuffner, R. M. Barros, et M. L. N. M. Melo, « Behavior of high strength self-compacting concrete with marble/granite processing waste and waste foundry exhaust sand, subjected to chemical attacks », *Construction and Building Materials*, vol. 323, p. 126492, mars 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126492.

[57] Laid Guermiti, Dalila Benamara , Mohamed Guendouz, Experimental and numerical investigation of the workability and mechanical properties of High-performance fiber-reinforced fluid concrete (HPFRFC), International journal of advanced studies in computer

science and engineering, IJASCSE, V. 11 N°5, (2022). https://new.ijascse.org/IJASCSE-volume-11-issue-05.html

[58] DELCI, Dalila, Imane DOUIB, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence des fibres végétales sur les performances mécaniques et thermiques de béton de sable fluide." Mémoire de Master, (2020).

[59] E. Asadi Shamsabadi, M. Ghalehnovi, J. De Brito, et A. Khodabakhshian, « Performance of Concrete with Waste Granite Powder: The Effect of Superplasticizers », *Applied Sciences*, vol. 8, n° 10, Art. n° 10, oct. 2018, doi: 10.3390/app8101808.

[60] U. E. N. C. for E. Assessment, « Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust ». Consulté le: 14 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/2653311

[61] Mohamed Guendouz, Farid Debieb, El Hadj Kadri , Formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques, HAL Id: hal-01167754 https://hal.science/hal-01167754 24 Jun 2015

[62] Benimam Samir, Debieb Farid,Bentchikou Mohamed et Guendouz Mohamed Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton ,MATEC Web of Conférences,(**2014**)V.11.01033 https://doi.org/10.1051/matecconf/20141101033

[63] Samir Benimam, Mohamed Bentchikou, Farid Debieb, Said Kenai and Mohamed Guendouz, Physical and mechanical properties of cement mortar with LLDPE powder and PET fiber wastes. Advances in Concrete Construction, Vol. 12, No. 6 (2021) 461-467. https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.6.461

[64] Guendouz Mohamed, Boukhelkhal Djamila, Properties of dune sand concrete containing coffee waste**,** MATEC Web of Conférences, **(2018)**V.149. 01039 https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901039

[65] D. M. Sadek, M. M. El-Attar, et H. A. Ali, « Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development », *Journal of Cleaner Production*, vol. 121, p. 19□32, mai 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.044.

[66] J. Ahmad *et al.*, « Concrete with Partial Substitution of Waste Glass and Recycled Concrete Aggregate », *Materials*, vol. 15, n° 2, Art. n° 2, janv. 2022, doi: 10.3390/ma15020430.

[67] Boudjema, Mohamed, Ahmed Kennoudi, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence de déchets d'aluminium sur les performances de Béton de sable fluide." Mémoire de Master (2020).

[68] Bouziani, Tarek, and Mohamed GUENDOUZ. "Propriétés physico-mécanique et thermique d'un éco-matériau de construction a base des fibres Posidonie oceanique." Mémoire de Master (2021).

[69] M. Guendouz, Dj. Boukhelkhal, Physical and mechanical properties of cement mortar made with brick waste. MATEC Web of Conferences. 149 (2018) 01077. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901077

[70] BOUCHENAFA, Hafidha, Hayet TERKMANE, and Mohamed GUENDOUZ. "Elaboration d'un éco-matériau de construction à base des isolants recyclés." Mémoire de Master, (2021).

[71] Guendouz Mohamed, Boukhelkhal Djamila, Recycling of rubber waste in sand concrete, Journal of building materials and structures, (**2017**) V.4: 42-49. https://doi.org/10.34118/jbms.v4i2.30

[72] Benaissa, Yasmine, Asma Belkessam, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence couplé de déchets céramiques et coquillages sur les performances de béton de sable fluide." Mémoire de Master, (2021).

[73] BACHENE, Sihem, GUENDOUZ, Mohamed, et al. Elaboration d'un éco-matériau de construction à base de déchets de céramiques blanc. Mémoire de Master, 2020.

[74] S. Ghannam, H. Najm, et R. Vasconez, « Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand », *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 9, p. 1□9, sept. 2016, doi: 10.1016/j.susmat.2016.06.001.

[75] DOUIFI, Zakaria, et al. "Etude de l'influence couplée des déchets solides et de fibres métalliques sur les propriétés physico-mécanique d'un écomatériau de construction." Mémoire de Master,(2022).

[76] HADJADJ, Moussa, Abdelrahman ZANAGUI, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence couplé de déchets plastique et de céramique sur les performances du béton autoplacant." Mémoire de Master (2020).

[77] AHMEDI, Malika, and Mohamed GUENDOUZ. "Développement d'un nouveaux composite cimentaire à base des déchets industriels combinés avec les déchets de coquillage." Mémoire de Master, (2022).

[78] L. Gautam, S. Bansal, K. Vaibhav Sharma, et P. Kalla, « Bone-china ceramic powder and granite industrial by-product waste in self-compacting concrete: A durability assessment with statistical validation », *Structures*, vol. 54, p. 837□856, août 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.05.094.

[79] RIALI, Asmaa, HAMMOUCHE, Ibtihal, et GUENDOUZ, Mohamed. Caractéristiques physico-mécaniques du béton du sable fluide à base des déchets céramique rouge. Mémoir de Master,2020.