

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté des Sciences
Département : Génie civil
Ref : D012126002D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع : D012126002D

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD En Génie Civil

Option :

Matériaux en génie civil

Thème

Contribution à la formulation d'un béton vert à base de déchet de pneus recyclés

Présentée par :

BOUABAZ AMEL

Soutenue publiquement, le 08/01/2026 devant le jury composé de :

ABDELOUHAD Assia	MCA	Université de Skikda	Présidente
DJEBIEN Rachid	Professeur	Université de Skikda	Rapporteur
BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma	Co-directeur
DERABLA Riad	MCA	Université de Skikda	Examineur
MERDAS Abdelghani	Professeur	Université de Sétif	Examineur

Dédicace

Je dédie humblement ce travail, fruit de nombreuses années d'efforts, de sacrifices et de passion à :

À la mémoire de mon père,

qui a partagé avec moi la joie de ma réussite au concours de doctorat, mais qui nous a quittés avant de me voir couronnée de ce titre

À ma mère,

pour son amour inconditionnel, son soutien silencieux et ses prières constantes

À mes frères, sœurs, et ma famille

À mes collègues, et mes amis.

Remerciements

Avant de présenter ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ALLAH, Le Très-Haut, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la vie, la santé, la sérénité et la force nécessaire pour mener à bien cette thèse de doctorat.

Je tiens à exprimer mes plus sincères et chaleureux remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur DJEBIEN Rachid, Professeur à l'Université de Skikda, ainsi qu'à mon co-directeur, Monsieur BELACHIA Mouloud, Professeur à l'Université de Guelma, pour leur aide précieuse et efficace tout au long de la réalisation de cette thèse. Leurs conseils éclairés, leur disponibilité, leurs encouragements constants, leur soutien indéfectible ainsi que leurs grandes qualités humaines ont constitué un appui inestimable à chaque étape de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant d'examiner et d'évaluer cette thèse.

Mes remerciements à l'ensemble du corps enseignant et administratif du département de génie civil de l'Université 20 Aout 1955 de Skikda.

Un remerciement particulier que je souhaite adresser les équipes des laboratoires, LNHC Skikda, Cimenterie HDJARESSOUD, LTP est de Skikda et de Constantine qui m'ont autorisé à réaliser la partie expérimentale au niveau de leurs laboratoires de recherche. Aussi aux sociétés Caracalla quarts, Ceram deco et FoudiWahid de me permettre d'obtenir les déchets utilisés.

Je remercie tous mes collègues de travail, pour leur amitié, leurs conseils et leur aide durant toutes les années de travail avec eux,

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille, à mes chers frères, mes sœurs et en particulier ma chère mère qui m'a soutenu durant mes études et qui m'a toujours encouragé.

Sa générosité est inestimable.

J'associe, enfin, à ces remerciements tous ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce travail étudie la possibilité d'utiliser les déchets de verre, de marbre, de brique, et de céramique sous forme de poudre dans la formulation du béton à base de granulat de déchet de pneu recyclé (GDP) pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Pour atteindre cet objectif, une pré-étude d'optimisation des GDP a été réalisée. Des formulations de béton ordinaire contenant 5, 10, 15, et 20% de GDP sous forme de poudrettes (PDP) et sous forme de sable (SDP) ont été préparées par une substitution volumique du sable ordinaire. Ensuite, pour le but d'augmenter le dosage de liant de 350 kg/m^3 à 400 et 450 kg/m^3 une incorporation de 50 et 100 kg de poudre de déchet de verre (PV), poudre de déchet de marbre (PM), poudre de déchet de brique (PB) et poudre de déchet de céramique (PC) dans les formulations des bétons à base de granulat de déchet de pneu (BGP) formulées ont été effectués.

Les BGP formulés ont été étudié à l'état frais à travers des essais d'affaissement au cône d'Abrams, de densité et de teneur en air occlue, et à l'état durci à travers des essais de résistances à la compression, de résistance à la flexion, d'auscultations dynamique et de scléromètre. La durabilité des BGP formulés a été évaluée par les essais d'absorption d'eau et des attaques chimiques. Pour examiner la structure microscopique des BGP formulés, un essai de Diffraction par les Rayons X (DRX), un examen microscopique par le microscope électronique à balayage (MEB), et une analyse thermogravimétrique (ATG) ont été réalisés.

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout des poudres de ces déchets dans la composition du BGP réduit la maniabilité de celui-ci. Cette réduction est plus prononcée dans les BGP contenant de PDB qui montre une réduction de 68%. Les résultats obtenus ont montré aussi que les BGP modifiés par la PDV, PDM, PDB et PDC montrent une augmentation de la résistance à la compression de 32.18%, 41.67%, 55.53% et 39.08% respectivement, Aussi les BGP modifiés par la PDV, PDB et PDC montrent moins de perte de résistance à la compression dans les milieux agressifs. En plus, l'examen microscopique révèle une densification de la matrice cimentaire.

Mots clés : béton, déchets, pneus recyclé, verre, marbre, brique, céramique, propriétés mécaniques.

Abstract

This work investigates the possibility of using glass, marble, brick, and ceramic waste in powder form in the formulation of recycled waste tire aggregate concrete (TAC) to improve its mechanical properties and durability. To achieve this objective, a preliminary GDP optimization study was carried out ordinary concrete formulations containing 5, 10, 15, and 20% were prepared by partial volume substitution of ordinary sand. In order to increase the binder dosage from 350 kg/m³ to 400 and 450 kg/m³, 50 and 100 kg of glass waste powder (GP), marble waste powder (MP), brick waste powder (BP), and ceramic waste powder (CP) in the formulations of concretes based on recycled waste tire aggregate (WTA) were carried out.

The formulated BGPs were studied in the fresh state slump, density and air content tests, and in the hardened state through compressive strength, flexural strength, and dynamic auscultation and Sclerometer tests. The durability of the formulated TAC was evaluated by water absorption and chemical attack tests. To examine the microscopic structure of the formulated GDPs, X-ray diffraction (XRD) test, microscopic examination by scanning electron microscope (SEM), and thermo-gravimetric analysis (TGA) were performed. The results obtained showed that the addition of powders to TAC affected the workability of the formulated concretes, and that this reduction was more pronounced in WRC containing PB, with a reduction rate of -68%. In addition, WRCs modified with GP, MP, BP and CP showed an increase of 32.17%, 41.66%, 55.53% and 39.08% respectively the WRC modified by PDV, PDB and PDC show less loss of compressive strength in aggressive environments. In addition, microscopic examination reveals a densification of the cement matrix.

Keywords: concrete, waste, recycled tires, glass, marble, brick, ceramic, mechanical properties.

الملخص

يدرس هذا العمل إمكانية استخدام نفايات الزجاج والرخام والطوب والسيراميك على شكل مسحوق في تركيب خرسانة من ركام الإطارات المُعاد تدويره من أجل تحسين خصائصها الميكانيكية والمتانة. ولتحقيق هذا الهدف، دراسة أولية من أجل اختيار نوع ركام الإطارات المُعاد تدويره المناسب تم تحضير تركيبات خرسانة عادية تحتوي على 5 و10 و15 و20% من ركام الإطارات المُعاد تدويره على شكل مسحوق وعلى شكل رمل عن طريق الإستبدال الجزئي لحجم للرمل العادي. ويهدف رفع تركيز المادة الرابطة من 350 كغ/م³ إلى 400 و450 كغ/م³ وذلك بإضافة 50 و100 كج من مسحوق نفايات الزجاج، مسحوق نفايات الرخام ، مسحوق نفايات الطوب، ومسحوق نفايات السيراميك إلى تركيبات خرسانة تحتوي على ركام الإطارات المُعاد تدويره.

دُرست الخلائط الخرسانية المركبة التي تحتوي على ركام الإطارات المعاد تدويرها في الحالة الرطبة من خلال إختبارات الركود، الكثافة ومحتوى الهواء، وفي الحالة الصلبة من خلال إختبارات قوة الإنضغاط، وقوة الإنحناء، وسرعة النبض فوق الصوتي، ومقياس الصلابة. قُيِّمت متانة مواد الخلائط الخرسانية المركبة من خلال إختبارات إمتصاص الماء والهجوم الحمضي الكيميائي ولفحص التركيب المجهرى لمواد الخلائط الخرسانية المركبة، أُجري اختبار حيود الأشعة السينية، والفحص المجهرى بإستخدام المجهر الإلكتروني الماسح، والتحليل الوزني الحراري.

أظهرت النتائج أن إضافة مساحيق النفايات إلى الخلائط الخرسانية المركبة تأثير على قابلية تشغيل الخرسانة المصنّعة، وأن هذا الانخفاض يكون أكثر وضوحاً في الخرسانة التي تحتوي على مسحوق الطوب بنسبة إنخفاض 68%. كما أظهرت الخلائط الخرسانية التي تحتوي على مسحوق الزجاج ، الرخام، الطوب والسيراميك زيادة بنسبة 32.17%، و41.66%، و55.53% و39.08% على التوالي، أظهرت الخلائط الخرسانية المعدلة بإضافة مسحوق الزجاج والطوب والسيراميك إنخفاضاً في فقدان مقاومة الضغط في البيئات القاسية. بالإضافة إلى ذلك، كشف الفحص المجهرى عن تكثيف في مصفوفة الأسمنت.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، النفايات، الإطارات المعاد تدويرها، زجاج، رخام، طوب، سيراميك، الخصائص الميكانيكية.

Table des matières

Introduction générale -----	01
<hr/>	
Chapitre 1 : Recherche bibliographique	
<hr/>	
1.1 Introduction -----	04
1.2 Béton à base de granulat de déchet de pneu (BDP) -----	04
1.3. Déchet de pneu -----	04
1.3.1 Composition de déchet de pneu (DP)-----	04
1.3.2 Voies de valorisation de DP-----	06
1.3.3 Processus de recyclage de DP -----	07
1.3.4 Classification de résidu des processus de recyclage de DP-----	08
1.4 Avantages de BGP -----	08
1.4.1 Réduction de la densité -----	08
1.4.2 Résistance aux chocs -----	09
1.4.3 Absorption d'énergie -----	09
1.4.4 Ductilité -----	10
1.4.5 Résistance à la fatigue -----	10
1.4.6 Résistance aux fissures -----	10
1.4.7 Capacité d'amortissement -----	10
1.4.8 Résistance à l'abrasion -----	11
1.4.9 Résistance thermique -----	11
1.4.10 Isolation acoustique -----	11
1.4. 11Autres performances-----	11
1.5. Inconvénients des BGP -----	12
1.5.1 Maniabilité-----	12
1.5.2 Résistance à la compression -----	12
1.5.3 Résistance à la flexion -----	13
1.5.4 Absorption d'eau -----	13
1. 6. Traitement de GDP avant leur utilisation dans le béton -----	14
1. 7. Béton à base de déchet de verre -----	14
1. 7.1 Généralités sur le déchet de verre -----	14
1. 7.2 Propriétés du béton à base de déchet de verre -----	15
1.7.2.1 Maniabilité -----	15

1.7.2.2 Densité -----	16
1.7.2.3 Résistance à la compression -----	16
1.7.2.4 Résistance à la flexion -----	17
1.7.2.5 Absorption d'eau -----	17
1. 8. Béton à base de déchet de marbre -----	18
1. 8.1 Généralités sur le déchet de marbre -----	18
1. 8.2 Propriétés du béton à base de déchet de marbre -----	18
1.8.2.1 Maniabilité -----	18
1.8.2.2 Densité -----	19
1.8.2.3 Résistance à la compression -----	19
1.8.2.4 Résistance à la flexion -----	20
1.8.2.5 Absorption d'eau -----	20
1. 9. Béton à base de déchet de brique -----	20
1. 9.1 Généralités sur le déchet de brique -----	20
1. 9.2 Propriétés du béton à base de déchet brique -----	21
1.9.2.1 Maniabilité -----	21
1.9.2.2 Densité -----	21
1.9.2.3 Résistance à la compression -----	22
1.9.2.4 Résistance à la flexion -----	22
1.9.2.5 Absorption d'eau -----	22
1. 10. Béton à base de déchet de céramique -----	23
1. 10.1 Généralités sur le déchet de céramique -----	23
1. 10.2 Propriétés du béton à base de déchet céramique -----	24
1.10.2.1 Maniabilité -----	24
1.10.2.2 Densité -----	24
1.10.2.3 Résistance à la compression -----	24
1.10.2.4 Résistance à la flexion -----	25
1.10.2.5 Absorption d'eau -----	25
1.11. Conclusion -----	26

Chapitre 2 : Caractéristiques des matériaux et procédures expérimentales

2.1. Introduction -----	27
2.2. Caractérisation des matériaux utilisés -----	27
2.2.1 Ciment (CP)-----	27

2. 2. Granulats-----	28
2.2.2.1 Granulat de pneu recyclé (GDP) -----	30
2.2.3. Poudres des déchets recyclés -----	31
2.2.4. Adjuvants-----	32
2.2.5. Eau de gâchage -----	32
2.3. Formulation et méthodes d’essais-----	33
2.3.1. Formulation des BGP étudiés -----	33
2.3.2. Confection des mélanges -----	34
2.3.3. Confection des Eprouvettes -----	35
2.3.3. Conservation -----	35
2.4 Essais effectuées -----	36
2.4.1 Essais à l’état frais -----	36
2.4.1.1 Affaissement au cône d’Abrams Essais à l’état frais-----	36
2.4.1.2 Densité fraîche -----	37
2.4.1.3 Teneur en air occlus -----	37
2.4.2. Essais à l’état durci-----	38
2.4.2.1 Densité durcie -----	38
2.4.2.2 Résistance à la compression -----	38
2.4.2.3 Résistance à la flexion par flexion -----	39
2.4.2.4. Essai non destructif -----	39
2.4.2.4.1 Essai à l’auscultation dynamique -----	39
2.4.2.4.2 Essai au Scléromètre -----	40
2.4.3. Essai de durabilité -----	40
2.4.3.1 Absorption d’eau par immersion -----	40
2.4.3.2 Absorption d’eau par capillarité-----	41
2.4.3.3 Essai d’attaque chimique par les acides -----	42
2.5. Conclusion -----	44

Chapitre 3 : Propriétés du béton à base de GDP : Effet de la taille de GDP

3.1. Introduction -----	45
3.2. Résultat et discussion-----	45
3.2.1. Essais à l’état frais-----	45
3.2.1.1 Affaissement-----	45
3.2.1.2 Densité -----	46

3.2.1.3 Teneur en air occlus -----	47
3.2.2. Essais à l'état durci -----	48
3.2.2.1 Densité -----	48
3.2.2.2 Résistance à la compression -----	49
3.2.2.3 Résistance à la traction par flexion-----	51
3.2.2.4 Essais non destructif -----	52
3.2.2.5.1 Auscultation dynamique -----	52
3.2.2.3.2 Scléromètre -----	53
3.2.3. Essais de la durabilité -----	55
3.2.3.1 Absorption d'eau par immersion -----	55
3.2.3.2 Absorption d'eau par capillarité -----	56
3.2.3.3 Résistance aux attaques chimiques-----	57
3.2.3.3.1 Résistance à l'attaque par l'acide chlorhydrique -----	57
3.2.3.3.2 Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique-----	58
3.3. Conclusion -----	59

Chapitre 4 Propriétés du BGP à base des poudres des déchets recyclés

4.1. Introduction -----	60
4.2. Formulation des BGP contenant les poudres des déchets recyclés-----	60
4.3. Résultat et discussion-----	64
4.3.1. Essais à l'état frais-----	64
4.3.1.1 Affaissement-----	64
4.3.1.2 Densité -----	65
4.3.1.3 Teneur en air occlus -----	66
4.3.2. Essais à l'état durci -----	67
4.3.2.1 Densité -----	67
4.3.2.2 Résistance à la compression -----	68
4.3.2.3 Résistance à la traction par flexion-----	71
4.3.2.4 Essais non destructif -----	72
4.3.2.4.1 Auscultation dynamique -----	72
4.3.2.4.2 Scléromètre -----	74
4.3.3. Essais de la durabilité -----	75
4.3.3.1 Absorption d'eau par immersion -----	75
4.3.3.2 Absorption d'eau par capillarité-----	77
4.3.3.3 Résistance aux attaques chimiques-----	78

4.3.3.3.1 Résistance à l'attaque par l'acide chlorhydrique -----	78
4.3.3.3.2 Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique-----	79
4.3. 4. Microstructure des BGP modifiés -----	81
4.3.5. Analyse thermogravimétrique (ATG)-----	88
4.4. Conclusion -----	90
<hr/>	
Conclusion générale et Perspectives -----	92
<hr/>	
Références bibliographique -----	94
<hr/>	

Liste des figures

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Figure 1.1 Pneus usagés dans l'environnement -----05

Figure 1.2 Exemples sur les voies de valorisation de DP -----07

Chapitre 2 : Caractéristiques des matériaux et procédures expérimentales

Figure 2.1 Granulats utilisés -----29

Figure 2.2 Distribution granulométrique des granulats usés utilisés -----30

Figure 2.3 GDP utilisés -----30

Figure 2.4 Poudres des déchets utilisés -----32

Figure 2.5 Malaxeur de béton à axe Vertical utilisé -----35

Figure 2.6 Remplissage des moules -----35

Figure 2.7 Conservation des échantillons de BDP après démoulage -----36

Figure 2.8 Essai d'affaissement au cône d'Abrams -----37

Figure 2.9 Mesure de la densité du béton frais -----37

Figure 2.10 Mesure de la teneur en air occlus -----38

Figure 2.11 Mesure de la densité du béton durci -----38

Figure 2.12 Dispositif de l'essai de la compression -----39

Figure 2.13 Dispositif de l'essai de la traction par flexion -----39

Figure 2.14 Essai non destructif à l'auscultation dynamique -----40

Figure 2.15 Essai non destructif au scléromètre -----40

Figure 2.16 Essai d'absorption d'eau par immersion -----41

Figure 2.17 Essai d'absorption d'eau par capillarité -----42

Figure 2.18 Eprouvettes immergées dans les solutions acides -----42

Figure 2.19 Mesure de la perte de la résistance à la compression -----43

Figure 2.20 Formulation des BGP formulés -----43

Chapitre 3 : Propriétés du béton à base de GDP : Effet de la taille de GDP

Figure 3.1 Maniabilité des BGP formulés -----46

Figure 3.2 Densité des BGP formulés -----47

Figure 3.3 Teneur en air occlus des BGP formulés -----48

Figure 3.4 Densité des BGP formulés -----49

Figure 3.5 Résistance à la compression des BGP formulés -----50

Figure 3.6 Résistance à la traction par flexion des BGP formulés -----51

Figure 3.7 VIU des BGP formulés -----	52
Figure 3.8 Indice de rebondissement des BGP formulés -----	53
Figure 3.9 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BGP formulés--	54
Figure 3.10 Corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV des BGP formulés----	54
Figure 3.11 Corrélation entre la résistance à la compression et les indices de rebondissement des BGP formulés-----	54
Figure 3.12 Absorption d'eau par immersion des BGP formulés -----	56
Figure 3.13 Absorption d'eau par capillarité des BGP formulés -----	56
Figure 3.14 Perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans HCl des BGP formulés-----	57
Figure 3.15 Perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans H ₂ SO ₄ des BGP formulés-----	58

Chapitre 4 Propriétés des BGP à base des poudres des déchets recyclés

Figure 4.1 Formulation des BGP a base des poudres étudié -----	62
Figure 4.2 Maniabilité des BGP modifiés-----	64
Figure 4.3 Densité des BGP modifiés -----	66
Figure 4.4 Teneur en air occlus des BGP modifiés -----	67
Figure 4.5 Densité des BGP modifiés -----	68
Figure 4.6 Résistance à la compression des BGP modifiés -----	70
Figure 4.7 Résistance à la traction par flexion des BGP modifiés -----	72
Figure 4.8 VIU des BGP modifiés -----	73
Figure 4.9 Corrélation entre la densité et VIU-----	74
Figure 4.10 Indice de rebondissement des BGP modifiés-----	75
Figure 4.11 Absorption d'eau par immersion des BGP modifiés -----	76
Figure 4.12 Absorption d'eau par capillarité des BGP modifiés -----	77
Figure 4.13 Perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans HCl des BGP modifiés-----	79
Figure 4.14 Perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans H ₂ SO ₄ des BGP modifiés-----	80
Figure 4.15 Analyse microscopique des BGP modifiés -----	81
Figure 4.16 Microstructure des BGP modifiés -----	82
Figure 4.17 Analyse thermogravimétrique des BGP modifiés-----	88
Figure 4.17 Courbes d'ATG des BGP modifiés-----	89

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Tableau 1.1 Composition chimique de DP-----	05
---	----

Chapitre 2 Caractéristiques des matériaux et procédures expérimentales

Tableau 2.1 Caractéristiques Chimiques du CP utilisé -----	27
Tableau 2.2 Caractéristiques Chimiques du CP utilisé -----	28
Tableau 2.3 Caractéristique des granulats utilisé-----	29
Tableau 2.4 Caractéristiques des Poudres utilisés-----	31
Tableau 2.5 Caractéristiques d'adjuvant utilisé -----	32
Tableau 2.6 Caractéristiques d'eau utilisé -----	32
Tableau 2.7 Composition de base de béton témoin par la méthode « Dreux-Gorisse »-----	33
Tableau 2.8 Désignation des types des BDP testés -----	33
Tableau 2.9 Composition des mélanges étudiés en Kg -----	34

Chapitre 4 Propriétés des BP modifiés par les poudres des déchets recyclés

Tableau 4.1 Désignation des types des BGP modifiés testés -----	61
Tableau 4.2 Composition des BGP modifiés étudiés en Kg -----	63

Liste des symboles

BGP	Béton contenant Granulats de Pneu
BP	Béton contenant de pneu recyclé
BDP	Béton contenant déchet de Pneu
CaCl ₂	Chlorure de Calcium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CO ₂	Dioxyde de carbone
DB	Déchet de Brique
DC	Déchet de Céramique
DM	Déchet de Marbre
DP	Déchet de Pneu
DV	Déchet de Verre
GDP	Granulats de Déchet de Pneu
HCl	L'acide chlorhydrique
H ₂ O	molécule d'eau
H ₂ O ₂	Peroxyde d'hydrogène
H ₂ SO ₄	Acide Sulfurique
KMnO ₄	Permanganate de Potassium
NaHSO ₃	Bisulfite de Sodium
NaOH	Hydroxyde de Sodium
PB	Poudre de Brique
PC	Poudre de Céramique
PDP	Poudre de déchet de Pneu
PM	Poudre de Marbre
PV	Poudre de Verre
SDP	Sable de déchet de Pneu
SiH ₄	L'agent de Silane

Introduction générale

Introduction générale

L'accroissement de l'urbanisation et l'industrie de la construction conduit à une consommation croissante du béton. En effet, grâce à sa résistance, sa durabilité et sa capacité de remplissage de formes, le béton est considéré comme le matériau de construction le plus utilisé au monde (Dang et al. 2020). (Meera and Gupta 2024) a noté que la production globale en béton a atteint 4.4 milliards de tonne et que cette production atteindra 18 milliards de tonne à 2050. Cette forte consommation a générée un impact négatif sur l'environnement et un fort épuisement des ressources naturelles notamment les granulats qui représentent 60 à 75 du volume de béton (Wang et al. 2020). Selon (Kuoribo and Mahmoud 2022), l'industrie du béton est responsable de 11% d'émissions artificielles de CO₂ dans le monde. C'est pourquoi, le développement d'un béton vert à faible impact environnemental, issu du recyclage des déchets suscite l'intérêt de nombreuses études (Gautam et al. 2022 ; Miao et al. 2024). D'un autre côté, la génération des déchets solides ont été estimés à plus de 2 milliards de tonnes à annuellement l'échelle mondiale (Zhao et al. 2024 ; Mondal 2024). Cette quantité devrait atteindre 3,4 milliards à 2050 (Yang et al. 2024). Les déchets solides sont classés en quatre catégorie : les déchets industriels, agricoles, de construction et de démolition (Zhao et al. 2024). La première catégorie qui couvre les déchets industriels inclut un des plus graves problèmes environnementaux du 21^e siècle le déchet de pneu (DP) ou couramment appelé la pollution noire (Zhao et al. 2024 ; Han et al. 2024). En effet, la quantité de DP générée dans le monde ne cesse d'augmenter au cours des dernières décennies (Nie et al. 2024). Cette augmentation est due à la croissance rapide de l'industrie d'automobile (Mei et al. 2022). Selon (Li et al. 2024), la production de véhicule a atteint 85 millions unités en 2022. Cette augmentation de la production conduite systématiquement à une augmentation similaire des pneus en caoutchouc mis au rebut (Jiang et al. 2023). En plus, environ un milliard de pneus terminent leur vie utile chaque année et plus de 50% sont jetés sans aucun traitement (Thomas et al. 2015 ; Thomas and Gupta 2016). La Chine uniquement produit près de 20 millions de tonne avec un taux de croissance de 6 à 8 % chaque année, suivie par les États-Unis avec 3.87 millions puis l'Europe avec 3.27 et le Japon avec 1.01 millions de tonnes (Zhao et al. 2024). Ce chiffre mondiale attendrait 1.2 milliards de pneus usagés en 2030 et passerait à 3,4 milliards de tonnes d'ici 2050 (Ince et al. 2022). Le recours à l'incinération de DP considéré comme un déchet solide, non dangereux et non biodégradable (Formela 2024), (Ince et al. 2022) conduit à l'augmentation de la température et à l'émission de gaz nocif dangereux pour la santé publique (Han et al 2024 ; Thomas and Gupta. 2016). L'élimination de DP dans les décharges affectant considérablement les sols et les eaux souterraines car ils contiennent des composés toxiques (Formela 2021). Aussi, le DP jetés forme un abri aux moustiques et à divers parasites affectant la vie humaine et l'environnement (Torretta et al.

Introduction générale

2015 ; Dobrotă et al. 2020 ; Thomas and Gupta 2016b). C'est pourquoi le recyclage de DP est devenu une exigence pour les chercheurs du monde entier qui s'efforce d'évaluer les possibilités de réutilisation de ce déchet (Azunna et al. 2024). La valorisation de DP dans le domaine de fabrication du béton a été largement étudiée. En effet, cela conduit à la création d'un nouveau type de béton contenant de granulats de pneu (GDP) qui offre des avantages écologiques et économiques à la fois (Nie et al. 2024).

La flexibilité de GDP modifie les performances et les propriétés globales du béton rigide (Pacheco-Torres et al. 2018). Aussi, Le béton contenant de GDP se caractérise par, une légèreté accrue (Azunna et al. 2024), une meilleure ductilité (Jiang et al. 2023), des résistances à la fatigue et aux chocs améliorées (Abdelmonem et al. 2019), une excellente déformabilité, un amortissement et une ténacité élevée (Yuan et al. 2024), une résistance améliorée du béton à la température aidant à résister aux dommages causés par la dilatation et la contraction thermiques (Ji et al. 2022), meilleur coefficient d'isolation acoustique (Ince et al. 2022) et thermique. En revanche, une réduction considérable dans les propriétés mécaniques du béton à base de DP (BGP) telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module élastique du béton a été constatée (Thomas et al. 2015 ; Sofi 2018 ; Han et al. 2024). Cette réduction est due à la faible liaison entre le GDP et les autres constituants du béton (Shu and Huang 2014). Pour cela, l'application de BGP se limite dans les éléments non structuraux qui ne nécessitent pas un niveau de résistance plus élevé (Nie et al. 2024 ; Pelisser et al. 2011).

En effet, plusieurs études antérieures ont été faites pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des BGP pour le but d'augmenter la rugosité de GDP (Pelisser et al. 2011 ; Mohammadi et al. 2016 ; Li et al. 2021), à travers le traitement chimique par l'immersion dans la solution l'hydroxyde de sodium (NaOH) et d'autres produits chimiques tels que : le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), l'acide sulfurique (H_2SO_4), chlorure de calcium ($CaCl_2$), permanganate de potassium ($KMnO_4$), bisulfite de sodium ($NaHSO_3$) et agent de couplage silane (SiH_4). (Polydorou et al 2020 ; Bu et al. 2022) ont validé l'efficacité de cette méthode, contrairement, Youssf et al. (2019) ont déclaré que cette méthode n'a pas un impact considérable sur la résistance à la compression, également (Raffoul et al. 2016) ont constaté que les méthodes de prétraitements sont souvent coûteuses, longues et agressives pour le béton et le caoutchouc et ne doit être utilisé que si des avantages significatifs sont prévus, et que l'incorporation des fines comme la fumée de silice et les cendres de carburant pulvérisées montre plus d'efficacité sur les propriétés mécaniques et ont expliqué cette amélioration par l'effet de remplissage des fines et aussi par la réaction pouzzolanique de fumée de silice ce qui est confirmé par (Copetti et al. 2020).

Introduction générale

Dans ce contexte, on travaille dans cette recherche, qui s'inscrit dans une vision de développement durable, et qui consiste à étudier la possibilité d'améliorer les propriétés physico-mécanique et la durabilité d'un BGP préalablement optimiser, par l'incorporation d'autres types de déchet tel que le déchet de verre, marbre, brique et céramique sous forme de poudre. Cela permet de formuler des bétons verts qui répondent aux exigences de la construction durable et conforme aux besoins structuraux identiquement au béton ordinaire.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche une étude comparative entre un béton ordinaire, un BGP et un BGP contenant de poudre de (PV), poudre de marbre (PM), poudre de brique (PB) et poudre de céramique (PC) a été réalisée.

Cette thèse est composée de quatre chapitres.

Après une introduction générale, on présente un état de l'art dans le premier chapitre qui inclut une revue bibliographique, on a synthétisé les bétons contenant de GDP, ses avantages et ses inconvénients, aussi les bétons de déchet de verre (DV), de déchet de marbre (DM), de déchet de brique (DB) et de déchet de céramique (DC), par la présentation de l'origine des différents déchets et les propriétés fraîches, de résistance et de durabilité de ces bétons.

Le deuxième chapitre de cette thèse est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés dans le cadre des travaux expérimentaux. Il présente en détail les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux distingués, telles que la composition, la granulométrie. Cette démarche permet d'assurer la fiabilité des résultats obtenus et les observations expérimentales développées dans les chapitres suivants. Ainsi qu'une description des essais réalisés sur les différents mélanges formulés, L'ensemble de ces essais permet de comparer les performances des différentes formulations et de dégager les mélanges les plus adaptés aux objectifs de la recherche.

Le troisième chapitre étudie l'effet de l'incorporation de la poudrette de DP (PDP) et de sable de DP (SDP) sur les performances du béton, Une étude comparative de l'effet du béton contenant de la poudrette et le sable de caoutchouc pour pneu est également réalisée. Les propriétés physiques et mécaniques des nouveaux mélanges, ainsi que leur durabilité sont étudiées et analysées.

Le quatrième chapitre étudie les bétons formulés contiennent des GDP et de PV, PM, PB et PC. Une étude comparative de l'effet d'ajouts des différentes poudres dans le BGP a également été réalisée.

Et enfin une conclusion générale vient clore cette thèse. Ainsi que des perspectives d'avenir.

Chapitre 1 :

Recherche bibliographique

1.1. Introduction :

L'amélioration de la performance environnementale du béton joue un rôle important dans l'exécution de la construction durable. Cette amélioration peut être atteinte par le remplacement des constituants naturels par des déchets industriels trouver en abondance, ce remplacement qui a approuvé son efficacité et qui conduit à résoudre les problèmes de la gestion des déchets, réduire également le cout du béton et à limiter la consommation d'énergie.

Ce chapitre présente un état de l'art sur le béton à base de granulats de pneu recyclé, en mettant en valeur le déchet de pneu, sa composition, les voies traditionnelles de sa valorisation, le processus de recyclage et se résidu et l'effet de l'incorporation de ses résidus sous forme de granulats dans le béton. Aussi, une lecture générale sur les autres déchets utilisés dans cette recherche telle que le DV, DM, DB et DC, Ainsi que leur effet sur les propriétés du béton dans lequel il est incorporé.

1.2. Béton à base de granulats de déchet de pneu recyclé (BGP) :

Ces dernières années Le BGP constitue une innovation importante dans l'éco-construction (Nie et al. 2024 ; Ji et al. 2022). L'objectif de cette innovation était la réduction des quantités de DP stockée dans les décharges (Azunna et al. 2024) et qui affecte négativement l'environnement (Shahjalal et al. 2024). Depuis leur initiation en 1993, la faisabilité de produire du béton contenant de DP a été étudiée profondément (Elbially et al. 2024). Il a été démontré que le BGP présente des résistances mécaniques réduites par rapport au béton ordinaire. Pour cela, il est prévu que les BGP peuvent être utilisé dans des applications architecturales telles que le clouage du béton, la construction routière et dans les constructions où une résistance élevée n'est pas nécessaire (Topçu et al. 1995).

1.3. Déchet de pneu :

1.3.1. Composition de déchet de pneu (DP) :

Un DP typique contient (en poids) :70 % de caoutchouc récupérable, 15 % d'acier, 3 % de fibres et 12 % matières étrangères (additifs) (Chauhan and Sood 2017). Cette composition confère aux DP une résistance physique, chimique et biologique, ce qui rend leur élimination extrêmement difficile (Zhang et al. 2024 ; Xie et al 2018 ; Advincula et al 2021).

Azunna et al. (2024) ont classé les cinq étapes du cycle de vie d'un pneu comme ce que suit :

L'extraction, la production, la consommation, la collecte des pneus et la gestion des pneus usagés. Ce DP ne peut pas être jeté dans les décharges sans effets dangereux sur l'environnement (Hashamfirooz et al. 2025). Fawzy et al. (2020) ont noté que les décharges de DP peuvent présenter des incendies incontrôlés qui peuvent brûler tous les endroits proches en plus des émissions nocives qui peuvent provoquer une pollution de l'air et nuire à la fertilité des sols.

Parmi les graves incendies dus aux DP dans le monde : l'incendie de pneus de Rhinehart en Virginie aux États-Unis en 1983, l'incendie de pneus de Westley en Californie aux États-Unis en 1999, l'incendie de pneus de Watertown dans le Wisconsin aux États-Unis en 2005 et le grand incendie de pneus de Jahra du Koweït en 2012 (Lien1, Lien 2).



a- Stock de pneus usagés.



b- Un incendie du déchet de pneu.



c- La plus grande décharge de pneus au monde brûle au Koweït .

Figure 1.1 Pneus usagés dans l'environnement (Lien 1-2)

Tableau 1-1 : Composition chimique de DP. (Roychand et al. 2020)

Matériaux constitutifs	Principaux ingrédients	Composition
Caoutchouc	caoutchouc naturel, caoutchouc synthétique	51%
Agent de renforcement	Noir de carbone, silice	25%
Adoucir	Huile de procédé pétrolier, résine synthétique pétrolière, etc.	19.5
Agent de vulcanisation	Soufre, vulcanisateurs organiques	1.0
Vulcanisation accélérée	Accélérateurs thiazoles, accélérateurs amides sulfoniques	1.5
Accélérateur de vulcanisation	Oxyde de zinc, acide stéarique	0.5
Antioxydant	Antioxydants aminés, antioxydants phénoliques, cire	1.5
Remplisseur	Carbonate de calcium, argile	

1.3.2. Voies de valorisation de DP :

Les voies traditionnelles de valorisation de DP sont :

1-La valorisation énergétique : l'utilisation de pneus mis au rebut comme alternative aux combustibles fossiles où leur pouvoir calorifique est égal à celui du charbon de haute qualité et peut être utilisé comme combustible alternatif dans les Fours de cimenterie, les Centrales thermiques, les Chaudières industrielles et les Unités d'incinération.

2-La méthode chimique : qui passe principalement par la pyrolyse, un processus de chauffage en l'absence d'oxygène qui décompose le caoutchouc en trois produits valorisables, le gaz, l'huile et le solide (noir de carbone) utilisables comme sources d'énergie ou matières premières.

3-La valorisation matière :

-La thermolyse et la récupération des granulés : Procédure contient le déchiquetage des pneus, qui sont effectués à l'aide d'énormes machines qui séparent les pneus en minuscules morceaux de différentes tailles qui peuvent être utilisés pour : Gazon synthétique pour stades, Aire de jeux, La technique pneu sol, Bassin d'infiltration, et la technologie de l'asphalte caoutchouté.

-La technique pneu sol : Pneu sol qui consiste à superposer des couches de pneus reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai.

-Bassin d'infiltration : est un ouvrage de gestion des eaux pluviales où des pneus usagés, entiers ou broyés, sont empilés dans une fosse pour former un réservoir. Ces pneus agissent comme un matériau drainant, permettant aux eaux de s'infiltrer lentement dans le sol.

-Technique de l'asphalte caoutchouté consiste à mélanger du caoutchouc broyé, souvent issu de pneus usagés, à des enrobés bitumineux conventionnels pour créer un matériau de chaussée amélioré. Cette méthode offre des avantages significatifs tels que l'amélioration de la durabilité,

la réduction du bruit, une meilleure absorption des chocs et une résistance accrue aux intempéries et au dérapage (Azunna et al. 2024 ; Lien 4).



a-Gazon synthétique pour stades.



b- Aire de jeux.



c-Pose des nappes de pneus Projet pilote – Route de Bousmail.



d-Bassin d'infiltration.



e-Technologie de l'asphalte caoutchouté.

Figure 1.2 Exemples sur les voies de valorisation de DP (Lien 4).

1.3.3. Le processus de recyclage de DP :

Le recyclage d'un DP pour produire des granulats de caoutchouc utilisés dans les mélanges de béton comprend plusieurs étapes telles que le déchiquetage, la séparation du textile et de l'acier présents dans la production de pneus. Ensuite, les granulats de caoutchouc sont classés selon différentes tailles pour être utilisés dans l'application appropriée. Ce processus peut être effectué à température ambiante avec et sans condition humide, à haute température et à température de congélation.

Le premier type est le broyage à la température ambiante à laquelle le caoutchouc est broyé à l'aide de broyeurs.

Le deuxième type est le broyage à la température ambiante dans des conditions humides dans lequel de l'eau est utilisée pour réduire la température croissante et après la fin du processus, les particules de caoutchouc sont séchées.

Le troisième type est le broyage à haute température, environ 130°C, dans lequel le caoutchouc est produit en grains allant de 1 à 6 mm.

Le quatrième type est le broyage à une température de congélation dans laquelle le caoutchouc est refroidi en dessous de sa température pour être dans une vitrine, puis il est déchiqueté à l'aide d'un broyeur à impact.

1.3.4. Classification de résidu des processus de recyclage de DP :

Les résidus de DP sont classés en quatre types en fonction de la distribution granulaire de leurs particules : Selon Chauhan and Sood (2017) :

- les fibres déchiquetées,
- pneus déchiquetés/ébréchés (environ 2 à 20 mm),
- caoutchouc broyé (100 % passant 0,425 mm)
- miettes caoutchouc (4,75-0,425 mm).

Gerges et al. (2018) ont considéré trois grandes catégories de mélanges de caoutchouc pour le DP mis au rebut :

-La première catégorie : Caoutchouc ébréché : ce type de caoutchouc a des dimensions d'environ 25 à 30 mm et est utilisé pour remplacer les granulats grossiers dans le béton.

-La deuxième catégorie Caoutchouc en miettes : les particules de caoutchouc sont très irrégulières, variant entre 3 et 10 mm, et sont utilisés pour remplacer les agrégats fins.

-La troisième catégorie : Caoutchouc en poudre : Les particules de caoutchouc sont plus petites que 1 mm et sont constituées de la poudre formée lors du processus de broyage, tombée des machines de l'usine. Qui gère les déchets de caoutchouc. Ce type de caoutchouc pourrait être utilisé comme béton de remplissage en raison de sa taille.

1.4. Avantages de BGP :

Comparativement au béton conventionnel, l'ajout de GDP flexible dans la composition du béton modifie ses performances. Plusieurs études antérieures valident l'allègement du poids et l'amélioration des propriétés dynamiques (Liu et al. 2012 ; Hameed and Shashikala 2016 ; Assaggaf et al. 2021).

1.4.1. Réduction de la densité :

Le BGP montre une densité inférieure à celle du béton ordinaire (Nadim et al. 2012 ; Li et al. 2018 ; Abdelmonem et al. 2019). Selon Sukontasukkul (2009), le remplacement de 10 à 30% de sable ordinaire par le GDP réduit la densité de 14 à 28%. Issa and Salem (2013) ont montré qu'avec un taux de substitution de 25%, la densité du béton diminue de 8%. Kumar et al. (2014) ont ajouté que la réduction de la densité augmente avec l'augmentation du taux de substitution de GDP en substitution du sable. Ils ont justifié cette réduction par la densité spécifique inférieure de GDP par rapport à celle de sable. (Bulut and kandil 2024) ont noté que l'utilisation de 24 % GDP en substitution de sable réduit la densité du béton à 8.71 %. Cette réduction est attribuée à la faible densité de GDP et l'augmentation de la teneur en air dans le mélange des bétons. (Reda Taha et al. 2008) ont expliqué l'augmentation de la teneur en air dans les BGP par la nature non polaire des particules de GDP et leur tendance à emprisonner l'air dans le mélange de béton. (Parheco-Torgal et al. 2012) et (Chauhan and Sood 2017) ont notés que la réduction de la densité des BGP devient plus significative lorsque le GDP est utilisé comme un gravier. En effet, l'utilisation de GDP comme un sable réduit la densité de 34% alors que l'utilisation de celui-ci comme un gravier réduit la densité par 45% avec le même taux de substitution. Selon Nadim et al. (2012) et Gesoğlu et al. (2014) ont ajouté que l'augmentation de la taille de GDP conduit à une augmentation du taux de réduction de la densité. Cependant, Holmes et al. (2014) et Fadiel et al. (2014), Senin et al. (2017) ont constaté que plus la taille de GDP augmente plus la perte de densité diminue. Siddika et al. (2019) et Lavagna et al. (2020)

ont attribué ces résultats contradictoires à l'irrégularité de la texture des particules de GDP qui modifié la capacité d'emprisonnement de l'air.

1.4.2. Résistance aux chocs :

Plusieurs études ont révélés que la résistance aux chocs des BGP est plus améliorée que celle du béton conventionnel (Youssf et al. 2015 ; Li et al. 2018 ; Chen et al. 2023 ; Abdelaleem et al. 2024 ; Reda Taha et al. 2008) a démontré que la résistance aux chocs augmentait avec l'augmentation de la proportion de GDP jusqu'à 50 %. Au-delà de cette proportion la résistance aux chocs diminuait. Abdelmonem et al. (2019) ont noté que la résistance aux chocs sous charge de flexion a augmenté jusqu'à 83,33 % avec une augmentation de la teneur en caoutchouc. Dezhampannah et al. (2020) ont noté qu'avec un ajout de 10 %, augmente la résistance aux chocs de 1.43 – 1.45 fois. Et ont ajouté que la résistance aux chocs diminue considérablement à mesure que l'ajout de GDP dépasse 20%. L'augmentation de la résistance aux chocs des BGP est attribué à la capacité de GDP à absorber l'énergie plastique.

1.4.3. Absorption d'énergie :

La capacité de BGP à absorber la charge dynamique est généralement meilleure que celui du béton ordinaire (Liu et al 2012 ; Noaman et al. 2016 ; Abdelaleem et al. 2024). Son et al. (2011) ont observé que l'augmentation de la quantité de GDP améliore considérablement les caractéristiques d'absorption d'énergie de BGP. Khaloo et al. (2008) ont noté que le taux optimal de GDP qui donne un indice de ténacité maximum était de 25 %. Par contre, (Reda Taha et al. 2008) ont observé qu'un taux de remplacement de 25 à 50 % de granulats par des GDP pourraient constituer un taux de remplacement optimal produisant une ténacité améliorée. Gupta et al. (2015) ont expliqué cette amélioration par la faible rigidité de GDP qui confère à la matrice du béton une meilleure flexibilité. Abdelmonem et al. (2019) ont noté que l'absorption d'énergie augmente par 4,94%, 6,17% et 12,35% pour des BDP contenant 10%, 20%et 30% de GDP respectivement

1.4.4. Ductilité :

Issa and Salem 2013 ; Li et al. 2018 ; He et al. 2023 ; Youssf et al. 2014) ont observé que la ductilité de tous les mélanges des bétons contenant de GDP était supérieure à celle de béton conventionnel. Noaman et al. (2016) ont constaté que l'incorporation de GDP rend le béton plus ductile. Cette ductilité augmente de 80% lorsque le taux de GDP augmente à 30% (He et al. 2023).

1.4.5. Résistance à la fatigue :

Liu et al. (2013) ont observé que l'augmentation du taux de GDP dans le béton conduit à l'amélioration de la résistance à la fatigue. Zhang and Zhao (2015) ont constaté que la durée de vie en fatigue du béton contenant 25 % de GDP est 2,4 fois supérieure à celle du béton ordinaire. Liu et al. (2023) ont noté qu'après l'ajout de GDP, la déformation maximale du BGP sous charge de fatigue est environ deux fois supérieure à celle du béton ordinaire.

1.4.6. Résistance aux fissures :

Li et al. (2018) et Khaloo et al. (2008) ont constaté que la largeur des fissures dans les BGP est plus petite que celle du béton ordinaire. Ils ont constaté aussi que la propagation des fissures est plus progressive et uniforme. Liu et al. (2012) ont noté que le BGP agirait sur l'arrêt des fissures et la dissipation d'énergie, ralentissant ainsi la vitesse de propagation des fissures et le processus d'endommagement des échantillons. Chen et al. (2014) a attribué l'amélioration de la résistance aux fissures à la bonne propriété élastique de GDP. Abdelaleem et al. (2024) et Zhu et al. (2019) qui ont étudié la relation entre la taille des particules de GDP et la résistance aux fissures, ont conclu que lorsque la taille des particules de GDP est grande, la résistance aux fissures du béton augmente.

1.4.7. Capacité d'amortissement :

Bravo and Brito (2011) et Zheng et al. (2008) ont constaté que le taux d'amortissement du BGP augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en GDP, et que la teneur optimale en GDP serait inférieure à 30. Najim and Hall (2012) ont noté qu'un BGP contenant 15% de GDP présente un comportement d'amortissement des vibrations supérieur de 230 % par rapport à celui d'un béton ordinaire. Xue and Shinozuka (2013) ont observé que le coefficient d'amortissement a augmenté de du 4.75% à 7.70% lorsque 15% du gravier a été remplacé par le GDP. Gisbert et al. (2014) ont ajouté que le taux d'amortissement augmente avec l'augmentation de la taille de particule de GDP.

1.4.8. Résistance à l'abrasion :

Le BGP est plus résistant à l'abrasion par rapport au béton conventionnel (Thomas et al. 2014). Les particules de GDP présentes dans le BGP limite le frottement/meulage du béton de surface. Cela minimise l'action de la poudre abrasive sur la surface du béton. Da Silva et al. (2015) et Abdelmonem et al. (2019) ont constaté que l'augmentation du taux de GDP au-delà de 50% conduit à la réduction de résistance à l'abrasion de 18% par rapport au béton conventionnel.

1.4.9. Résistance thermique :

L'incorporation de GDP dans le béton améliore sa résistance thermique (Hall et al. 2012) ; Youssf et al. 2022 ; Bu et al. (2022). Parhaco-Torgal et al. (2012) ont noté qu'un taux de GDP allant jusqu'à 30 % réduit la conductivité thermique de plus de 50 %. Fraile-Garcia et al. (2016)

ont rapporté que le taux de substitution en GDP ne doit pas dépasser 20% pour une chute significative des propriétés mécaniques.

1.4.10. Isolation acoustique :

Plusieurs recherches ont confirmé l'amélioration de l'isolation acoustique (Sukontasukkul 2009 ; Mhaya et al. 2020 ; Abdelaleem et al. 2024). Le BGP présente un coefficient de réduction du bruit supérieur de 36 % (Parheco-Torgal et al. 2012), ce qui en fait une application idéale pour les écrans antibruit. Wang and Du (2020) ont constaté que le meilleur coefficient d'isolation acoustique était enregistré lorsque la teneur et la taille de GDP étaient respectivement de 30 % et 5-10 mm. Assaggaf et al. (2022) ont constaté que le coefficient de réduction du bruit le plus élevé était obtenu lorsque la teneur en GDP égal à 40 %. Pongsopha et al. (2022) ont également révélé que le coefficient d'absorption acoustique passait de 0,167 à 0,311 lorsque la teneur en GDP augmentait de 10 % à 50 % en remplacement partiel de sable.

1.4.11. Autres performances :

La présence de GDP dans le béton comble les microfissures résultant de l'exposition à des températures élevées (Corinaldesi and Donnini 2019 ; Youssf et al. 2017). Aussi, Le GDP réduit également la sensibilité du béton à la température, aidant à résister aux dommages causés par la dilatation et la contraction thermiques (Kuoribo et al. 2023). D'un autre côté, l'ajout de GDP dans le béton améliore sa résistance électrique (Hall et al. 2012 ; Youssf et al. 2022). Ahmed et al. (2022) et Onuaguluchi and Panesar (2014) ont observé que le GDP est agissait comme un agent électrique.

Abdelmonem et al (2019) et Abdelaleem et al (2024) ont constaté une amélioration de l'énergie d'impact. Cela favorise l'utilisation de BGP dans les structures sensibles aux charges d'impact telles que les ponts et les ports.

Kashani et al (2018) ont constaté que la durabilité du BGP est améliorée. Les BGP montrent une bonne résistance aux environnements agressifs tels que les acides.

1.5. Inconvénients des BGP :

1.5.1. Maniabilité :

Des résultats contradictoires sur l'effet de GDP sur la maniabilité du béton ont été obtenus. Gupta et al. (2016) ont noté que le GDP n'affecte pas significativement la maniabilité du béton. Abendeh et al. (2016) ont observé que l'augmentation de la teneur en GDP conduit à l'augmentation d'affaissement du béton. Par contre, Abdullah et al. (2016) ont noté que la maniabilité du BGP est généralement inférieure à celle du béton conventionnel. Chauhan and Sood (2017) ont ajouté que la maniabilité de béton diminue à mesure que la teneur en GDP augmente. Cette tendance a été observé par d'autres chercheurs (Reda Taha et al. 2008 ; Zheng

et al. 2008 ; Moustafa and ElGawad 2015). Abdelmonem et al. (2019) ont noté que le remplacement qu'un taux de 10 % en GDP n'affecte pas la maniabilité. au delà de ce taux la maniabilité des BGP diminue significativement. Bulut and kandil (2024) ont ajouté qu'un phénomène de ségrégation se produit lorsque le taux de GDP dépasse 24 %.

Zheng et al. (2008) et Su et al. (2014) ont reporté que le GDP finement broyé affecte la maniabilité plus que le GDP grossier. En revanche, Holmes et al. (2014) et Roychand et al. (2020) ont noté que l'augmentation de la GDP conduit à l'augmentation de la perte d'affaissement.

1.5.3. La résistance à la compression :

La résistance à la compression est largement utilisée pour caractériser et évaluer la qualité du béton et évaluer indirectement sa durabilité. Le GDP souffre généralement d'une réduction de la résistance à la compression (Li et al. 2024). Cette réduction de la résistance à la compression peut atteindre 85% en fonction de la taille et le taux de GDP (Youssf and ElGawad 2012). Reda Taha et al. (2008) ont attribué cette réduction à la déformabilité des particules de GDP par rapport à la pâte de ciment qui l'entoure et à la faible liaison entre les particules de GDP et la pâte de ciment. Akinyele et al. (2016) ont ajouté que GDP contenait beaucoup de noir, de carbone, et de soufre ces deux éléments principaux agissent comme des impuretés lors du processus d'hydratation. Pour évaluer les taux de réduction de la résistance à la compression des BGP plusieurs études ont été effectuées. Xue and Shinozuka (2013) ont étudié le remplacement de 10% et 20% de graviers ordinaires par le GDP. Ils ont observé une diminution de résistance à la compression de 28,84% et 46,68% respectivement. Chen et al. (2014) ont fait la même méthode de remplacement avec des taux de 25, 50,75 et 100%. Ils ont observé une diminution de la résistance à la compression de 26.5 ,47.1, 58.5, 74.3 % à 28 jours. Le remplacement du sable ordinaire par le GDP dans le béton a fait l'objet de nombreuses études. Bravo and Brito (2011) ont trouvé qu'un taux de remplacement de 15% provoque une chute de résistance à la compression de 50%. Pareillement, Kardos and Durham (2015) ont constaté une réduction de la résistance à la compression par 32.65, 36.73, 42.85, 51.02 et 73.46% lorsque 10, 20, 30, 40 et 50% de sable a été substitue par de GDP respectivement. Cette tendance a été confirmé par plusieurs autres études (Yasser et al. 2023 ; Abdelaleem et al. 2024 ; Bulut and kandil 2024). Reda Taha et al. (2008) et Skripkiunas et al. (2009) ont montré que plus la taille de GDP est grande plus la résistance à la compression du béton est faible. Nadim et al. (2012) ont étudié trois type de GDP de pour voir l'influence de la taille de particule de GDP. Ils ont constaté que l'augmentation de la taille de particules de GDP diminue significativement la

résistance à la compression. Cette constatation a été confirmée par (Rashid et al. 2019 ; Siddika et al. 2019 ; Lijuan et al. 2014 ; Holmes et al. 2014a ; Yung et al. 2013).

1.5.4. Résistance à la flexion :

Al-Akhras et Smadi (2004) ont observé l'amélioration de la résistance à la flexion des mortiers modifiés par un remplacement de sable par des GDP. Cette amélioration a atteint 43 % lorsque le taux de substitution a atteint 10 %. Cependant, Gupta et al. (2014) ont observé que la résistance à la flexion de BGP diminue avec l'augmentation du pourcentage de GDP, et que cette réduction dépend de la forme des particules de GDP. Farhan et al. (2015) ont expliqué cette réduction par la flexibilité et le manque d'adhérence de GDP. Bulut and kandil (2024) ont constaté qu'avec des taux de substitution de 4, 8, 12, 16, 20 et 24% de GDP, une réduction de la résistance à la flexion de 10.73, 24.85, 35.98, 42.44, 71.96 et 75.34% a été enregistré. Su et al. (2014) ont reporté que la réduction de la taille de GDP réduit la perte de la résistance à la flexion. Cependant Roychand et al. (2020) ont observé qu'une augmentation de la taille des particules de GDP diminue la perte de la résistance à la flexion du béton.

1.5.5. Absorption d'eau :

L'absorption d'eau du BGP est généralement supérieure à celle du béton ordinaire. Bravo and Brito (2012) ont observé qu'avec l'ajout de 5%, 10% et 15% de GDP, l'absorption d'eau augmente d'environ 3 %, 13 % et 14 % respectivement. Onuaguluchi and Panesar (2014) ont noté que la porosité du béton augmente en augmentant le taux de GDP. Hall and Najim (2014) ont constaté que le remplacement partiel de 18% granulats ordinaire par le GDP augmente l'absorption d'eau de 3.3% à 5.3%. La même tendance a été enregistré par (Gupta et al (2014) ; Thomas et al. 2015 ; Gupta et al. 2016). Pham et al. (2019) ont expliqué l'augmentation de l'absorption d'eau du BGP par la réduction de la liaison et l'augmentation des vides entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. Cependant Fadiel et al. (2014) ont remarqué que l'ajout de GDP dans la composition du béton réduit les valeurs de l'absorption d'eau. L'ajout de 10% de GDP diminue l'absorption d'eau de 24%.

1.6. Traitement de GDP avant leur utilisation dans le béton :

Pour résoudre le problème de réduction des propriétés mécaniques de BGP, plusieurs études ont utilisé des méthodes de traitement des particules de GDP par des solutions chimiques l'hydroxyde de sodium (NaOH), l'agent de Silane (SiH_4), le chlorure de calcium (CaCl_2), le permanganate de potassium (KMnO_4), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), l'acide sulfurique (H_2SO_4), bisulfite de sodium (NaHSO_3). Ils ont réduit la perte de résistance mécanique de 32%

à 10% avec un taux de substitution de 15% (Youssf et al. 2014 ; Dong et al. 2013 ; Tian et al. 2011 ; He et al. 2016). Mohammadi et al. (2016) ont constaté que le BGP préparé avec la méthode de traitement NaOH pendant 24 heures ont présenté une amélioration de 25 et 5 % de la résistance à la compression et à la flexion respectivement. Li et al. (2021) ont noté que le traitement des particules de GDP par NaOH peut améliorer la liaison entre le GDP et la pâte de ciment. Qui augmente la résistance à la compression jusqu'à 13.9 %. Huang et al. (2013) ont noté que l'agent Silane est utilisé pour modifier la surface des particules GDP et développer des liaisons chimiques entre les particules de GDP et pâte de ciment. Ce traitement conduit à l'augmentation de la résistance à la compression de 24, 9, 18, 14 et 22% pour des taux de substitution de 5, 10, 15, 20 et 25% respectivement.

D'autres chercheurs ont utilisé le traitement des surfaces des particules de GDP avec un rayonnement ultraviolet (UV) dans le but de réduire la perte des propriétés mécaniques (Ossola and Wojcik 2014). Ils ont constaté l'effet avantageux du prétraitement UV-B sur les résistances mécaniques. Al Rawahi and Waris (2017) ont exposé les particules de GDP à la chaleur à 100°C et 200°C avant leur incorporation dans le béton. Ils ont constaté que les résistances mécaniques des échantillons se sont améliorées ainsi que la performance globale du béton.

Copetti et al. (2020) ont recommandé que l'incorporation de la fumée de silice dans le béton contenant des granulats de pneu permette de combler les vides et améliore ses propriétés mécaniques.

1.7. Béton à base de déchet de verre :

1.7.1. Généralités sur le déchet de verre :

Considéré comme un matériau inévitable (Wang et al. 2023). Le verre est un matériau inerte (Belkadi et al. 2024), hautement transparent, fabriqué en générale par la fusion d'un mélange de soude, de silice (environ 70 %), de CaCO_3 et de cendres à une température près de 1 500 °C. Comparé aux cendres volantes, le verre contient généralement plus de SiO_2 , CaO et Na_2O , mais une faible teneur en Al_2O_3 et de Fe_2O_3 (Matos et al. 2024 ; Mustafa et al. 2023). La production a atteint 690 milliards d'unités en 2020, avec une augmentation prévue à 916 milliards d'unités d'ici 2026 (Singh and Mohanty 2024). Cette production engendre 200 millions de tonnes de déchet chaque annuellement. Sous forme de bouteilles, conteneurs, meubles, façades ... etc. (Baikerikar et al. 2023). Ce qui représente environ 5 % du total des déchets solides (Singh et Mohanty (2024). En raison de la large gamme de points de fusion et du coût de recyclage élevé (Benli. 2024), un faible taux de recyclage 31% de quantité de déchet sont recyclée (Singh et

Mohanty (2024), est enregistré. Cela est due à la nécessité d'un processus d'une fusion à des températures allant de 1 200 à 1 400 °C pour donner le produit final (Miao et al.2024).

Le verre en tant que matière première est un élément complètement réutilisable (Ibrahim 2021). Plusieurs voies de réutilisation de ce déchet notamment la fabrication de nouveau verre, l'isolation thermique, les arts et l'artisanat. La nouveauté de l'utilisation des déchets de verre (DV) réside dans leurs avantages environnementaux, car ils réduisent la quantité de déchets de verre envoyés dans les décharges, préservent les ressources naturelles et économisent de l'énergie dans le processus de fabrication (Haido et al. 2021) ; El Saffar et al. 2022 ; Tayeh et al.2020 ; Mustafa et al. 2023). En plus, en raison de sa teneur élevée en silice (Miao et al. 2024), Les DV finement broyés présentent des propriétés pouzzolaniques qui conduisent à l'amélioration des propriétés du béton (Ahmed Khan et al. 2015). Plusieurs études ont été déployées pour utiliser le DV dans l'industrie du béton en remplacement de granulats et ciment (Katoch et al. 2020 ; Shayan and Xu 2006 ; Nassar et al. 2021).

1.7.2 Propriétés du béton à base de déchet de verre :

1.7.2.1. Maniabilité :

De nombreux travaux ont montré que le DV pouvait augmenter la maniabilité de béton (Ali and Al-Tersaw 2012). Soliman and Tagnit Hamou (2016) ont étudié la substitution partielle de ciment par la poudre de PDV. Ils ont rapporté une légère augmentation d'affaissement avec l'augmentation de la teneur en PDV. Cette légère amélioration est due à la faible absorption d'eau et la surface lisse de PDV. Aliabdo et al. (2016) ont ajouté que la surface vitreuse contribue à l'augmentation de la maniabilité de béton. Cependant, Plusieurs études ont noté que l'ajout de DV dans la composition du béton diminue la maniabilité de celui-ci (Taha and Nounu 2008 ; Kou and Xing 2012). Ismail and AL-Hashm (2009) ont noté que le remplacement partiel de de 10 %, 15 % et 20 % de sable par le PDV réduit l'affaissement de 23.34, 30 et 33.34% respectivement. Cette diminution est t'expliquée par la mauvaise géométrie de PDV qui entraîne une diminution de fluidité des mélanges. Shayan et al. (2006) ont montré que les valeurs d'affaissement des mélanges de béton contenant 20 % et 30 % de PDV en remplacement du ciment diminuent de 7.14 % et 14.28 %.ils ont constaté aussi que la substitution de 40 et 75% de sable par le sable de DV réduit la maniabilité de 28.57%. La même tendance a été constaté par (Rahma et al. 2017 ; Paithankar et al. 2023). Cette diminution a été attribuée à la forme angulaire de PDV (Vandhiyan et al. 2013). Paithankar et al (2023) ont accordé cette diminution et la justifié par la grande finesse de poudre de verre, par conséquent, ont prescrit de limiter le taux de remplacement dans le béton à 20-30 % en poids pour obtenir une exécution idéale.

1.7.2.2. Densité :

La densité d'un béton dépend de sa composition, en particulier de la densité des granulats utilisés. Les bétons incorporant de DV en substitution des granulats naturels à une densité plus faible que celle du béton ordinaire (Vasudevan 2013). Ismail and AL-Hashm (2009) ont utilisé 10 %, 15 % et 20 % le PDV en remplacement partiel du sable. Ils ont constaté une réduction de la densité fraîche de 1.28, 1.96 et 2.26%. Cette diminution a été attribuée à la densité spécifique DV qui est généralement inférieure à celle du sable. Shayan et al. (2006) ont montré que les mélanges de béton contenant 20 % et 30 % de PV remplaçant le ciment diminués de 5.19% et 3.322 % respectivement. Et que la substitution de sable naturel par de sable de verre avec des taux de 40 et 75% réduit la densité à 3.90 et 7.30%. Cependant, Mahmoud et al. (2019) ont montré que la substitution de 10, 15, 20 et 25% de ciment par le PV augmente légèrement la densité de 0.46, 0.54, 0.54 et 0.63 respectivement.

1.7.2.3. Résistance à la compression :

Vandhiyan et al. (2013) ont noté qu'avec des taux de substitution de 5, 10 de PDV en remplacement de ciment, la résistance à la compression augmente de 4.78, 8.97 respectivement. Au-delà de 10 de substitution la résistance à la compression tend à diminuer.

La même constatation a été faite par Kumarappan (2013). Vasudevan (2013) a montré que la résistance à la compression augmente jusqu'à 20% de substitution de PDV (Vijayakumar et al. 2013 ; Aliabdo et al. 2016 ; AL-Zubaid et al. 2017 et Ibrahim et al. 2021).

Cependant, Park et al. (2004) ont démontré que la résistance à la compression du béton diminue lorsque la teneur en DV augmente. Taha and Nounu (2008) ont trouvé que le remplacement de 20% de ciment par la PDV réduit la résistance à la compression de 16%. (Du and Tan 2013) ont confirmé que l'utilisation de sable de DV a entraîné une diminution de la résistance à la compression. Cette diminution est due à la surface lisse et des arêtes plus vives des particules de verre, ce qui a entraîné une faible adhérence au niveau de la zone de transition interfaciale (ZTI). La substitution de sable naturel par le DV est abordée par plusieurs chercheurs. Deepak et al. (2020) ont noté que le remplacement de sable ordinaire par la PDV augmente la résistance à la compression jusqu'à 14.20%. Katoch et al. (2020) ont constaté que la résistance à la compression du béton augmente jusqu'à 20 % de remplacement de sable ordinaire par la PDV puis elle diminue progressivement avec l'augmentation de teneur en PDV. Cette réduction est expliquée par la forte fragilité de DV qui est responsable de la production des fissures.

1.7.2.4. La résistance à la flexion :

Vandhiyan et al. (2013) ont constaté qu'avec des taux de substitution de 10 de ciment par la PDV, une amélioration de la résistance à flexion jusqu'à 37% a été observé. Vijayakumar et al. (2013) ont ajouté qu'un remplacement de 20, 30 et 40% de ciment par la PDV augmente la résistance à la flexion de 83.7, 99.07 et 100.0% respectivement. Par contre, Du and Tan (2013) ont affirmé la réduction de la résistance à la flexion avec l'augmentation de taux de substitution de ciment par la PDV. Vaitkevicius et al. (2014) ont recommandé la réduction de la taille des particules de verre pour améliorer la microstructure et la résistance à la flexion du béton. Jang et al. (2017) est attribué cette amélioration à l'effet pouzzolanique du PDV, qui favorise la formation de gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H). Yan et al. (2024) ont ajouté que la PDV a un bon effet de remplissage des micro-vides du béton.

1.7.2.5. Absorption d'eau :

La propriété d'absorption de l'eau est une marque essentielle de la durabilité du béton.

La diminution de l'absorption d'eau peut améliorer considérablement les performances du béton à long terme dans des conditions de service agressives (Ibrahim 2021). L'effet d'ajout de DV sur l'absorption d'eau du béton a été examiné dans plusieurs études.

Taha and Nounu (2008) ont expliqué que la nature imperméable du verre résulte une diminution de l'absorption du béton. Belouadah et al. (2019) ont trouvé que les différents bétons incorporant de la PDV ont des taux d'absorption inférieurs au béton témoin. Ils ont observé aussi que l'augmentation des pourcentages de la PDV se traduit par une diminution de l'absorption d'eau. En effet, l'ajout de 5 à 10% de PDV en remplacement de ciment entraîne une diminution de l'absorption d'eau de 48 et 53.89%. Esmaeili and AL-Mwanes (2021) ont expliqué par l'influence de la surface vitrée de la PDV. Ibrahim (2021) a ajouté qu'avec l'introduction du PDV en remplacement partiel du ciment améliore la compacité de béton par son effet de remplissage (Paul et al. 2022 ; Tahwia et al. 2022).

Cependant, Ikotun et al. (2024) ont constaté qu'avec 5, 15 et 20% le remplacement de ciment par la PDV l'absorption d'eau augmente de 19.56, 25.72 et 30.25% respectivement, Cette augmentation d'absorption d'eau avec l'ajout de PDV est attribuée à la réduction de la tendance au raffinement des pores.

1.8. Béton contenant de déchet de marbre :

1.8.1. Généralités sur le déchet de marbre (DM) :

Le DM est un type de déchet solide (Yan et al. 2024), qui se trouve sous forme de poudre et granulats (Bagaria and Juneja 2023). L'exploitation des carrières de marbre génère des millions

de tonnes de poudre de déchet de marbre (PDM) dans le monde. Environ 20 à 25 % du marbre est réduit en PDM tout au long du processus de sciage (Bagaria and Juneja 2023). La Chine, considérée comme le plus grand producteur de marbre au monde génère plus d'un million de tonne de DM annuellement (Zhang et al. 2020). Rana et al. (2015) ont rapporté que l'Inde a généré six millions de tonnes de DM. La PDM contenant l'oxyde de calcium CaCO_3 comme le composant principale à une finesse élevée et nature inerte (Ruiz-Sánchez et al. 2019 ; Bentlemsan et al. 2023). Khodabakhshian et al. (2018). La PDM est réutilisé dans plusieurs voies de recyclage tel que les résines, dans la production de carreaux et d'enduits traditionnels pour le bâtiment, fabrication de peintures et de mastics, décorations florales ou comme additif dans les mélanges de piscine. La granulométrie similaire de la PDM par rapport au ciment a poussé plusieurs chercheurs a étudiés la possibilité de réutiliser celle-ci dans le domaine de fabrication du béton (Costa et al. 1991 ; Meera and Gupta 2024).

1.8.2 Propriétés du béton à base de déchet de marbre :

1.8.2.1. Maniabilité :

Plusieurs chercheurs ont examiné l'influence d'utilisation du DM sur la maniabilité du béton. Kore and Vyas (2016) ont noté que le remplacement de de 20, 40, 60, 80 et 100% de gravier naturel par le gravier de DM augmente la maniabilité de 5.81, 5.81, 13.95, 13.95, 13.95% respectivement. Ashish (2018) a montré que l'utilisation de 10 et 15% de DMP en substitution de sable augmente la maniabilité de 3.84 et 5.38% respectivement. Cependant Kumar and Jain (2017) et Varadharajan (2020) ont rapporté que la maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage de PDM. Chand et al. (2021) ont constaté que le remplacement de 10, 20, et 30% de sable par la PDM réduit la maniabilité de 15.78, 26.31 et 36.84%. Cette diminution est expliquée par d'absorption d'eau élevée de la PDM (Selvasofia and Sarath Babu (2020). Khodabakhshian et al. (2018) ont étudié le remplacement de 5 %, 10 % et 20% du ciment par la PDM, ils ont constaté qu'au-delà de 10% de PDM la maniabilité du béton diminue. Bourzik et al. (2022) ont expliqué la diminution de la maniabilité du béton contenant de PDM par la présence d'éléments fins qui contribuent à l'augmentation de la surface spécifique. Ruiz-Sánchez et al. (2019) et Khan et al. (2022) ont recommandé que le taux optimal de remplacement de ciment par la PDM soit 10%.

1.8.2.2. Densité :

Singh et al. (2017) ont noté que l'incorporation de PM en remplaçant du ciment ne marque aucun effet significatif sur la densité du béton. Cette tendance a été observée par (Rodrigues et al. 2015). Zhang et al. (2020) ont été expliqués cette tendance par l'obtention d'une distribution

plus uniforme du mélange due à l'incorporation de PM. Khodabakhshian et al. (2017) ont validé cette tendance, et ont ajouté que l'augmentation du taux de substitution au-delà de 5% conduit à une diminution de la densité. Cette diminution peut être expliquée par la faible densité de PM par rapport à celle du ciment (Khodabakhshian et al. 2018). Molnar et Manea (2016) ont constaté qu'un remplacement entier de sable naturel par le sable de DM montre le taux de réduction le plus élevé de la densité. Cette tendance a été observée par Ahmed Kabeer and Vyas (2018), et ont ajouté que la densité maximale a été obtenue lorsque 20 % de sable naturel a été remplacé par le sable de DM. Hebhouh et al. (2011) ont noté que le remplacement de 50% de gravier naturel par le gravier de DM a montré une densité comparable à celle du béton conventionnel. Cependant Binici et al. (2008) ont noté que l'augmentation de la substitution conduit à une augmentation de la densité.

1.8.2.3. Résistance à la compression :

Kore and Vyas (2016) ont constaté une augmentation de la résistance à la compression de 1.33, 11.60, 18.32, 35.00 et 26.50% lorsque 20, 40, 60, 80 et 100% de DM est utilisé comme un gravier respectivement. Aliabdo et al. (2014) ont utilisé la PDM comme substitution de sable. Ils ont constaté que la résistance à la compression augmente de 22% lorsque 15% de PDM a été ajouté. Cette tendance a été observée par d'autres chercheurs (Ashish 2018 ; Selvasofia and Sarath Babu 2020 ; Varadharajan 2020 ; Chand et al. 2021). Cela a été attribué à l'effet de remplissage de PDM qui améliore les propriétés de la matrice cimentaire et de la zone de transition.

D'un autre côté, Aliabdo et al. (2014) ont étudié la possibilité d'utiliser la PDM comme un substituant de ciment. Ils ont constaté que la résistance à la compression s'améliore jusqu'à 10% de PDM. Au-delà de ce pourcentage la résistance à la compression diminue. Cette tendance est observée aussi par (Ashish 2018 ; Khodabakhshian et al. 2018 ; Singh et al. 2019 ; Shukla et al. 2020). L'amélioration de la résistance à la compression en présence de la PDM a été attribué à l'effet de remplissage des pores qui permet d'améliorer les propriétés de la zone de transition (Bourzik et al. 2022). Contrairement Seghir et al. (2019) ont constaté que la substitution de 5, 10 et 15% de ciment par la PDM réduit la résistance à la compression de 5.53, 12.63 et 14.75% respectivement. Cette diminution est expliquée par le fait que la PDM n'a pas de propriété pouzzolanique, ce qui réduit l'efficacité du processus d'hydratation (Özkılıç et al. 2023).

1.8.2.4. Résistance à la flexion :

Kumar and Jain (2017) ont remarqué qu'un remplacement de sable par la PDM améliore la résistance à la flexion avec dosage optimale égale à 15%. Cette tendance a été confirmée par Ashish (2018). Varadharajan (2020) ont noté que le remplacement de 10, 20 et 30% de sable par la PDM augmente la résistance à la flexion de 16,19, 24,35 et 34,21%. Cette augmentation est expliquée toujours par l'effet de remplissage de la PM (Selvasofia and Sarath Babu 2020 ; Chand et al. 2021). Aliabdo et al. (2014) ont étudié l'utilisation de la PDM en remplacement du ciment. Ils ont constaté que l'ajout de 10% de PDM augmente la résistance à la flexion de 15%. La même tendance a été observé par (Ashish 2018 ; Singh et al. 2019), qui l'en attribué à la faible porosité et à la bonne résistance de la matrice cimentaire pâteuse et la zone de transition interfaciale (ITZ).

1.8.2.5. Absorption d'eau :

Boukhelkhal et al. (2017) et Kenan et al. (2019) ont noté qu'une augmentation de l'absorption d'eau a été observée lorsque le remplacement du ciment par la PDM a été effectué. En effet, Khodabakhshian et al. (2017) ont noté que l'ajout de 5, 10 et 20 de PDM remplaçant le ciment augmente l'absorption d'eau de 2.12, 3.72 et 25%. Egalement Bui et al. 2022 ont noté que la substitution de 0 à 20% de ciment par la PM augmente l'absorption d'eau de 1,59 à 3,79 %. Cependant, Belouadah et al. (2019) et Sellaf and Balegh (2023) ont déclaré que la capacité d'absorption d'eau du béton avec ajout de PM réduite par rapport au béton témoin cela est dû à la finesse de la PDM qui réduit les pores et rendre le béton plus compacte.

1.9. Béton à base de déchet de brique

1.9.1. Généralités sur le déchet de brique (DB) :

La fabrication de briques en terre cuite implique une exposition à des températures élevées, allant de 600 à 1 000 °C, qui provoquent une modification de la structure de ses silicates en un composé amorphe qui réagit avec la chaux à température ambiante (Letelier et al. 2018). En chine, environ 20 milliards de m³ de brique en terre cuite ont été produits au cours des 50 dernières années (Zhao et al. 2018). (Aliabdo et al. 2014) ont signalé que les résidus de briques atteignent 50% du total des déchets construction et de démolition. (Tang et al. 2020) a rapporté que la quantité exacte de DB rouge est difficile à estimer. Les États-Unis ont produit 12,3 Mt de DB issus des processus de construction et démolition en 2018 (Lauren et al. 2022), dont 1,5 Million de tonne de cette quantité a été recyclées ou destinée à une utilisation ultérieure. Plusieurs voies de recyclage de DB sont envisagées. Le débit peut-être concassé et utilisé comme granulats dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour

l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de la construction. (Fořt et al. 2018) ont noté que la production de poudre de déchet de briques (PDB) ne nécessite aucun traitement supplémentaire autre que le broyage. La PDB est considérée comme une poudre légère et renouvelable, similaire aux cendres volantes et contenant certains composants actifs pouzzolaniques, tels que SiO_2 et Al_2O_3 (Tang et al. 2023). Ce qui encouragé plusieurs chercheurs à évaluer l'efficacité de son utilisation dans le béton (Wu et al. 2024).

1.8.2. Propriétés de béton à base de de déchet de brique (DP) :

1.8.2.1 Maniabilité :

Abdullah et al. (2022) ont noté que le remplacement des granulats naturel par des granulats de DB avec des taux de 10, 20 et 30% réduit la maniabilité de 13.04, 18.47 et 16.30%. Nepomuceno et al. (2018) ont noté que le remplacement de de gravier naturel par le gravier de DB avec des taux de 10 et 30% augmente l'affaissement de 20 et 40% respectivement. Khatib (2005) a observé que les bétons contenant 25% et 50% granulats de DB en remplacement du sable présentent une réduction de la maniabilité inférieure à 4 %. Arif et al. (2021) ont remarqué qu'un remplacement du ciment par la PDB avec des taux de 5% et 10% augmente l'affaissement de 10.63 et 29.78% respectivement. Ge et al. (2015) ont recommandé qu'avec faible taux de substitution l'ajout de PDB n'affecte pas l'affaissement, mais elle est considérablement réduite à 20-30 % de PDB. Rocha et al. (2024) ont validé la diminution d'affaissement par l'ajout de PDB. En effet le remplacement de 5 et 10% de ciment par la PDB réduit l'affaissement de 5.93 et 35.43 %.

1.8.2.2. Densité :

Alves et al (2014) ont étudié la substitution de 20 %, 50 % et 100 % de sable naturel par de granulats de DB. Ils ont remarqué une diminution de la densité de 2.10, 4.33 et 7.87 %. Gonçalves et al. (2020) ont confirmé la diminution de la densité des mortiers avec l'augmentation de dosage en PDB. Arif et al. (2021) ont constaté qu'un remplacement du ciment par la PDB avec des taux de 5% et 10% provoque une légère diminution de densité de 0.70 et 1.67% respectivement. Rumiński et al. (2022) ont noté une diminution de 4.8% lorsque 5% de ciment remplacé par la PDB. Des résultats identiques ont été noté par Rocha et al. (2024) et Malek et al. (2025) et ont été expliquée cette diminution par la densité spécifique de DB, qui inférieure à celle du ciment.

1.8.2.3. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est l'une des principales propriétés mécaniques. Pour cette raison, le béton contenant de DB est examiné par plusieurs recherches. Nepomuceno et al.

(2018) ont trouvé que le remplacement de de gravier naturel par les granulats de DB avec des taux de 10, 30,50 et 75% diminue la résistance à la compression de 4.95, 8.31, 9.07 et 10.96% respectivement. Des résultats ont été trouvés par (Abdullah et al. 2022 ; Alves et al. 2014). Dang and Zhao (2019) ont trouvé que l'ajout de 25% de sable de DB augmente la résistance à la compression de 9%. Par contre avec un taux de 50%, la résistance à la compression se réduit de 8%. Ji et al (2024) ont rapporté que l'utilisation de DB comme un sable réduit la résistance à la compression du béton. Jerônimo et al. (2018) ont étudié la substitution de taux 20 ,30 et 40% de ciment par la PDB. Ils ont constaté un gain de la résistance à la compression entre 20 et 30 %. La même tendance a été observé par (Arif et al. 2021 ; Olofinnad et al. 2019), qui l'ont attribué à la nature pouzzolanique de la PDB.

1.8.2.4. La Résistance à la flexion :

Nepomuceno et al. (2018) ont utilisé le DB comme un gravier. Ils ont remarqué une diminution de la résistance à la flexion allant de 1.53 à 5.79 % lorsque le taux de substitution varié entre 10 à 75%. Cette tendance a été confirmé par (Alves et al. 2014 ; Abdullah et al. 2022). Arif et al (2021) ont étudié le remplacement partiel de 5 et 10 de ciment par PDB. Ils ont constaté une augmentation de la résistance à la flexion de 2.70 et 3.24% respectivement. Abdullah et al. (2022) ont constaté que le remplacement de 5 et 10% de ciment par la PDB augmente la résistance à la flexion de 3.86 et 12.42%. Par contre, Ji et al. (2024) ont trouvé une diminution de résistance à la flexion de 6.60, 13.63, 22.72, 36.36, 43.93 % respectivement lorsque le gravier naturel en remplaçant par granulats de brique avec des taux de substitution de 10, 20, 30,40 et 50%.

1.8.2.5. Absorption d'eau :

Vieira et al. (2016) ont étudié le remplacement de sable par la PDB avec des taux de 20,50 et 100%. Ils ont constaté une augmentation d'absorption d'eau par immersion de 20, 27 et 45% respectivement. Aussi Rumiński et al. (2022) ont enregistré une augmentation progressive de l'absorption d'eau atteignant 20.7% lorsque 20% du ciment a été remplacée par la PDB. Contrairement, Jerônimo et al. (2018) ont constaté que le remplacement du ciment par la PDB avec des taux 20,30 et 40% réduit la porosité de 12.16, 13.51 et 20.94 % respectivement et diminuer l'absorption d'eau de 13.43 ,14.92 et 22.38% respectivement. Également, Schackow et al. (2015) ont noté que le remplacement de 10 %, 25 % et40 % de ciment par la PDB diminue l'absorption d'eau de 1,03 %, 2,56 % et 9,7 % respectivement. Wang et al. (2022) et Bouleghebar et al. (2023) ont été expliqué cette diminution par le comblement des pores de la pâte de ciment due à la réaction pouzzolanique. Contrairement Rocha et al. (2024) ont été noté que le remplacement de ciment par la PDB augmente progressivement l'absorption d'eau.

1.9. Béton à base de déchet de céramique

1.9.1. Généralités sur le déchet de céramique (DC) :

La fabrication de carreaux de céramique nécessite différentes matières premières tel que l'argile, la potasse, la dolomite, le feldspath, le talc et différents produits chimiques comme le silicate de sodium, le tripoly de sodium, le phosphate (Tahir and Poloju 2017). La production mondiale de carreaux de céramique a atteint 18 339 millions de m² en 2021, soit une augmentation de 7,2 % par rapport aux 17 101 millions de mètres carrés de 2020 (Fu and Lee 202). Cela indique une forte demande mondiale de carreaux de céramique (Li et al. 2024). La Chine est le plus grand producteur mondial de carreaux de céramique avec un pourcentage de plus de 45 % de la production mondiale. Elle produit plus de 10 milliards de mètres carrés annuellement (Xu et al. 2021). Cette production génère environ 25 % de DC, soit 13 millions de tonnes sont générés et jetés chaque année (Chen et al. 2022). (Li et al. 2024) ont reporté que la production de DC a dépassé 22 milliards de tonnes en 2018. Les DC sont des matériaux non biodégradables et très résistants aux forces de dégradation chimiques et physiques. (Heidari and Tavakol (2013) ont souligné que le DC ne peut être recyclés par aucun procédé existant. Pour cela, le DC est souvent directement enfoui dans le sol ou placés dans une décharge à ciel ouvert (Zhang et al. 2023).

La poudre de déchet de céramique (PDC) est un matériau riche en silice, en alumine et a une fine granulométrie (Kannan et al. 2017). Comparativement au ciment, la PDC a une distribution granulométrique plus fine qui contribue à la formation de systèmes de particules plus denses (Zhang et al (2023). On raison de la réactivité pouzzolanique de PDC (Ay and Ünal 2000). Nombreuse études ont été effectuées pour utiliser la PDC dans la fabrication du béton (Yang et al. 2024).

1.9.2. Propriétés du béton à base de déchet céramique :

1.9.2.1. Maniabilité :

Alves et al. (2014) ont noté que la substitution de 20, 50 et 100% de sable naturel par de sable de DC diminue la maniabilité de 2.43, 5.69 et 5.69% respectivement. Cette tendance a été aussi observée par (Siddique et al. 2019). Attaelmanan et al. (2021) ont constaté que la substitution de ciment par la PDC avec des taux de 5, 10,15 et 20% réduit la maniabilité de 1.48, 38.51, 40.74 et 51.85% respectivement. Une tendance similaire a été observée par (Bhogilal and Jayantilal 2018 ; Li et al. 2024). Cette réduction a été expliquée par la surface spécifique élevée de la PDC par rapport à celle du ciment (Kannan et al. 2017). Cependant, Subası et al. (2017)

et Tahir and Poloju (2017) ont noté que le remplacement de 5-10 de ciment par la PDC 5% augmente la maniabilité de 3.03 à 5%.

1.9.2.2. Densité :

L'ajout de DC dans la composition du béton diminue généralement la densité de celui-ci. Alves et al. (2014) ont noté que le remplacement de 20, 50 et 100% de sable naturel par de sable de DC diminue la densité de 4.43, 5.56 et 8.42% respectivement. Rashid et al (2017) ont étudié le remplacement de gravier naturel par des granulats de DC avec des taux de 10, 20 et 30% diminue légèrement la densité de 0.84, 1.26, 1.68% respectivement et l'a été expliqué par la faible densité de granulats de DC par rapport au gravier naturel. Subasi et al. (2017) ont constaté que la substitution du ciment par la PDC avec des taux de 5, 10,15 et 20% diminue la densité de 1.23, 0.99, 1.44 et 1.73% respectivement. Attaelmanan et al (2021) ont déclaré que le remplacement de ciment par la PDC avec des taux de substitution 5, 10,15 et 20% modifie légèrement la densité durcie à 28 jours de 0.10, 0.100.52 et 0.50 % respectivement.

1.9.2.3. Résistance à la compression :

La résistance à la compression des bétons contenant de déchet céramique fait l'objet de plusieurs études. Medina et al. (2012) ont constaté que le remplacement de 15 ,20 et 25% de gravier par le gravier de DC augmente la résistance à la compression de béton de 3.90 ,6.23 et 11.93% respectivement. Par contre, Gonzalez-Corominas and Etxeberria (2014) ont noté que le remplacement de gravier par de gravier de DC avec des taux de 20, 50 et 100% réduit la résistance à la compression de 0.47, 14.76 et 29.19%. Gonzalez-Corominas and Etxeberria (2014) ont ajouté que le remplacement de sable naturel par le sable de DC avec des taux de 15 et 30% augmente la résistance à la compression de 7.45 et 6.82% respectivement. L'amélioration de la résistance à la compression du béton contenant le sable de DC a été aussi observé par (Siddique et al. 2019 ; Hamad et al. 2020 ; Daniel and Sangeetha 2023). Cette augmentation a été expliquée par la teneur élevée en silice de DC (Siddique et al. 2017). Kulovaná et al. (2015) ont noté que la substitution de 10, 20% de ciment par la PDC augmente la résistance à la compression de 1.00 et 2.52%. Li et al. (2019) ont affirmé que le remplacement du ciment par la PDC avec des taux de 5, 10,15 et 20% augmente la résistance à la compression de 20.9, 38.6, 71.2 et 84.8% respectivement. Li et al. (2024) ont observé que le remplacement de 10% de ciment par la PDC augmente la résistance à la compression de 7.40 %. Cependant, lorsque le taux augmente à 20 %, la résistance à la compression diminuée de 3.70 %. Cette réduction a été expliquée par l'augmentation supplémentaire de la teneur en PDC qui affaiblit généralement les liaisons entre la pâte de ciment et les granulats. Contrairement, Kannan et al.

(2017) ont déclaré que le remplacement du ciment par la PDC avec des taux de 10, 20, 30 et 40% réduit la résistance à la compression de 2.72, 8.35, 4.85, 17.28% respectivement. Cette tendance a été observée par (Subası et al. 2017 ; El-Dieb et al.2018 ; Bhogilal and Jayantilal 2018 ; Attaelmanan et al.2021 ; Taher et al. (2023).

1.9.2.4. Résistance à la flexion :

Medina et al. (2012) ont noté que le remplacement de gravier naturel par de gravier de DC avec des taux de 15 ,20 et 25% augmente la résistance à la traction de 10.91, 19.20 et 25.17% respectivement, Par contre, Gonzalez-Corominas and Etxeberria (2014) ont noté que le remplacement de gravier naturel par de granulats de DC avec des taux de 20, 50 et 100% réduit la résistance à la flexion de 10.13, 12.28 et 17.54%. Ont constaté aussi que le remplacement de sable naturel par le sable de DC avec des taux de 15 et 30% augmente légèrement la résistance à la flexion de 0.19 et 1.75% respectivement. Cette observation a été aussi noté par (Daniel and Sangeetha 2023 ; Jwaida et al. 2024). Cependant, Alves et al. (2014) ont noté que le remplacement de 20 %, 50 % et 100 % de sable naturel par le sable de DC réduit la résistance a la flexion de 24.72, 27.77 et 33.88 %.

Tahir and Poloju (2017) ont substitué 10, 20, 30, 40, 50 et 60% de ciment par la PDC. Ils ont constaté une diminution de la résistance à la flexion de 8.31, 8.93, 17.67, 20.37, 38.87 et 61.74% respectivement. Ce comportement et aussi reporté par (Subası et al. 2017 ; Attaelmanan et al. 2021 ; Taher et al 2023). Jwaida et al. (2024) ont recommandé que le remplacement du ciment par la PDC ne doive pas dépasser 20 %.

1.9.2.5. Absorption d'eau :

Medina et al. (2012) ont trouvé que l'ajout de 15 ,20 et 25% de gravier de DC en remplacement de gravier naturel augmente l'absorption d'eau de 3.36, 4.05 et 5.79%. Keshavarz and Mostofinejad (2019) ont ajouté qu'une substitution totale de gravier naturel par des granulats par le gravier de DC augmente l'absorption d'eau de 91.66%. Gonzalez-Corominas and Etxeberria (2014) ont souligné que l'ajout de 15 et 30% de sable de DC réduit l'absorption d'eau de 6.47 et 5.75% respectivement. Cependant, Vieira et al. (2016) ont trouvé que l'ajout de 20,50 et 100 de sable de DC augmente l'absorption d'eau par immersion de 18, 31 et 47%. Respectivement. Heidari and Tavakoli (2013) ont substitué 10, 15, 20, 25, 30 et 40% de ciment par la PDC. Ils ont observé une réduction de l'absorption d'eau de 7.07, 9.09, 13.53, 12.72, 9.89 et 8.68 % respectivement. Ghonaim and Morsy (2023) ont observé une réduction de 15 % de l'absorption d'eau avec un taux de remplacement de 10 % de PDC. Aussi Ahmad et al. (2025) ont noté que le remplacement de 10, 15, 20, 25, 30 et 40 % de ciment par la PDC diminue l'absorption d'eau de 7.07 %, 9.09 %, 13.53 %, 12.72 %, 9.89 % et 8.68 % respectivement.

Shao et al. (2022) et Chen et al. (2022) ont été expliquée cette diminution par la densification accrue de la matrice due à l'activité pouzzolanique.

1.10. Conclusion :

Cette étude bibliographique vise à analyser d'une manière approfondie les bétons contenant de GDP. Une attention particulière a été portée à l'influence de l'incorporation de granulats de pneu recyclé sur les performances du béton. Cette étude permette d'identifier que le béton contenant de GDP présente des performances dynamiques supérieures à celles du béton conventionnel. Cependant, ses propriétés mécaniques de BGP montrent une réduction notable notamment en ce qui concerne la résistance à la compression, cette baisse significative empêche son utilisation dans les éléments structuraux.

Nous avons également examiné l'influence de l'utilisation des différents déchets tels que le DV, DM, DB et DC dans le béton. L'ajout de ces déchets sous forme de poudre dans la formulation du béton montre un effet bénéfique notamment sur les propriétés mécanique, grâce à l'effet de remplissage et l'effet pouzzolanique que ces déchets jouent.

Chapitre 2 :

Caractéristiques des matériaux
et procédures expérimentales

2.1. Introduction :

Dans le cadre de cette recherche expérimentale visant à élaborer un béton à base de déchet de pneus recyclé qui répond aux exigences structurale, économique et environnementale. Pour atteindre cet objectif une substitution partielle du sable naturel par le GDP a été effectuée. Ensuite une augmentation de dosage de liant de 350 kg/m³ à 400 et 450 kg/m³ en utilisant la PV, la PM, la PB et la PC. Dans ce chapitre, une attention particulière est portée à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation du BGP et leurs caractéristiques, les méthodes des essais employées avec leurs modes opératoires permettent de caractériser les propriétés du béton à l'état frais et durci. Les différents matériaux utilisés et les essais effectués sont :

2.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

2.2.1 Ciment (CP) :

Le ciment (CP) utilisé est un ciment (CPJ-CEM II /A-M (S-L) /42.5N) provenant du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA) situé à HJAR ESSOUD. C'est un ciment gris de haute résistance initiale et finale, et qui contient 10 % de calcaire et de laitier de haut fourneau. Conforme à la norme NA 442 et à la norme NA 234. Les essais physico-mécaniques du ciment CP utilisé sont effectués au laboratoire de la cimenterie HJAR ESSOUD. Les caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du CP utilisé sont montrées dans les tableaux 2.1-2.2.

Tableau 2.1 : Caractéristiques Chimiques du CP utilisé

Composition chimique	(%)
CaO	63.90
SiO ₂	21.95
Al ₂ O ₃	5.22
Fe ₂ O ₃	3.49
MgO	1.52
K ₂ O	0.82
Na ₂ O	0.13
SO ₃	1.95
Cl ⁻	1.30

Perte au feu	5.13
C ₃ S	62.67
C ₂ S	10.23
C ₃ A	7.93
C ₄ AF	10.61

Tableau 2.2 : Caractéristiques physico-mécaniques du CP utilisé

Essais	CP
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.18
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.11
Surface spécifique (SSB) (cm ² /g)	4308
Temps de début de prise (min)	160
Temps de fin de prise (min)	230
Résistance à la compression (MPa)	
à 2 jours	18.4
à 7 jours	33.2
à 28 jours	52.2
Résistance à la flexion (MPa)	
à 2 jours	3.9
à 7 jours	5.3
à 28 jours	7.9

2.2.2 Granulats :

Deux types de graviers G1 (8/16) et G2 (16/25) ont été utilisés dans cette étude. Ces graviers de nature calcaire proviennent de la carrière (Figure 2.1) El khroub à Constantine. Le sable utilisé est un sable concassé (SC) de nature calcaire.



Figure 2.1 : Granulats utilisés

Les essais effectués sur les différents granulats ont été réalisés au laboratoire national de l’habitat et de construction (LNHC) et le laboratoire des travaux public EST (LTP EST). Les caractéristiques des granulats sont montrées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractéristique des granulats utilisé.

Caractéristiques	G1 (8/16)	G2 (16/25)	SC	SDP	PDP
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.68	2.74	2.62	1.10	1.07
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.48	1.46	1.54	0.45	0.35
Equivalent de sable (%)	-	-	68.40	-	-
Module de finesse	-	-	2.74	-	-
Coefficient d’aplatissement	13.27	5.88	-	-	-
Micro-Deval (%)	15.60	17.90	-	-	-
Los Angeles (%)	22.08	20.10	-	-	-
Absorption d’eau (%)	0.74	0.59	1.91	1.65	1.65

En plus, la figure 2.2 montre la distribution granulométrique des différents granulats utilisés.

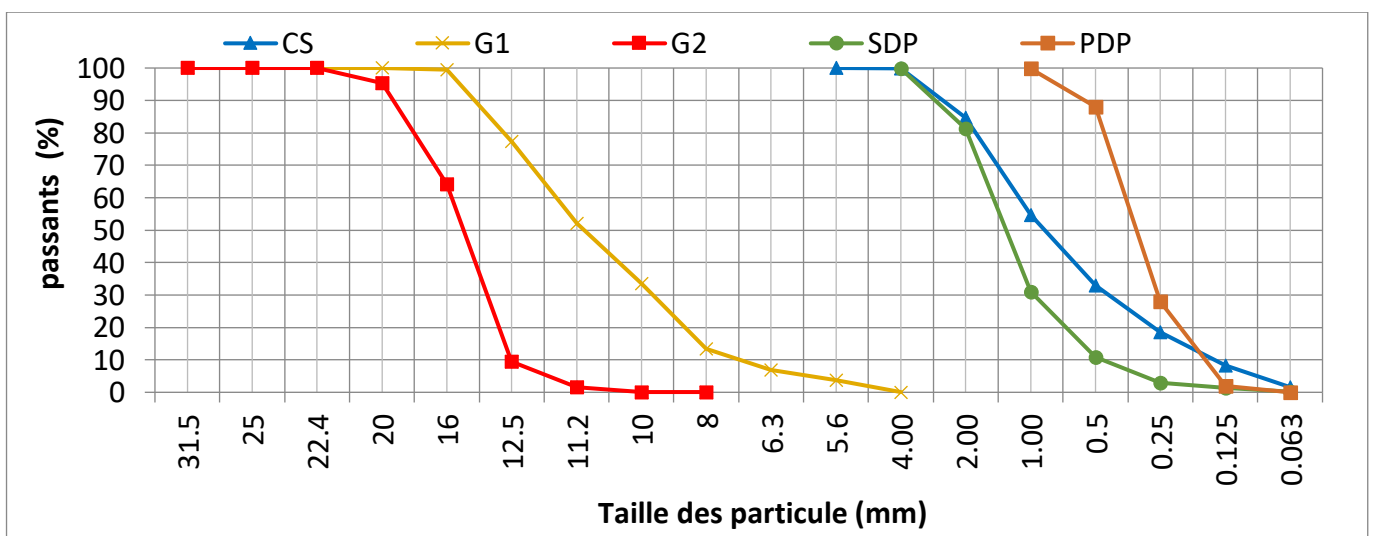


Figure 2.2 : Distribution granulométrique des granulats utilisés.

2.2.2.1 Granulat de pneu recyclé (GDP) :

Le GDP utilisé dans ce travail a été obtenu par broyage mécanique des pneus usés.

(Effectue au niveau de l'entreprise de recyclage FoudiWahid situé à Sétif). Le principe de recyclage est relativement simple, et consiste à débarrasser les pneus usés de leurs armatures métalliques et de procéder à un broyage. Le produit obtenu est ensuite calibré en poudrette (PDP) et en sable (SDP) (Figure 2.3).

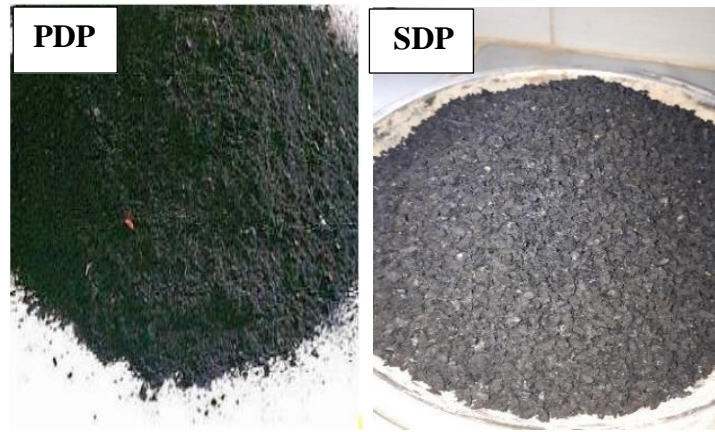


Figure 2.3 : GDP utilisés

Ayant un D max de 1 mm et 4 mm respectivement, une densité spécifique de 1,07 et 1,10 g/cm³ et une absorption d'eau de 1.65%.

Aucun traitement ni lavage à l'eau n'a été effectué sur les particules de GDP.

La distribution granulométrique des particules de PDP et SDP est présentée sur la figure 2.2.

2.2.3 Poudres des déchets recyclés :

Quatre types de poudres ont été utilisés pour réaliser cette étude :

La poudre de verre (PDV) est obtenue auprès de la Société Caracalla, située à Tébessa (Est de l'Algérie) et spécialisée dans le recyclage des déchets de verre.

La poudre de marbre (PDM) a été obtenue à partir des procédés d'exploitation de la roche marbrière dans la carrière de marbre de Filfila (Est de l'Algérie).

La poudre de déchet de brique (PDB) a été obtenue des résidus de brique des chantiers de construction et a été broyée dans le laboratoire de la cimenterie GICA de Hadjar-Soud.

La poudre de déchets de céramique (PDC) a été obtenue lors du processus de fabrication de produits en céramique au niveau de l'entreprise Ceram Decor, entreprise située à Batna (nord-est de l'Algérie), et spécialisée dans la fabrication d'objets modernes céramiques.

La figure II.4 montre les différentes poudres utilisées dans cette étude. En plus les caractéristiques de ces poudres sont montrées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Caractéristiques des Poudres utilisés

Propriétés	PV	PM	PB	PC
Apparence	blanche à grisâtre	blanche	Brun clair	Rouge orangé
Masse volumique absolue	2.51	2.75	2.68	2.62
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	2070	2608	6215	8074
Coefficient d'absorption (%)	2.75	2.90	3.00	3.40
CaO	10.68	54.86	10.69	4.74
SiO ₂	69.16	0.15	54.30	61.52
Al ₂ O ₃	1.86	0.08	14.43	19.41
Fe ₂ O ₃	0.28	0.04	6.08	3.54
MgO	0.75	1.03	2.70	1.01
K ₂ O	0.22	0.76	1.42	2.86
Na ₂ O	13.08	0.11	0.67	1.71
SO ₃	0.05	2.01	0.83	0.06
Cl ⁻	0.03	0.010	0.015	0.015
Perte au feu	4.20	41.8	8.86	5.13



Figure 2.4 : Poudres des déchets utilisés

2.2.4 Adjuvant

Un adjuvant superplastifiant (SP) de type Master Glenium 26 a été utilisé dans ce travail. C'est un adjuvant non chloré à base d'éther polycarboxylate modifié. Ses caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Caractéristiques d'adjuvant utilisé

Densité à 25°C	1.08 g/cm ³ ±0.02
Forme	Liquide
Couleur	Brun
PH	7±1
Chlorures	<0.01%
Taux des alcalins	< 2%

2.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée est une eau potable approvisionnée au niveau du laboratoire de LNHC. Cette eau est conforme pour le gâchage de béton selon NA 1966 (tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Caractéristiques d'eau utilisé

Composition (mg /l)	
Chlorures (Cl ⁻)	56.80
Sulfates (SO ₄ ^{- -})	102.75
PH à 15.5°C à l'émergence	07,55
Matières en suspension	< 4ml
Odeur	Absence total d'odeur d'hydrogène sulfuré
Couleur	Absence de couleur jaune pale
Matières Humiques	Absence de couleur brun jaunâtre
Huiles et Graisses	Aucunes traces visibles
Détergents	Absence de mousses

2.3. Formulation et méthodes d'essais :

Pour l'optimisation de la forme de GDP utilisé, cette étude consiste dans une première étape à étudier l'effet de la distribution granulométrique de GDP sur les propriétés des BGP. Pour cela, deux types de GDP sous forme de PDP et SDP ont été utilisés. La PDP et le SDP ont été incorporé dans la formulation du béton par la substitution volumique de 5, 10,15 et 20% de sable ordinaire.

2.3.1. Formulation des BGP étudiés :

La méthode « Dreux-Gorisse » a été utilisée pour déterminer les quantités des constituants dans la composition du béton témoin de la manière suivante :

En prenant en compte un dosage en ciment = 350 kg/m³, un rapport Eau/Ciment (E/C= 0.48) et un dosage en superplastifiant équivalent à 1.2% du poids du ciment, air = 2–3 % du volume total

Le calcul de dosage des autres constituant est effectués comme suit :

$V.A \text{ du ciment} = 350 / 3,11 = 113 \text{ L.}$

$E/C = 0,48 \Rightarrow E = 0.48 \times 350 = 168 \text{ L.}$

$\text{Volume de Granulats} = 812 \text{ L} - 113 \text{ L} = 699\text{L}$

Tableau 2.7 : Composition de base de béton témoin par la méthode « Dreux-Gorisse »

Composants	%	V.A total des Masse Sèche	Masse V.A Composants	Composants Kg/m3
Gravier 15/25	15	105	2.74	287.5
Gravier 8/16	37	258	2.65	685.5
Sable 0/4	48	336	2.62	876
Ciment		113	3.11	350
Adjuvant : Glenium 26 (1.2%) = 4,2 kg/m3 (3.88 litres)				
Eau		168	1.00	168.0
Volume total de granulats	100%	699		2372

Les tableaux 2.7 et 2.8 présentent les différentes formulations des bétons contenant 5, 10,15 et 20% de GDP sous forme de PDP et SDP.

Tableau 2.8 : Désignation des types des bétons testés

Type de béton	Notation	Désignations
Béton Témoin	BT	Béton de référence
BGP a base de PDP	BPDP5	Béton contenant 5% de PDP
	BPDP10	Béton contenant 10% de PDP
	BPDP15	Béton contenant 15% de PDP
	BPDP20	Béton contenant 20% de PDP
BGP a base de SDP	BSDP5	Béton contenant 5% de GDP
	BSDP10	Béton contenant 10% de GDP
	BSDP15	Béton contenant 15% de GDP
	BSDP20	Béton contenant 20% de GDP

Tableau 2.9 : Composition des mélanges étudiés en Kg.

	G2 (kg/m ³)	G1 (kg/m ³)	SC (kg/m ³)	CP (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	PDP (kg/m ³)	SDP (kg/m ³)
BT	287.50	685.50	876.00	350.00	168,00	4,20	-	-
BPDP5	287.50	685.50	832.20	350.00	168,00	4,20	17.95	-
BPDP10	287.50	685.50	788.40	350.00	168,00	4,20	35.91	-
BPDP15	287.50	685.50	744.60	350.00	168,00	4,20	53.86	-
BPDP20	287.50	685.50	700.80	350.00	168,00	4,20	71.81	-
BSDP5	287.50	685.50	832.20	350.00	168,00	4,20	-	18.45
BSDP10	287.50	685.50	788.40	350.00	168,00	4,20	-	36.90
BSDP15	287.50	685.50	744.60	350.00	168,00	4,20	-	55.35
BSDP20	287.50	685.50	700.80	350.00	168,00	4,20	-	73.80

2.3.2. Confection des mélanges

Les différents mélanges formulés ont été préparés suivant la norme NA 426 dans un malaxeur à axe vertical et à mouvement circulaire, de capacité de 180 litres. Les constituants solides ont été mélangés à sec pendant 3 minutes. Ensuite l'eau et le SP ont été introduits et mélangés pendant trois minutes supplémentaires



Figure 2.5 : Malaxeur de béton à axe Vertical utilisé

2.3.3 Confection des Eprovettes

Après le malaxage, le mélange est introduit et vibré dans des moules standards selon la norme NA5074. Après 24 heures de moulage, les échantillons ont été démoulés.



Figure 2.6 : Remplissage des éprouvettes

2.3.4 Conservation

Après 24 heures de moulage, les échantillons de béton sont démoulés et conservés dans un bassin d'eau à une température de 23 °C et une humidité relative de 100 % jusqu'à leur âge de test.

Trois types de moule ont été utilisés pour la confection des éprouvettes :

- Moule prismatique triple (70 x 70 x 280) mm³, pour effectuer les essais de la traction par flexion et l'absorption d'eau par capillarité.
- Moule cubique (150 x 150 x 150) mm³ pour effectuer les essais de résistance à la compression, de l'ultrason, de scléromètre et de l'absorption d'eau par immersion.
- Moule cubique (100 x 100 x 100) mm³ pour évaluer les pertes en masse et en résistance lors des essais de l'attaque chimique.



Figure 2.7 : Conservation des échantillons de BDP après démoulage

Les échantillons sont conservés dans l'eau pendant des périodes correspondant aux âges des essais. - Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les échantillons destinés aux attaques chimiques par les acides sont soumis à deux (02) modes de conservation dans les différentes solutions suivantes

- L'acide chlorhydrique (HCl) à 5 % en concentration massique.
- L'acide sulfurique (H₂SO₄) à 5 % en concentration massique.

2. 4 Essais effectués :

2.4.1. Essais à l'état frais

Pour examiner les différents bétons formulés à l'état frais, les essais suivants sont effectués :

2.4.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai est effectué conformément à la norme NA 5102. Il permet de mesurer la fluidité de mélange après le gâchage, à l'aide du cône d'Abrams qui reste l'outil de contrôle le plus utilisé à l'échelle mondiale. Le cône utilisé à une hauteur de 300 mm, un sommet et une base circulaires de 100 et 200 mm de diamètre d'intérieur respectivement, Placé sur une surface lisse avec sa petite ouverture vers le haut, le remplissage du cône se fait de trois couches égales. Les trois couches sont compactées avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 16 mm de diamètre ayant une extrémité arrondie. Une fois le cône rempli, sa surface supérieure est nivelée en utilisant la tige avec des mouvements de va-et-vient. Pendant ces opérations, le cône doit rester fixe sur la surface lisse, des écrous de serrage situés à sa base permettent de le maintenir immobile. Après le remplissage, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée affaissement.



Figure 2.8 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams

2.4.1.2. Densité à l'état frais

La densité du béton est effectuée conformément à la norme NA 436, par la pesée d'un moule rempli de béton, selon un moule de remplissage analogue à celui utilisé pour le remplissage des éprouvettes cubiques.

La densité est calculée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{P - P_0}{V}$$

Avec :

ρ est la densité du béton frais

P est le poids du moule plein de béton (arasé à l'aide d'une règle).

P0 est le poids du récipient vide.

V le volume du moule.



Figure 2.9 : Mesure de la densité du béton frais

2.4.1.3. Teneur en Air occlus

Cet essai se fait à l'aide d'un aéromètre à béton et conformément à la norme NA 434. L'essai consiste à mesurer la quantité d'air occlus dans le béton, consiste à mesurer le taux d'air piégé à l'intérieur du mélange, au cours de malaxage et même lors de remplissage et vibration du moule.



Figure 2.10 : Mesure de la teneur en air occlus

2.4.2. Essais à l'état durci

2.4.2.1 Densité à l'état durci

La densité a été calculée selon la norme NA 435 en divisant le poids de l'éprouvette de béton par son volume connu aux âges 7, 28 et 90 jours. La densité est calculée par la formule suivante :

$$\rho = P / V$$

Avec :

ρ est la densité du béton durci

P est le poids de l'éprouvette.

V le volume de l'éprouvette (15x15x15) cm.



Figure 2.11 : Mesure de la densité du béton durci

2.4.2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus importante du béton durci. Conformément à la norme NA 427, on a utilisé des éprouvettes cubiques de dimensions (15×15×15) cm³ pour l'essai de compression à 7, 28 et 90 jours. Cet essai se fait à l'aide d'une presse automatique.

L'éprouvette est positionnée et centrée entre les deux plateaux de la presse, puis chargée progressivement à une vitesse constante jusqu'à la rupture. Les résultats de la résistance en compression correspondent à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes pour chaque âge d'essai.



Figure 2.12 : Dispositif de l'essai de compression

2.4.2.3 Résistance à la traction par flexion

Conformément à la norme NA 428, la valeur de la résistance à la traction par flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (70×70×280) mm³ à 7, 28 et 90 jours. À l'aide d'un dispositif en trois points installé dans une presse automatique.



Figure 2.13 : Dispositif de l'essai de traction par flexion

2.4.2.4. Essai non destructif

Les essais non destructifs peuvent être réalisés aussi bien sur des éprouvettes de laboratoire que sur des ouvrages en béton achevés.

2.4.2.4.1 Essai D'auscultation dynamique

Le teste a été effectué selon la norme NA 5027 à l'aide d'un testeur portatif à indicateurs numériques (Pundit Plus TICO). Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques à travers le béton pour le but d'évaluation de la qualité et l'homogénéité du béton. Une vitesse élevée (> 4000 m/s) indique généralement un béton compact. La vitesse de propagation des ondes ultrasonores se calcule comme ce que suit :

$$V = L / T$$

V : La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le béton.

T : le temps de transmission donné par l'appareil électronique.

L : la distance mesurée entre l'émetteur et le récepteur



Figure 2.14 : Essai d'auscultation dynamique

2.4.2.4.2 Essais au scléromètre

Il est réalisé selon la norme NA 2786, ce test permet de mesurer la dureté superficielle du béton par rebond à l'aide d'un indice de rebondissement enregistré après l'impact. Il existe une relation directe entre la dureté superficielle mesurée et la résistance à la compression du béton.



Figure 2.15 : Essai au scléromètre.

2.4.3 Essai de durabilité

2.4.3.1 Absorption d'eau par immersion

Selon la norme ASTM C642-21, l'essai d'absorption d'eau par immersion a été effectué sur des éprouvettes cubiques (15x15x15 cm) de béton séché à l'étuve jusqu'à ce que leur masse soit constante, puis en les immergeant complètement dans l'eau pendant 24 heures. Cet essai nous permet de déterminer la porosité accessible à l'eau du béton par l'application de la formule suivante :

$$P = (M_a - M_s / \rho_w \times V) \times 100 \%$$

Où :

- M_a : Masse de l'éprouvette saturée d'eau ;
- M_s : Masse sèche de l'éprouvette ;
- ρ_w : Masse volumique de l'eau ;
- V : Volume de l'éprouvette.



Figure 2.16 : Essai d'absorption d'eau par immersion

2.4.3.2 Absorption par capillarité

Conformément à la procédure ASTM C1585-20 qui consiste à suivre l'évolution de la masse des éprouvettes plongées dans l'eau (de 5 mm), l'essai d'absorption par capillarité a été réalisé à 28 jours sur des échantillons de forme prismatique de (70x70x280) mm³, Les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée pendant 24 heures. Ensuite, les faces latérales de l'éprouvette ont été recouvertes par un film plastique. Avant d'être soumises à une absorption d'eau unidirectionnelle depuis leur fond pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée.

À chaque échéance, les éprouvettes sont retirées du récipient, essuyées à l'aide d'un chiffon, pesées, puis replongées dans le récipient. Les échéances de mesure sont les suivantes : 10 minutes, 20 minutes, 30 minutes, 40 minutes, 50 minutes, 60 minutes, 80 minutes, 90 minutes et 4320 minutes (72heures), Les pesées ont été effectuées à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g.

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par l'équation suivante :

$$I = \frac{M_x - M_0}{a \cdot d}$$

Où :

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm) ;

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g),

M₀ : masse initiale (g),

a : section de l'éprouvette (mm²),

d : densité de l'eau (g/mm³)



Figure 2.17 : Essai d'absorption d'eau par capillarité

2.4.3.3 Essai d'attaque chimique par les acides

La résistance de béton aux agressions chimiques des échantillons immergés dans les solutions chimiques d'acide chlorhydrique (HCL) et d'acide sulfurique (H₂SO₄) est évaluée selon la norme ASTM C 267-96.

Après 28 jours de cure sous l'eau, des éprouvettes (10x10x10) cm³, celle-ci sont ensuite immergées pendant 56 jours ,90 jours et 180 jours.



Figure 2.18 : Epreuves immergées dans les solutions HCL et H₂SO₄

Le calcul de la perte de la résistance à la compression est effectué après 56 ,90 et 180 jours sur des éprouvettes tirées de des solutions H₂SO₄ et HCL, nettoyées, séchées et écrasé à l'aide d'une presse automatique. Une lecture comparative est entre les résistances des éprouvettes conservées en solutions acides et celles conservées dans l'eau a été effectué.



Figure 2.19 : Mesure de la perte de la résistance à la compression

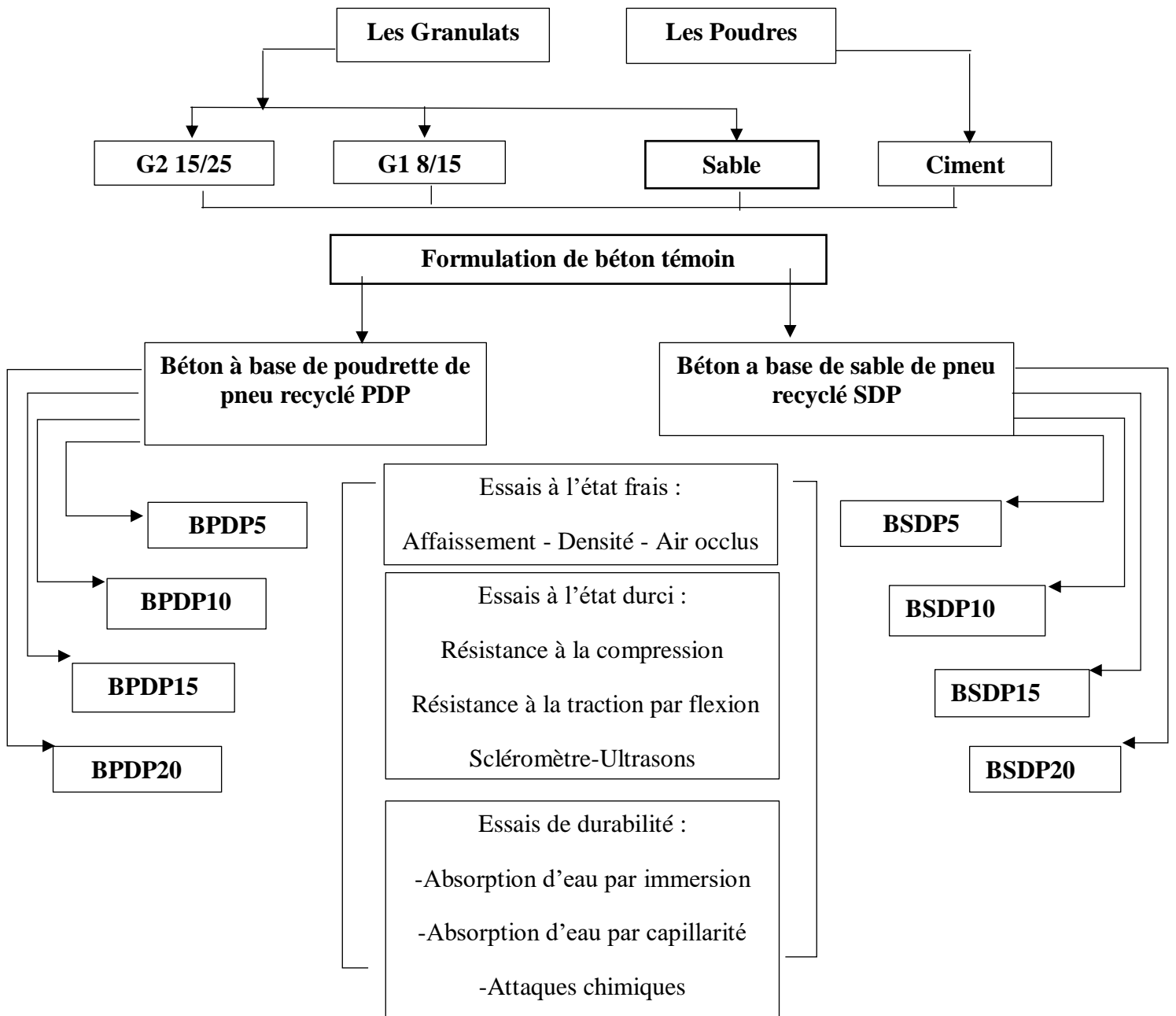


Figure 2.20 : Formulation des BGP formulés

2.5. Conclusion

Cette section présente une synthèse du programme expérimental réalisé, ainsi que les paramètres expérimentaux considérés. Ce qui permet garantir la fiabilité du travail effectué.

L'ensemble des essais réalisés pour caractériser les matériaux utilisés valide leurs conformités aux exigences expérimentales.

L'ensemble des essais effectué sur les différents bétons à l'état frais (affaissement, densité et Teneur en air occlus) et à l'état durci (Densité, résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion et les essais non destructifs) ainsi les essais de la durabilité. Offre une lecture approfondie de la démarche effectuée ce qui permet d'évaluer son efficacité.

Chapitre 3 :
Propriétés du béton à base de
GDP :
Effet de la taille de GDP

3.1. Introduction

Ce chapitre vise à analyser les propriétés physico-mécaniques des BGP à base de GDP utilisé sous forme de PDP et SDP. Les résultats des essais de caractérisation des BGP formulés à l'état frais et durci sont discutés. Cela nous permet d'atteindre l'objectif de cette partie qui consiste à optimiser la forme et le dosage de GDP utilisé dans cette étude.

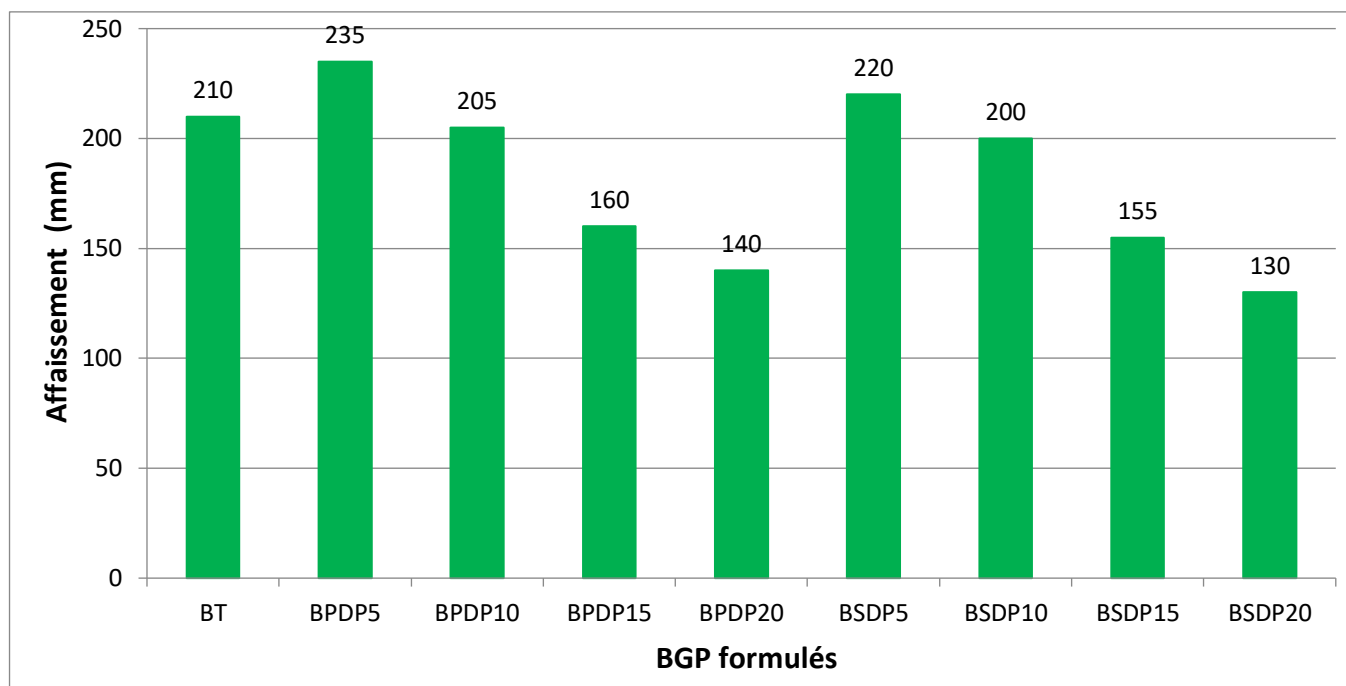
3.2. Résultat et discussion :

3.2.1. Essais à l'état frais :

3.2.1.1 Affaissement :

La figure 3.1 illustre les valeurs d'affaissement des mélanges. On constate que les mélanges contenant 5% de PDP et SDP ont montré des valeurs d'affaissement supérieur à celle du béton témoin de 11.90 et 4.76% respectivement. Cette tendance est similaire à celle observée par Abdelmonem et al. (2019). Qui est expliqué par le faible coefficient d'absorption d'eau de GDP par rapport à celui de sable naturel. On peut aussi remarquer qu'une réduction progressive a été enregistrée avec l'augmentation du taux de substitution. Effectivement, à 10% de substitution l'affaissement diminue légèrement de 2.38 et 4.76% des BDP contenant de PDP et SDP respectivement, et que cette affaissement a diminué pour atteindre 160 et 140 mm, 155 et 130 mm pour les BGP contenant 15 et 20% de PDP et SDP respectivement, pour que la perte d'affaissement atteigne 23.81 et 33.33%, 26.19 et 38.10 %. Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études (Moustafa and El Gawad 2015 ; Zhang et al. 2023). Cette tendance est expliquée par La surface irrégulière des GDP qui augmente le frottement entre les GDP et les autres constituants du béton (Chauhan and Sood 2017 ; Holmes et al. 2014). Aussi, la nature non polaire de GDP diminue la fluidité du béton, et entraîne une augmentation de la résistance à l'écoulement. Cette réduction se traduit par une diminution de la maniabilité (Rashid et al. 2019 ; Azunna et al. 2024).

On peut également constater que les mélanges contenant de PDP sont plus maniables par rapport aux mélanges contenant de SDP, avec un écart de 59.74, 100, 9.99 et 14.31% correspondant aux taux de substitution de 5,10, 15 et 20% respectivement. Cette tendance a été observée par (Reda Taha et al. 2008 ; Holmes et al. 2014). Roychand et al. (2020) ont noté que l'affaissement des BGP diminue avec l'augmentation de la taille de GDP.

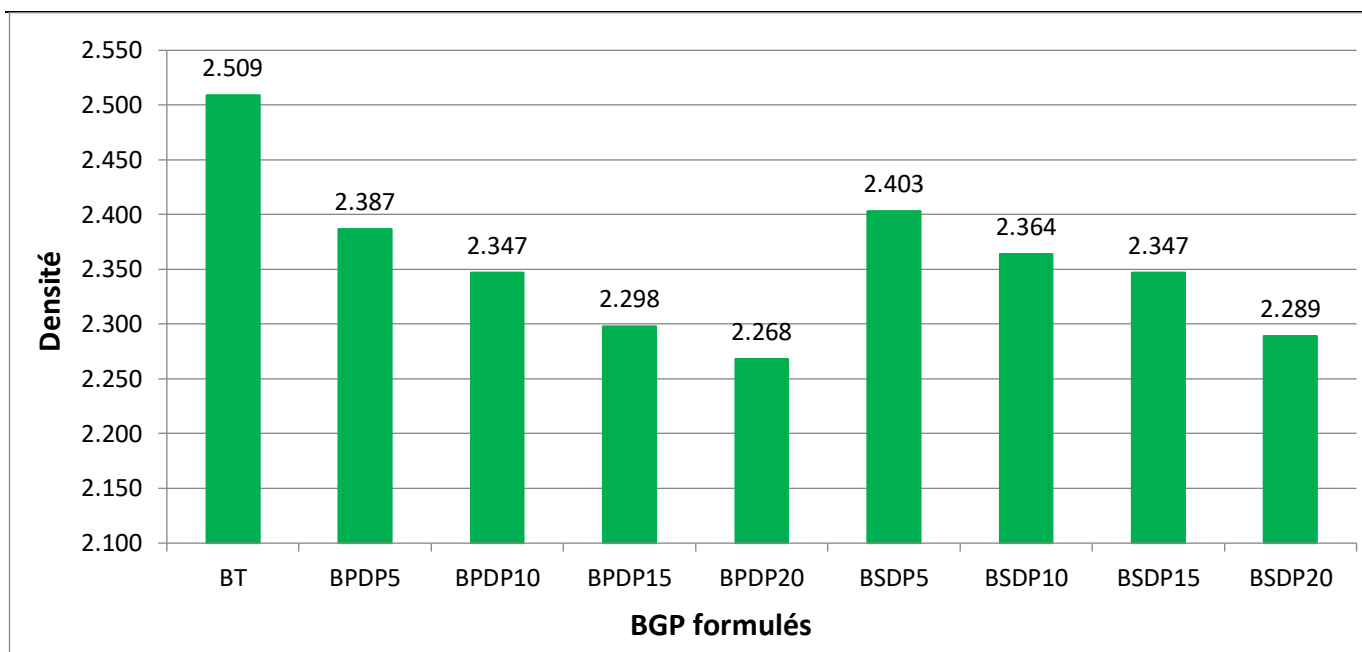


type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification(%)	+12	-2	-24	-33	+5	-5	-26	-38

Figure 3.1 : Maniabilité des BGP formulés.

3.2.1.2. Densité :

Les résultats d’essai de la densité à l’état frais des BGP formulés sont présentés dans La figure 3.2. On remarque une diminution nette de la densité des BGP. Cette diminution augmente avec l’augmentation du taux de substitution. En effet, l’augmentation du taux de substitution de 0 à 20% augmente le taux de réduction à 9.61 et 8.77% des BGP contenant de PDP et SDP respectivement. Cette observation est cohérente avec les travaux de recherche antérieurs (Kumar et al. 2014 ; Bulut and kandil 2024). Cette réduction est attribuée à la densité relative plus faible des particules de GDP par rapport à celle du sable naturel (Noaman et al. 2016 ; Abdelmonem et al. 2019). Cette réduction peut être aussi expliquée par la nature non polaire des particules de GDP qui augmente la teneur en air des BGP (Sabbrojjaman et al. 2024). La figure 3.2 montre aussi que la réduction de la densité est plus significative dans les BGP contenant de PDP par rapport aux BGP contenant de SDP avec un écart de 13.16, 10.52, 23.18 et 8.74% qui correspond aux taux de substitution 5,10,15 et 20% respectivement. Cette tendance est observée par (Senin et al. 2017 ; Roychand et al. 2020 ; Holmes et al. 2014) qu’ont constaté que l’augmentation de la taille des particules de GDP réduit le taux de perte de la densité des BGP.

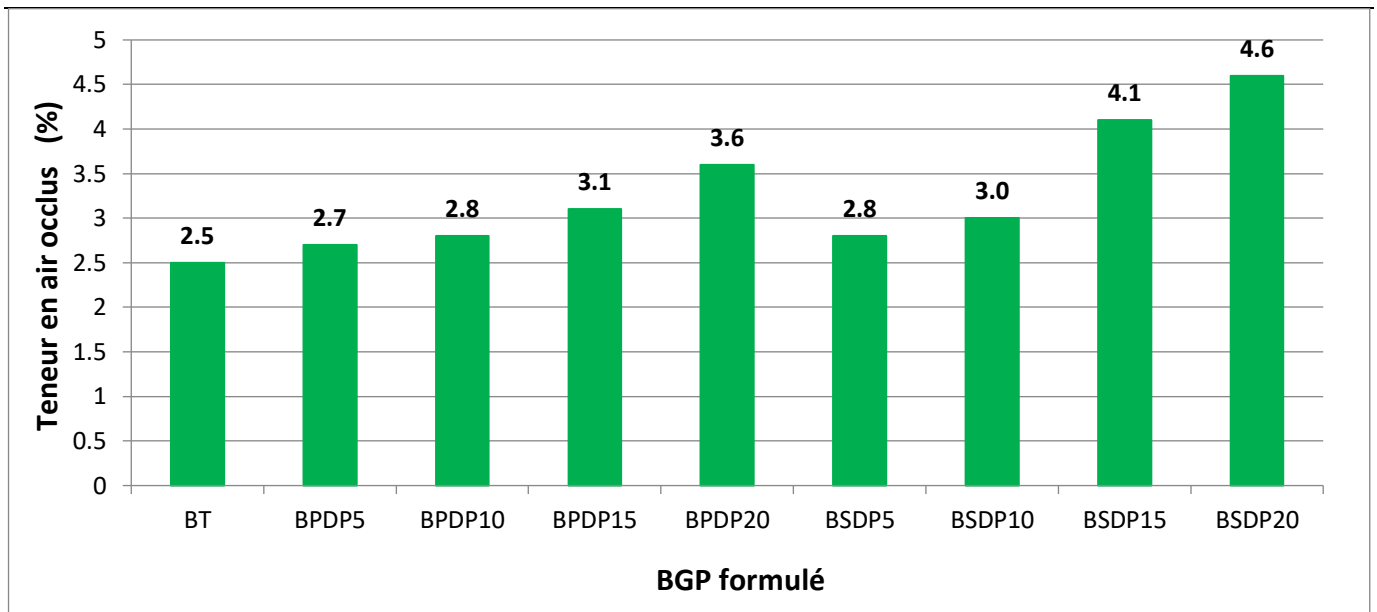


type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification (%)	-5	-6	-8	-9	-4	-5	-6	-8

Figure 3.2 : Densité des BGP formulés.

3.2.1.3 Teneur en air occlus :

D’après la figure 3.3, on peut observer une augmentation progressive de la teneur en air occlus des BGP formulés. Des taux de substitution de 5, 10, 15 et 20% augmentent la teneur en air de 8, 12, 24 et 44% respectivement pour les BGP contenant de PDP, et de 12, 20, 64 et 84% respectivement pour les BGP contenant de SDP. Cette tendance a été noté par (Kardos et al. 2015 ; Azunna et al. 2024 ; Han et al. 2025). Et été expliquer par la mauvaise adhérence de GDP avec les autres constituants du béton (Bu et al. 2022). De plus la figure 3.3 montre que la taille des particules de GDP a un effet sur le taux d’augmentation de la teneur en air occlus. Les BGP contenant de SDP affiche des valeurs en air occlus plus grande que celle des BGP contenant de PDP. Des résultats similaires ont été noté par Han et al. (2025). Cette variation a été expliquée par la différence d’irrégularité de la texture des particules de GDP qui modifiée la capacité d’emprisonnement de l’air (Siddika et al.2019 ; Lavagna et al. 2020).



type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification(%)	+8	+12	+24	+44	+12	+20	+64	+84

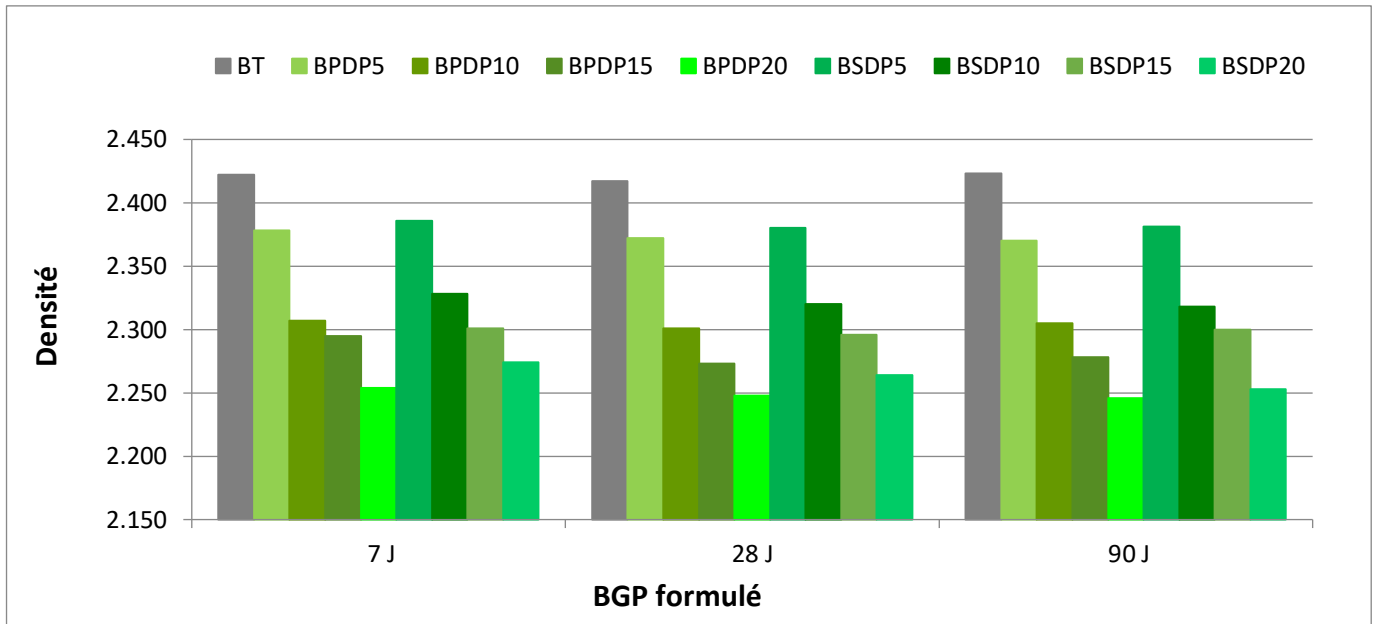
Figure 3.3 : Teneur en air occlus des BGP formulés.

3.2.2 Essais à l'état durci :

3.2.2.1 Densité :

La figure 3.4 montre l'effet de l'incorporation de GDP en remplacement partiel du sable naturel sur la densité des différents mélanges formulés à 7, 28 et 90 jours. Tous les BGP montrent une densité à l'état durci inférieure à celle du béton témoin. Cette réduction de densité augmente progressivement avec l'augmentation du taux de substitution. Les mélanges contenant 20% de GDP présentent une réduction de densité par rapport le mélange témoin de 6.99 et 6.34% des BGP contenant de PDP et SDP respectivement à 28 jours. En plus, une perte de la densité en fonction de temps est observée dans tous les bétons. La valeur la plus élevée de cette perte est enregistrée dans le mélange BPDP5 et BSDP5 avec une réduction de 20.32 et 16.10% respectivement. Ces résultats concordent avec les résultats de (Mohseni and Koushkbaghi 2023 ; Zhou et al. 2025). Qui est due à la faible densité de GDP par rapport à celle du sable (Abdelmonem et al. 2019 ; Rashid et al. 2019).

On peut observer également que l'utilisation de GDP sous forme de PDP a un effet plus significatif par rapport au SDP. A 28 jours, un écart de 17.74, 16.45, 15.93 et 9.44% pour les bétons contenant 5, 10,15 et 20% respectivement a été observé. Des résultats similaires ont été obtenues par plusieurs études (Nadim et al. 2012 ; Li et al. 2018). Cette variation des taux de réduction peut être expliquée par la différence d'irrégularité de la texture des particules de GDP qui modifier la capacité d'emprisonnement de l'air (Lavagna et al. 2020).



type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification à 7 Jours (%)	-2	-5	-5	-7	-1	-4	-5,	-6
Taux de modification à 28 Jours (%)	-2	-5	-6	-7	-2	-4	-5	-6
Taux de modification à 90 Jours (%)	-2	-5	-6	-7	-2	-4	-5	-7

Figure 3.4 : Densité des BGP formulés.

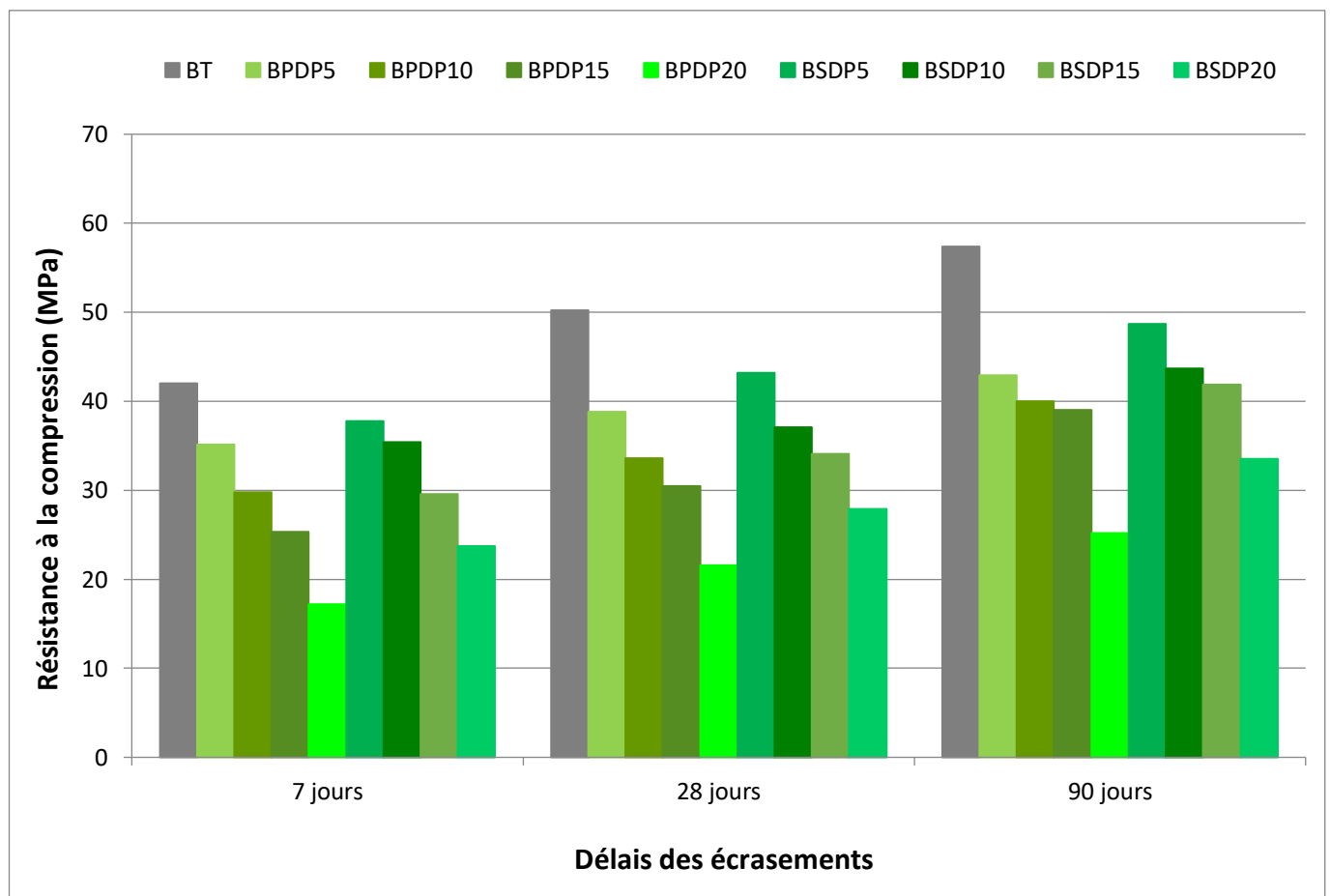
3.2.2.2 Résistance à la compression :

Une nette tendance de perte de la résistance à la compression des BGP à 7,28 et 90 est observée dans la figure 3.5. Cette perte est progressive avec l’augmentation de la teneur en GDP. L’augmentation du taux de substitution de 0 à 20% réduit la résistance à la compression de 56.97% et 44.42% des BGP contenant de PDP et de SDP respectivement à 28 jours. Cela a été notée par (Siddika et al. 2019 ; Rashid et al. 2019 ; Shahjalal et al. 2024 ; Abdelaleem et al. 2024 ; Nie et al. 2024). La perte maximale de résistance est enregistrée dans le BGP contenant 20% de PDP qui atteint des taux de réduction de 59.04%, 56.97%, 56.09% aux âges de 7,28 et 90 jours respectivement. Des résultats identiques ont été observé par (He et al. 2023 ; Qureshi et al. 2024 ; Moein et al. 2024).

Plusieurs raisons peuvent expliquer la diminution de la résistance à la compression, rapportée par de nombreux auteurs. Elbially et al. (2024) et Han et al. (2024) ont attribué cette réduction à la mauvaise adhérence de la pâte de ciment avec les particules de GDP. Cette faible adhérence conduit à une porosité élevée notamment au niveau de la zone de transition d’interface (ITZ) (Sabbrojjaman et al. 2024 ; Gesoğlu et al. 2016 ; Noaman et al. 2016 ; Rashid et al. 2019 ; EL Sodani et al. 2022). Elchalakani et al. 2018 ont expliqués cette mauvaise adhérence par la nature lisse, savonneuse, et hydrofuge de GDP causée par la présence du stéarate de zinc résiduel qui minimise la friction et l’adhérence. Thomas and Gupta (2016) ont

noté que le GDP à une tendance à se déplacer vers le haut lors des vibrations, ce qui entraîne une concentration plus élevée de GDP dans la zone supérieure. Un échantillon de béton non homogène entraîne une réduction des résistances. Abdelmonem et al. (2019) et He et al. (2023) ont justifié la réduction de la résistance à la compression par la déformabilité élastique des GDP qui entraîne la formation rapide de fissures lors de la mise en charge.

On peut remarquer aussi que l'utilisation de BGP sous forme de PDP entraîne une réduction plus significative en comparaison avec le SDP. Un écart de 8.76, 6.97, 7.17 et 12.55% qui correspond aux taux de substitution 5,10 ,15 et 20% respectivement. Cette tendance a été observée par (Lijuan et al. 2014 ; Holmes et al. 2014 ; Qureshi et al. 2024). Cette tendance a été expliquée par le degré de rugosité des particules de GDP et la continuité de sa granulométrie (Su et al. 2014).



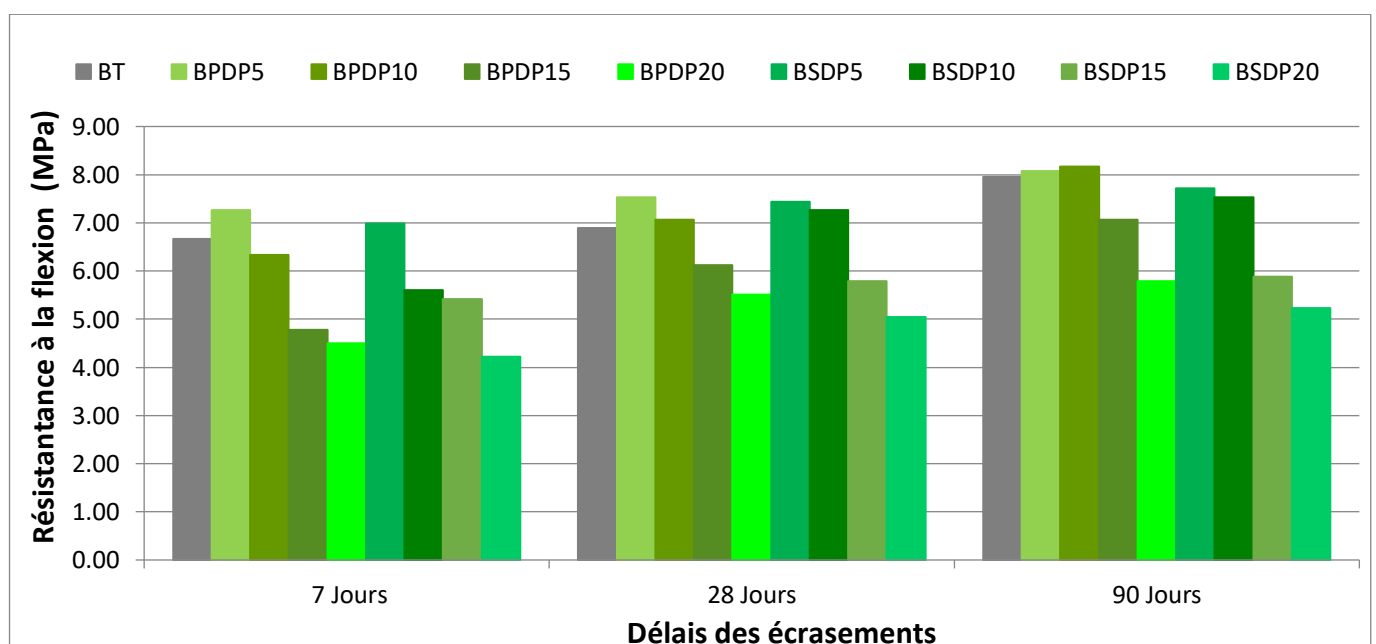
type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification à 7 Jours (%)	-16	-29	-40	-59	-10	-16	-30	-44
Taux de modification à 28 Jours (%)	-23	-33	-39	-57	-14	-26	-32	-44
Taux de modification à 90 Jours (%)	-25	-30	-32	-56	-15	-24	-27	-42

Figure 3.5 : Résistance à la compression des BGP formulés.

3.2.2.3 Résistance à la traction par flexion :

Les résultats de test de la résistance à la traction par flexion des différents mélanges à 7, 28 et 90 jours sont présentés dans la figure 3.6. On observe une amélioration de la résistance à la traction par flexion de 9.29 et 2.61, 7.98 et 5.37% des BGP contenant PDP et SDP avec les taux de substitution de 5 et 10% respectivement à 28 jours. Une tendance identique a été observé par (Bensaci et al. 2019 ; Hiremath et al. 2019). Cette amélioration peut être expliquée par la flexibilité de GDP rend le BGP moins fragile et capable de résister à plus de déformation avant sa rupture, ce entraine une augmentation de la résistance (Li et al 2025 ; Hou et al.2023). Cependant, l’augmentation de taux de substitution à 15% et 20% réduit la résistance à la traction par flexion de 11.18% et 20.03% pour les bétons contenant de PDP, 15.97% et 26.71% pour les bétons contenant de SDP respectivement à 28 jours. Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études (Gerges et al. 2018 ; Hiremath et al. 2019 ; Bulut and kandil 2024 ; Hisbani et al. 2025 ; Han et al. 2025). Cette diminution peut être expliquée par plusieurs facteurs. Gesoğlu et al. (2014) et Alamri and Khawajji (2024) l’ont justifié par la nature hydrophobe du GDP qui perturbe la transmission des contraintes. Qureshi et al. (2024) ont noté que les taux élevés en GDP ont affaibli significativement la liaison entre la matrice cimentaire et les particules de GDP.

D’après la figure 3.6, on peut noter que la PDP affecte moins la résistance à la traction par flexion par rapport au SDP. En effet, les BGP contenant 20% de PDP montrent des taux de réduction de 32.53,20.03 et 27.26% et de 36.73, 26.71 et 34.30 des BGP contenant de SDP à 7, 28 et 90 jours respectivement. Une tendance similaire a été observée par (Roychand et al. 2020). Il faut également souligner qu’un comportement plus ductile lors de la rupture des BGP a été observé lors des essais de traction par flexion. Ce mode de rupture a été observé par (Mohseni and Koushkbaghi 2023).



Type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification à 7 Jours (%)	9	-5	-28	-32	5	-16	-19	-37
Taux de modification à 28 Jours (%)	9	3	-11	-20	8	5	-16	-27
Taux de modification à 90 Jours (%)	2	3	-11	-27	-3	-5	-26	-34

Figure 3.6 : Résistance à la traction par flexion des BGP formulés.

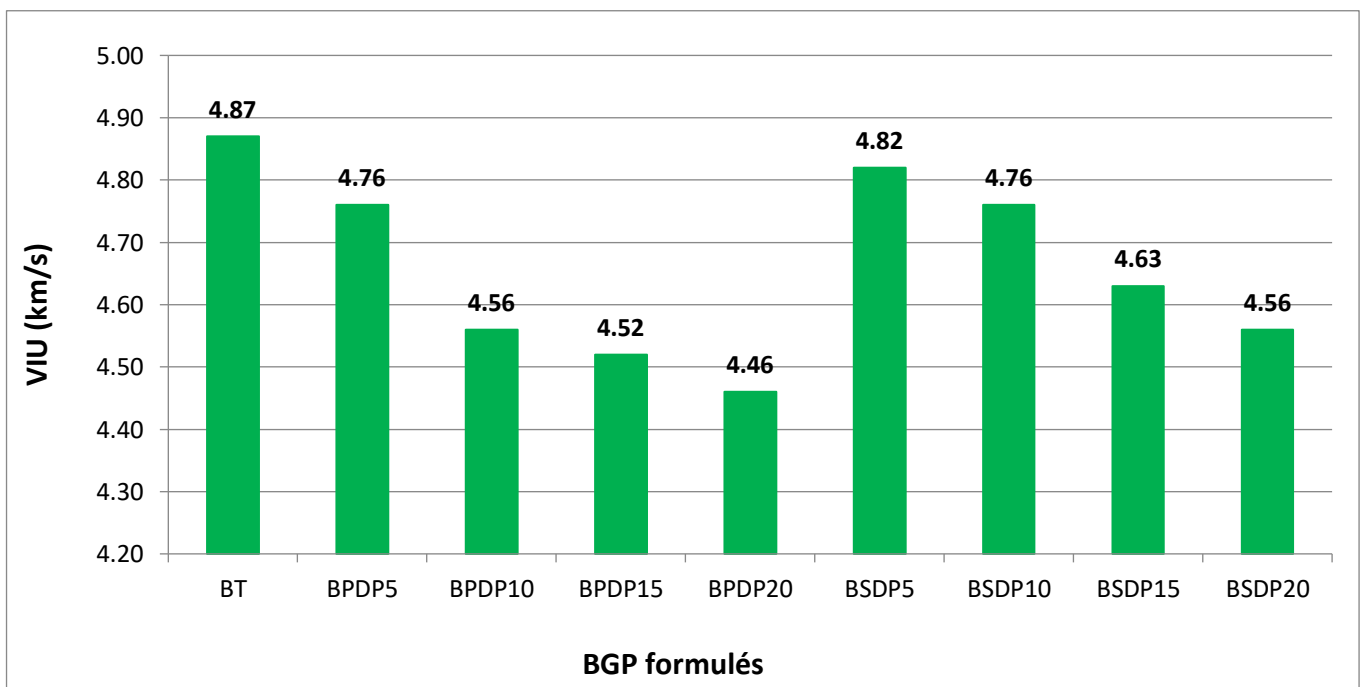
3.2.2.4. Essais non destructif :

3.2.2.4.1 Auscultation dynamique :

Les résultats de test d’auscultation dynamique sont présentés dans la figure 3.7. L’incorporation de GDP provoque une diminution de la vitesse d’impulsion ultrasonique (VIU). Avec des taux de substitution de 5,10,15 et 20%, des réductions de 1.03, 2.26, 4.94 et 6.37% respectivement pour les BGP contenant de SDP et des réductions de 2.26, 6.37, 7.19, 8.42% pour les BGP contenant de PDP ont été enregistrées. La diminution de la VIU est expliquée par la faible adhérence de la pâte de ciment et les particules GDP, ce qui entraîne une augmentation de la porosité des mélanges (Bideci et al. 2017 ; Jalal and Jalal 2020). Hisbani et al. (2025) ont recommandé que la légèreté et le faible module d’élasticité de GDP réduisent la compacité du BGP, ce qui rend le remplissage des vides et l’obtention d’un compactage adéquat difficile.

La différence de la taille entre la PDP et le SDP montre une différence du taux de réduction de 1.26, 4.38, 2.43 et 2.24% en moins. Cette variation a été observée par Azunna et al. (2024).

Malgré cela, Tous les BGP montrent des valeurs de VIU supérieures à 4.5 km/s, est peuvent être classé selon ASTM C 597 comme des bétons de très bonne qualité (Bulut and kandil. 2024), sauf le BGP contenant 20% de PDP qui marque une valeur de 4.46 km/s est donc classé de bonne qualité.



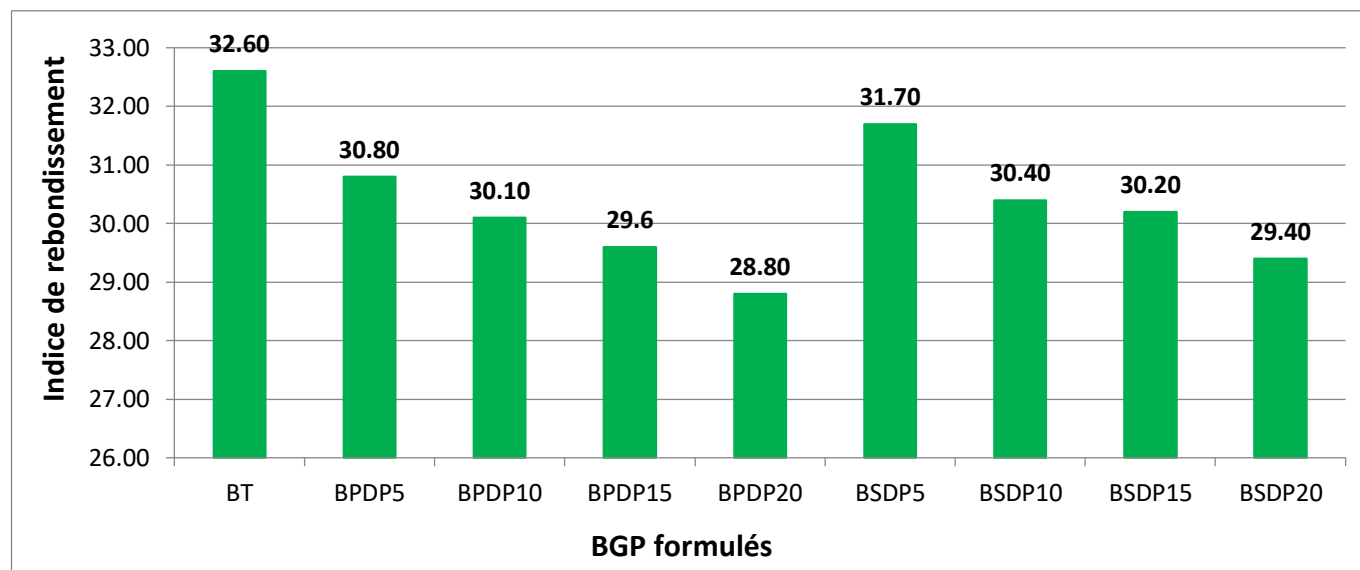
type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification (%)	-2	-6	-7	-8	-1	-2	-45	-6

Figure III.7 : VIU des BGP formulés.

3.2.2.4.2 Scléromètre :

Les valeurs des indices de rebondissement des différents bétons à 28 jours sont présentées dans la figure 3.8. Toutes les valeurs représentent une moyenne de douze résultats. On peut constater une baisse de valeur d'indice de rebondissement des BGP par rapport au béton témoin. Cette baisse augmente avec l'augmentation du taux de substitution en GDP. Cette réduction peut être expliquée par l'augmentation de la porosité des bétons contenant de GDP. (Neville, (2011),

Aussi, on peut constater que la réduction des indices de rebondissement sont plus prononcés dans les BGP contenant de PDP par rapport aux BGP contenant de SDP, avec des écarts de 100%,13.62%, 25%, 18.73% pour les bétons contenant de 5, 10, 15 et 20% de BGP respectivement.



type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification (%)	-5	-8	-9	-12	-3	-7	-8	-10

Figure 3.8 : Indices de rebondissement des BGP formulés.

Les figures 3.9, 3.10 et 3.11 illustrent la corrélation entre la résistance à la compression et la densité à l'état durci, la vitesse d'impulsion ultrasonique (VIU) et l'indice de rebondissement respectivement. On peut constater une forte corrélation entre ces propriétés avec des valeurs de coefficient de corrélation (R^2) de 0.93, 0.89 et 0.98 respectivement. Ce qui confirme l'interaction entre ces propriétés de ces relations. L'augmentation de la teneur en GDP entraîne une diminution des résistances à la compression et la densité durcie, la vitesse d'impulsion ultrasonique et l'indice de rebondissement. Des résultats identiques ont été noté par (Rashid et al. 2019 ; Fattuhi and Clark 1996 ; Ling 2011).

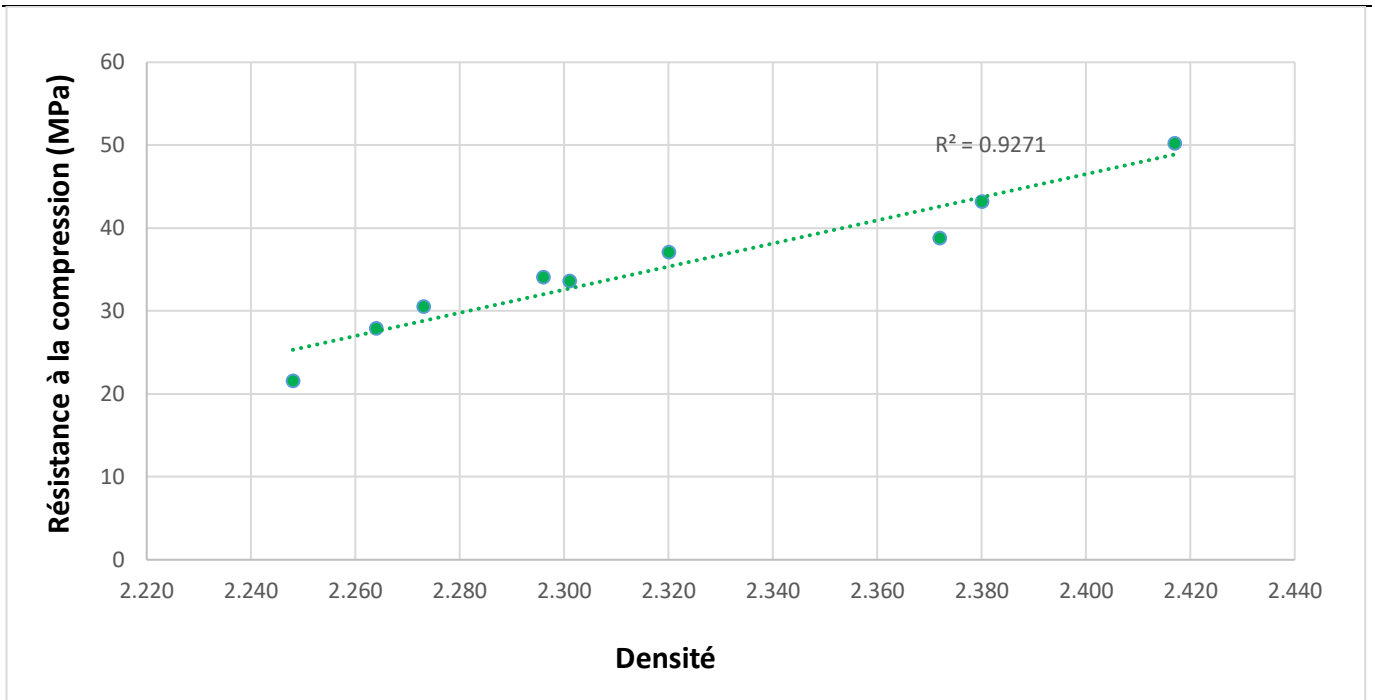


Figure 3.9 : Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BGP formulés.

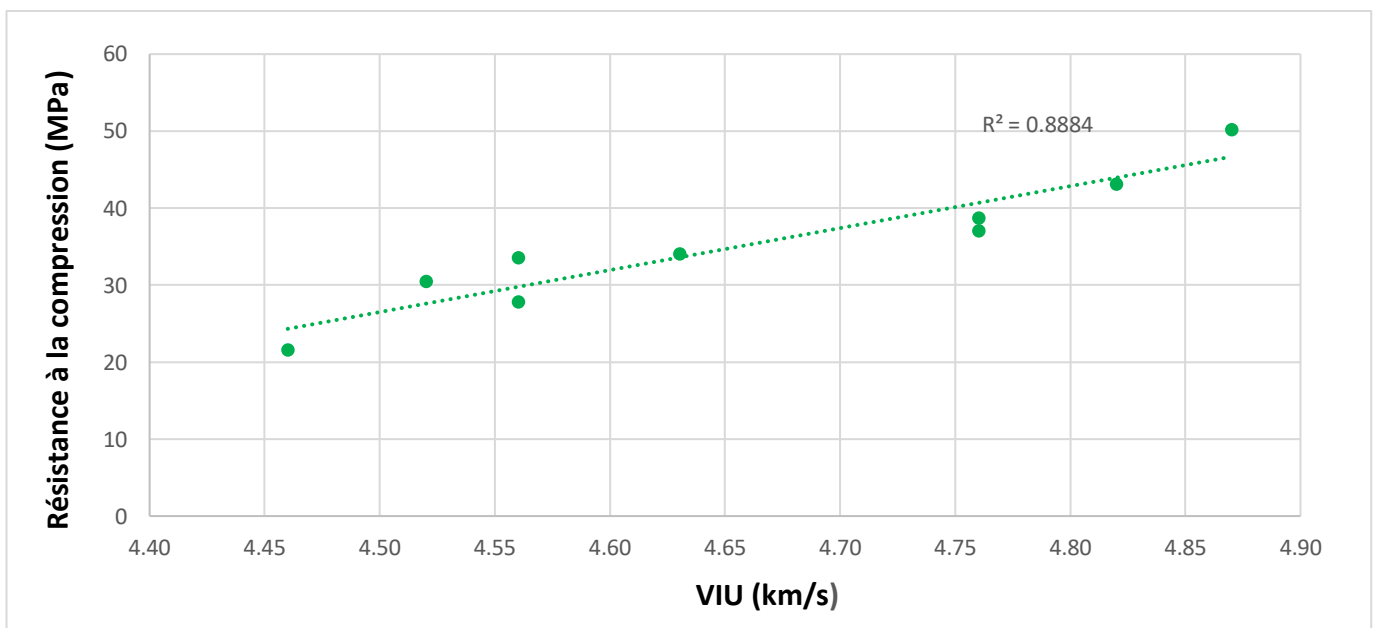


Figure 3.10 : Corrélation entre la résistance à la compression et la VIU des BGP formulés.

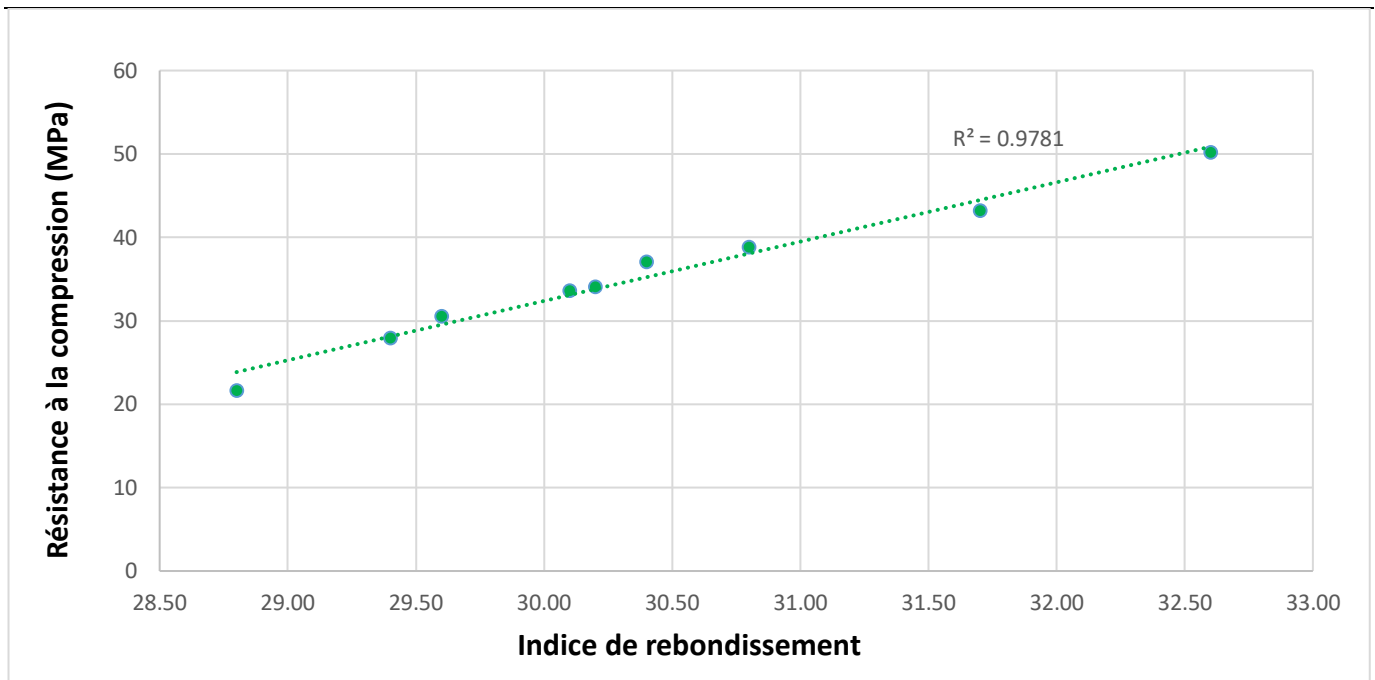


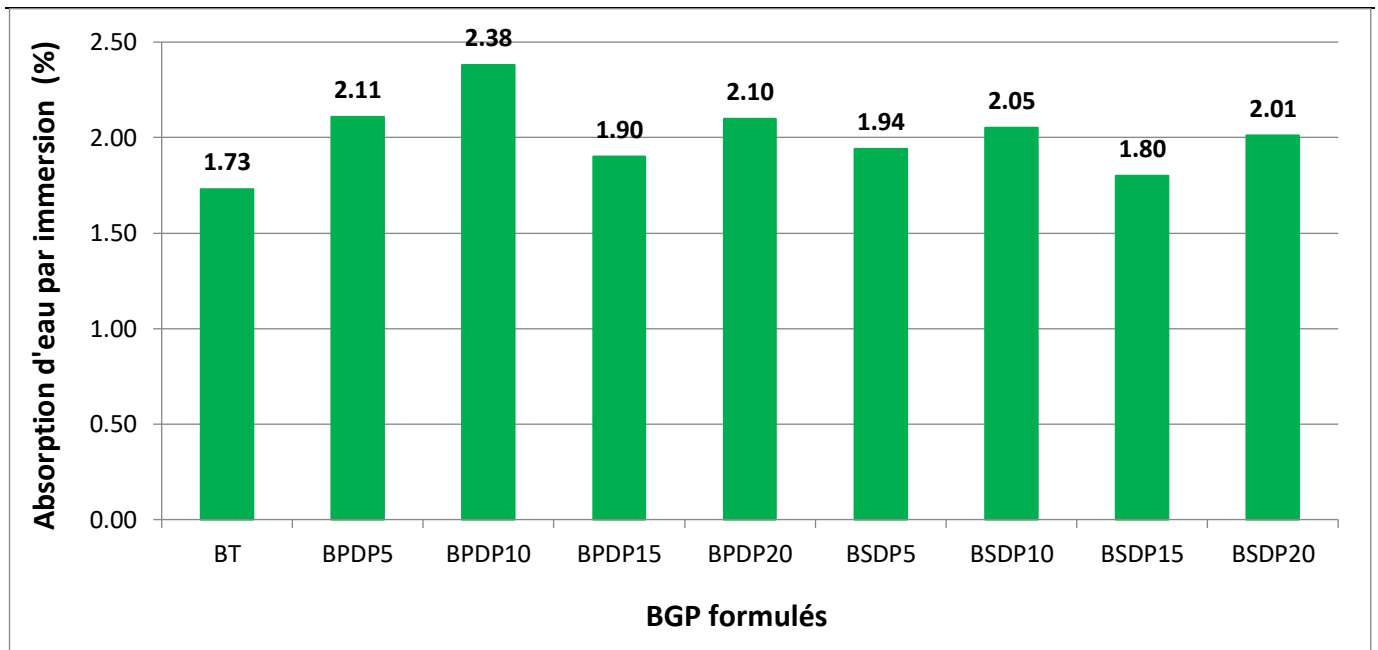
Figure 3.11 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indices de rebondissement des BGP formulés.

3.2.3. Essais de durabilité :

3.2.3.1 Absorption d'eau par immersion :

Les résultats d'absorption d'eau des BGP sont présentés dans la figure 3.12. On constate que les BGP absorbent plus d'eau que le béton témoin. Cette absorption augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en GDP. En effet, la substitution de 5 à 10% augmente de coefficient d'absorption en eau de 21.96 et 12.13% à 37.57 et 18.49% des BGP contenant de PDP et SDP respectivement. Cependant, l'augmentation du taux de substitution à 15 et 20% diminue le coefficient d'absorption d'eau par rapport au taux 10%. Peut expliquer aussi par un taux de substitution élevé de BGP moins absorbant réduit la capacité d'absorption du béton.

La figure 3.12 montre aussi que les bétons contenant de PDP marquent des taux d'augmentation plus importante que les bétons contenant de SDP avec un écart de 9.83, 19.07, 5.78 et 5.21% correspond aux taux de substitution 5, 10, 15 et 20% respectivement. Cette augmentation de l'absorption d'eau est liée à la SSB élevée de la PDP ce qui augmente la surface de contact avec la pâte de ciment, qui contribue à la formation de vides et de microfissures (Kumar et al. 2014), ainsi qu'à un rapport de vides plus élevé dans le BGP, permettant une plus grande pénétration de l'eau (Hisbani et al. 2025).



type de béton	BPDP5	BPDP10	BPDP15	BPDP20	BSDP5	BSDP10	BSDP15	BSDP20
Taux de modification(%)	22	37	10	21	12	18	4	16

Figure 3.12 : Absorption d’eau par immersion des BGP formulés.

3.2.3.1 Absorption d’eau par capillarité :

La figure 3.13 présente les résultats d’absorption d’eau par capillarité des BGP formulés. On observe que l’incorporation des GDP avec les taux de substitution de 5, 15 et 20% réduit le coefficient d’absorption par capillarité. Et que cette réduction est plus prononcée dans les BGP contenant 20% de GDP. Cependant, la substitution de 10% de sable naturel par les GDP sous forme de PDP et SDP augmente l’absorption d’eau.

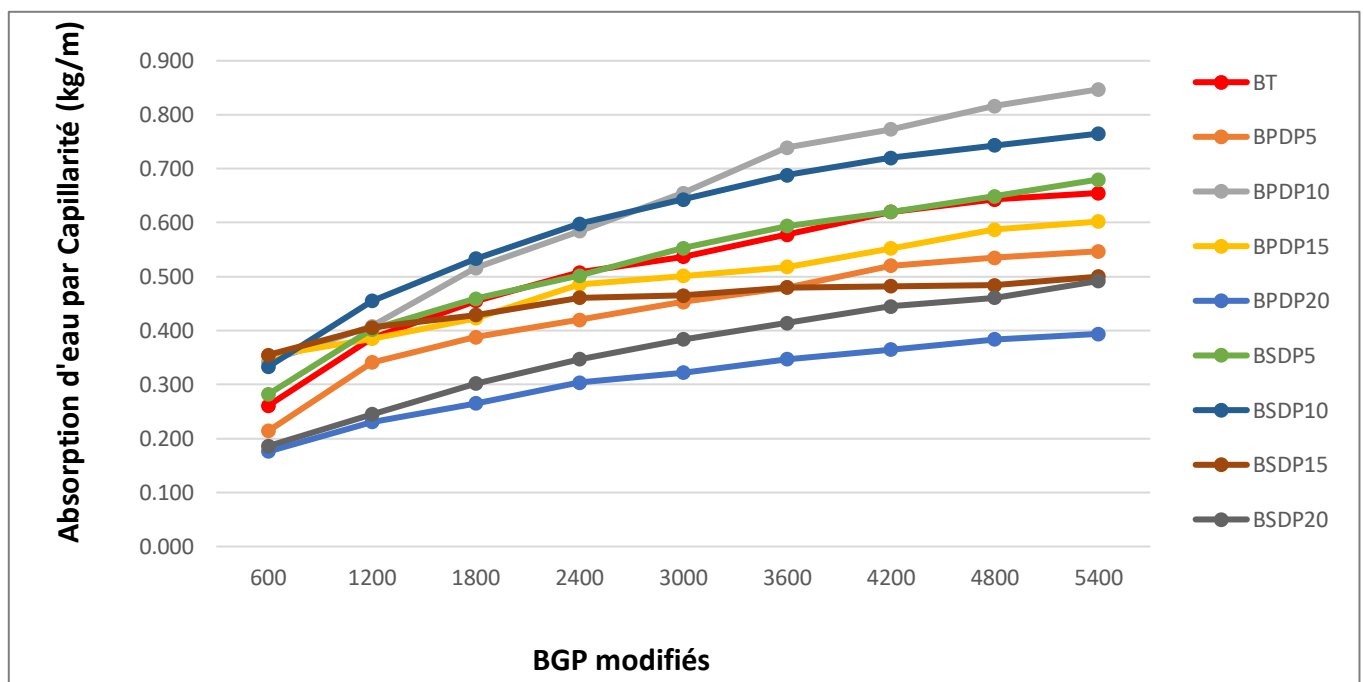


Figure 3.13 : Absorption d’eau par capillarité des BGP formulés.

3.2.3.3 Résistance à l'attaque chimique :

Le béton subit une détérioration physique et chimique lorsqu'il est exposé à des environnements acides, notamment à l'acide sulfurique (H₂SO₄) et à l'acide chlorhydrique (HCl). Ces acides s'infiltrent dans la structure du béton et réagissent avec des composés essentiels tels que l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) et le gel de silicate de calcium hydraté (CSH), fragilisant ainsi le matériau au fil du temps (Hisbani et al. 2025).

3.2.3.3.1 Résistance à l'attaque par l'acide chlorhydrique :

La variation de la résistance à la compression des BGP conservés en milieu acide concentré à 5% de HCl à 56, 90 et 180 jours est présentée dans la figure 3.14. On peut observer que tous les BGP présentent une perte de résistance après leur exposition dans ce milieu agressif. Cette perte augmente progressivement avec la durée d'exposition. On peut aussi observer qu'à 180 jours d'immersion, les BGP présentent des pertes de résistances inférieures à celui de béton témoin. En effet, l'incorporation de 5, 10, 15 et 20% de GDP réduit la perte de la résistance à la compression des BGP à base de PDP de 6.12, 10.04, 25.49 et 35.78% et les BGP contenant de SDP de 2.45, 7.10, 8.82 et 24.01% respectivement. Des résultats similaires ont été observée par (Segre et al. 2004 ; Rahimi et al.216 ; Hisbani et al. 2025). L'amélioration de la résistance des BGP est expliquée en premier lieu par la nature hydrophobe des GDP qui limite la pénétration de la solution chimique, par l'efficacité de l'interaction entre les particules de GDP et le HCl qui améliore l'adhérence entre les GDP et la matrice cimentaire , La lecture de la réduction des taux de perte montre que cette amélioration est plus prononcée dans les BGP contenant de PDP que dans les BGP contenant de SDP avec un écart de 59.96, 29.28, 66.57 et 32.89% correspond aux taux de substitution de 5, 10, 15 et 20% respectivement à délais de 180 jours d'immersion.

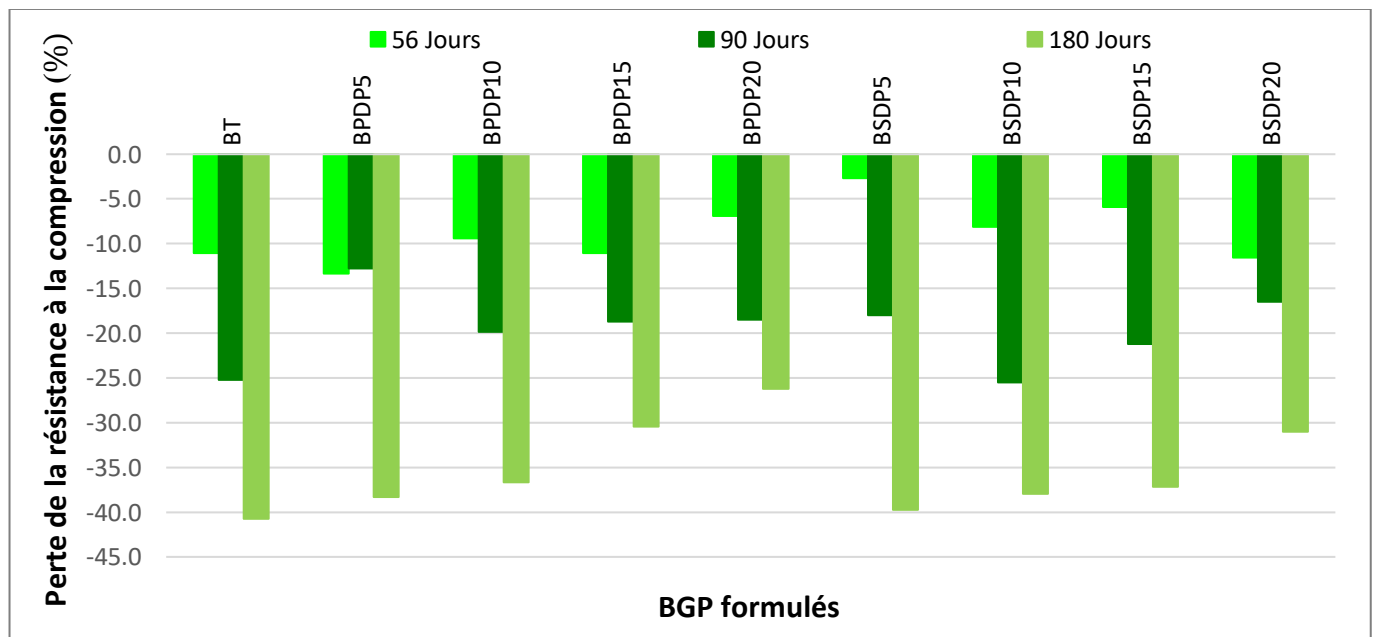


Figure 3.14 : La perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans HCL des BGP formulés.

3.2.3.3.1 Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique :

La figure 3.15 illustre la perte de résistance à la compression des mélanges de béton immergés dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 concentrée à 5 % à 56, 90 et 180 jours.

On peut constater que la perte de résistance à la compression est plus importante dans les mélanges contenant un faible taux de GDP. Cependant à mesure que la quantité de GDP augmente cette réduction diminue progressivement. Cette tendance a été observée par Thomas et al. (2015) qui l'ont expliqué par le fait que la présence des particules de GDP dans le béton empêchait les particules constitutives de se détacher en empêchant la formation de fissures. L'augmentation du taux de GDP de 5 à 20% réduit le taux de perte de 46.4% à 15.3% et 47.3% à 12.0% des mélanges contenant PDP et SDP respectivement. Alors l'inclusion de GDP à 20 % entraîne une résistance accrue à l'attaque de l'acide sulfurique, la réduction de perte atteint -15.3 et -12.0% des mélanges contenant PDP et SDP respectivement. Cette amélioration peut justifier par la structure plus souple des particules de GDP qui permet de réduire l'effet dilatant du gypse. De plus, la capacité des particules de GDP à limiter les fissures et à maintenir les matériaux constitutifs (Mohseni and Koushkbaghi 2023).

On peut observer clairement des taux de réduction élevés par rapport aux échantillons immerger dans l'acide HCl. Cette observation a été notée par (Rahimi et al. 2016 ; Mhaya et al. 2021).

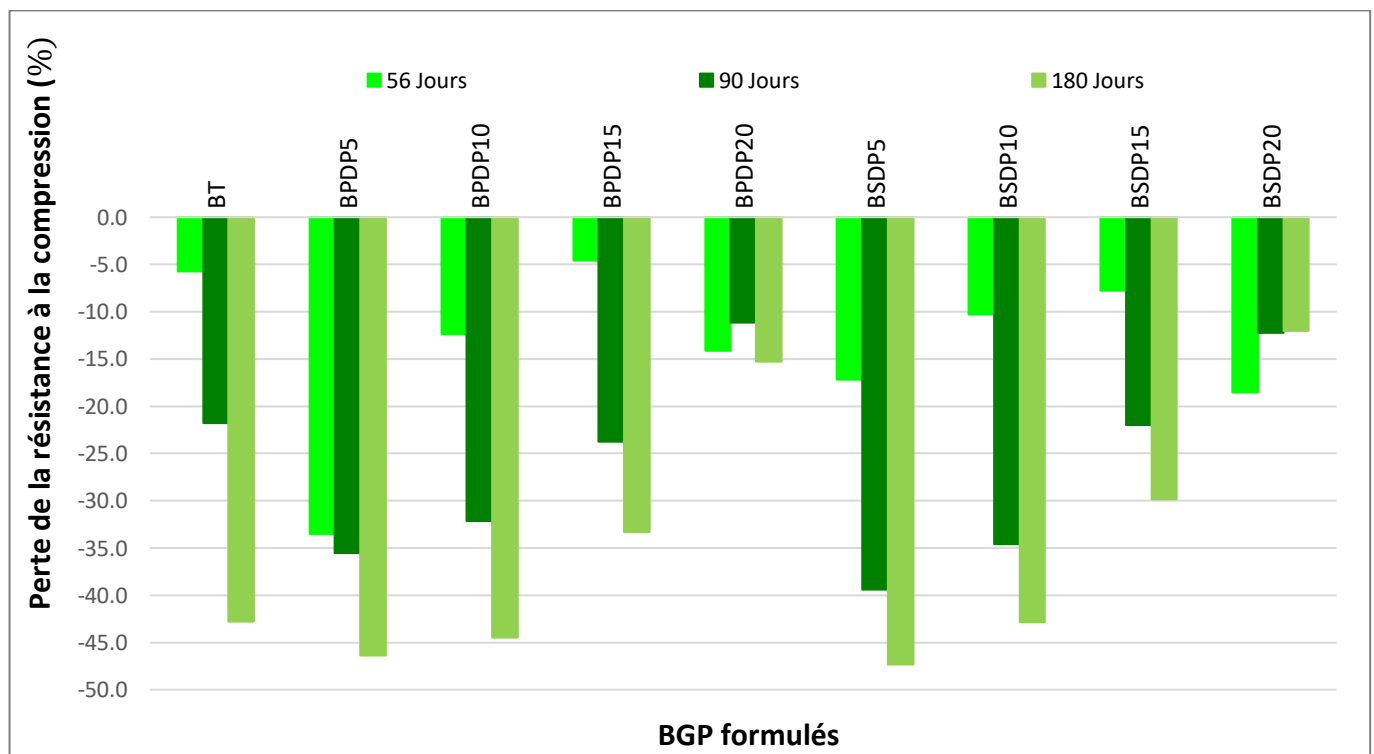


Figure 3.15 : La perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans H_2SO_4 des BGP formulés.

3.5. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais réalisés sur les BGP formulés. Ce travail expérimental a été réalisé pour examiner l'effet de la taille et le taux de GDP sur les propriétés de béton. Les résultats obtenus nous a permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de GDP n'affecte pas significativement la maniabilité de BGP lorsque le taux de substitution ne dépasse pas 10%. Au-delà de cette valeur la maniabilité diminue significativement.
- Une nette tendance de la réduction progressive de la densité des BGP contenant de GDP.
- Les BGP montre une teneur en air occlus plus élevée que celle du béton ordinaire. Une augmentation maximale de 84,0% a été obtenue avec 20 de SDP.
- Les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation de taux de substitution de sable naturel par le GDP. Cette réduction devient plus significative lorsque le GDP est utilisé sous forme de poudre.
- La durabilité des bétons contenant de GDP est améliorée en terme de résistance aux attaques chimiques. Plus le dosage en GDP augmente plus la résistance aux attaques chimique des BGP s'améliore.

Enfin, on peut synthétiser que tous les bétons contenant de GDP montrent des valeurs de réduction approximatives de la densité fraîche et durcie, l'augmentation du taux de substitution à 15 et 20% réduit significativement la maniabilité et les résistances mécaniques. Les BGP contenant le GDP sous forme de poudre en subit des réductions de résistance à la compression plus prononcé que ceux contenant le GDP sous forme de sable. Alors, pour l'optimisation des BGP contenant de poudres de déchets recyclés, on utilisera le GDP sous forme de sable (SDP) en limitant les taux de substitution de sable naturel par le SDP à 5 et 10%. Cela nous permettra d'éviter des chuts significatifs des résistances mécaniques.

Chapitre 4 :

Propriétés du BGP à base des
poudres des déchets recyclés

4.1. Introduction

Dans ce chapitre on passe à l’optimisation d’un BGP contenant des poudres de déchet de verre, de marbre de brique et de céramique répondre aux exigences structurelles. Les mêmes essais effectués dans le chapitre 3 ont été menées sur les différentes BGP modifiés pour le but d’étudier ces propriétés physico-mécaniques, aussi une analyse de microstructure et d’ATG ont été réalisé Afin d’assurer la faisabilité de la formulation.

4.2. Formulation des BGP contenant les poudres des déchets recyclés

Pour le but d’augmenter le dosage du liant de 350 kg/m³ à 400 et à 450 kg/m³ par l’incorporation de 50 et 100 kg/m³ de PV, PM, PB et PC seize types de béton ont été confectionnés.

D’après les résultats obtenus dans le chapitre 3. L’ajout de 15 et 20% de GDP réduit significativement la résistance à la compression du béton. Cette réduction est plus prononcée lorsque le GDP est utilisée sous forme de PDP. Pour cela, le GDP utilisé dans la formulation des BGP étudiés est introduit sous forme d’un sable (SDP) avec des taux de substitution égale à 5 et 10%. Donc les formulations retenues pour l’étude de l’effet d’ajout des poudres de déchet sont les formulation BSDP5 et BSDP10, contenant 5 et 10% de SDP.

Ces formulations ont été modifiées avec l’ajout de 50 et 100 kg/m³ de PV, PM, PB et PC. Pour ajuster le 1 m³ du béton les granulats ont été substitués par les différentes poudres.

Les tableaux 4.1 et 4.2 et la figure 4.1 montrent les différentes compositions obtenues

Tableau 4.1 Désignation des types des BGP modifiés testés.

N°	Notation	Désignations
Béton Témoin	BT	Béton ordinaire (Béton Témoin).
Béton à base de GDP	BSDP5	Béton avec 5% de substitution de sable par le SDP.
Béton à base de GDP Modifié Par la PV	BP5 PV50	Béton contenant 5% de SDP + 50 kg PV (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP5 PV100	Béton contenant 5% de SDP + 100 kg de PV (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).
Béton à base de GDP Modifié Par la PM	BP5 PM50	Béton contenant 5% de SDP + 50 kg de PM (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP5 PM100	Béton contenant 5% de SDP + 100 kg de PM (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).
Béton à base de GDP Modifié Par la PB	BP5 PB50	Béton contenant 5% de SDP + 50 kg de PB (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP5 PB100	Béton contenant 5% de SDP + 100kg de PB (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).

Béton à base de GDP Modifié Par la PC	BP5 PC50	Béton contenant 5% de SDP + 50 kg de PC (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP5 PC100	Béton contenant 5% de SDP + 100 kg de PC (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).
Béton à base de DP	BSDP10%	Béton contenant 10 % de SDP.
Béton à base de GDP Modifié Par la PV	BP10 PV50	Béton contenant 10 % de SDP + 50 kg de PV (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP10 PV100	Béton contenant 10 % de SDP + 50 kg de PV (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).
Béton à base de GDP Modifié Par la PM	BP10 PM50	Béton contenant 10 % de SDP + 50 kg de PM (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP10 PM100	Béton contenant 10 % de SDP + 100 kg de PM (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).
Béton à base de GDP Modifié Par la PB	BP10 PB50	Béton contenant 10 % de SDP + 50 kg de PB (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP10 PB100	Béton contenant 10 % de SDP + 100 kg PB (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).
Béton à base de GDP Modifié Par la PC	BP10 PC50	Béton contenant 10 % de SDP + 50 kg de PC (Augmentation du liant à 400 kg/m ³).
	BP10 PC100	Béton contenant 10 % de SDP + 100 kg de PC (Augmentation du liant à 450 kg/m ³).

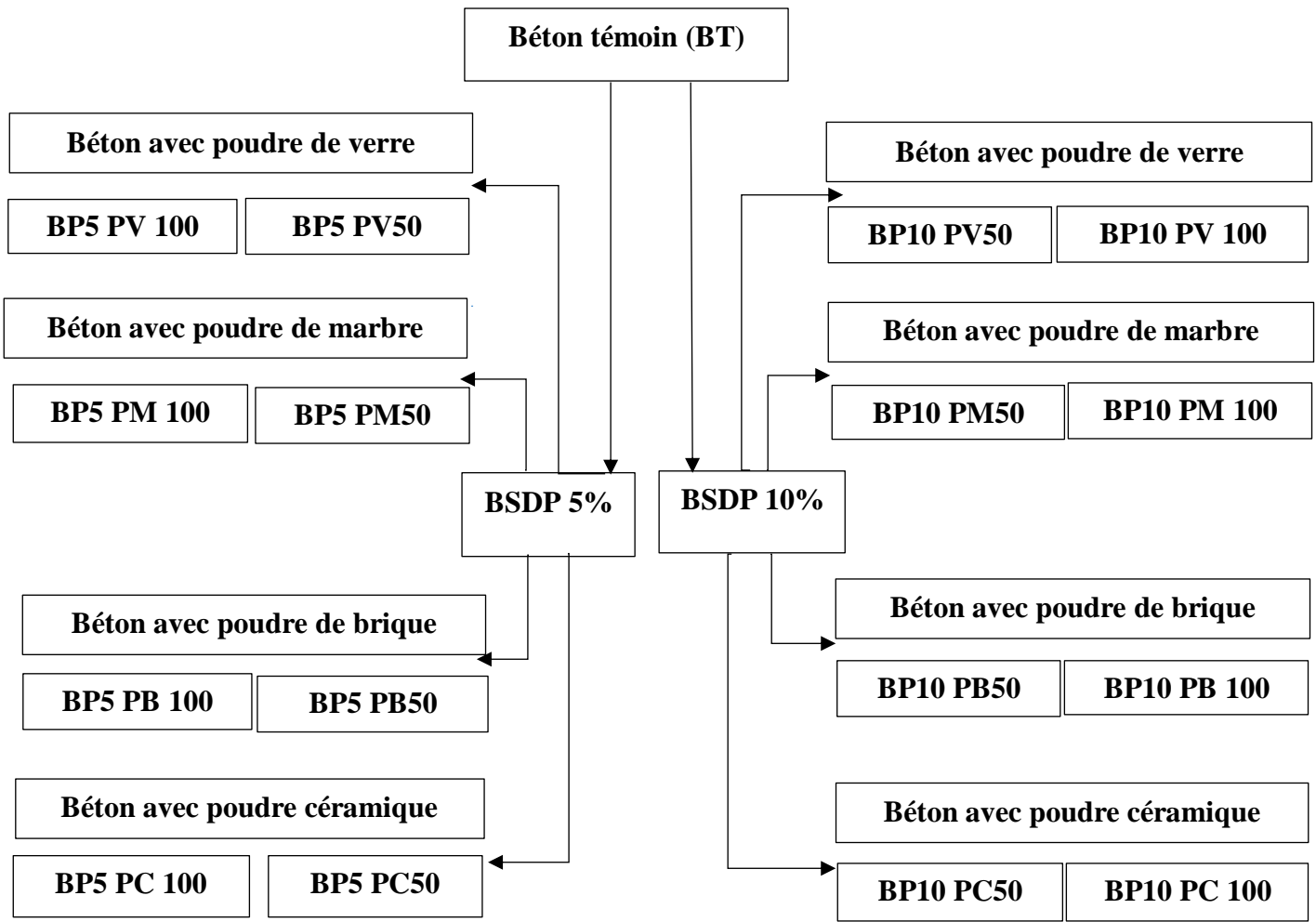


Figure 4.1. Formulation des BGP a base des poudres étudiier.

Tableau 4.2 : Composition des BGP modifiés étudiés en Kg.

	G2 (kg/m ³)	G1 (kg/m ³)	SC (kg/m ³)	CP (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	SP (l/m ³)	SDP (kg/m ³)	Poudre (kg/m ³)
BT	287.50	685.50	876.00	350.00	168.00	4.20	-	-
BSDP5	287.50	685.50	832.20	350.00	168.00	4.20	18.45	-
BP5PV50	280.03	667.65	811.80	350.00	168.00	4.20	18.45	50.00
BP5PV100	272.56	649.85	791.39	350.00	168.00	4.20	18.45	100.00
BP5PM50	279.95	667.48	811.57	350.00	168.00	4.20	18.45	50.00
BP5PM100	272.39	649.45	790.94	350.00	168.00	4.20	18.45	100.00
BP5PB50	279,80	667.14	811.18	350.00	168.00	4.20	18.45	50.00
BP5PB100	272.11	648,78	790.17	350.00	168.00	4.20	18.45	100.00
BP5PC50	279.64	666.80	810.80	350.00	168.00	4.20	18.45	50.00
BP5PC100	271.80	648.08	789.36	350.00	168.00	4.20	18.45	100.00
BP 10	287.50	685.50	788.40	350.00	168.00	4.20	36.90	-
BP10PV50	280.03	667.65	767.98	350.00	168.00	4.20	36.90	50.00
BP10PV100	272.56	649.85	747.60	350.00	168.00	4.20	36.90	100.00
BP10PM50	279.95	667.48	767.77	350.00	168.00	4.20	36.90	50.00
BP10PM100	272.39	649.45	747.14	350.00	168.00	4.20	36.90	100.00
BP10PB50	279.80	667.14	767.38	350.00	168.00	4.20	36.90	50.00
BP10PB100	272.11	648.78	746.37	350.00	168.00	4.20	36.90	100.00
BP10PC50	279.64	666.80	789.36	350.00	168.00	4.20	36.90	50.00
BP10PC100	271.80	648.08	745.56	350.00	168.00	4.20	36.90	100.00

4.3. Résultat et discussion :

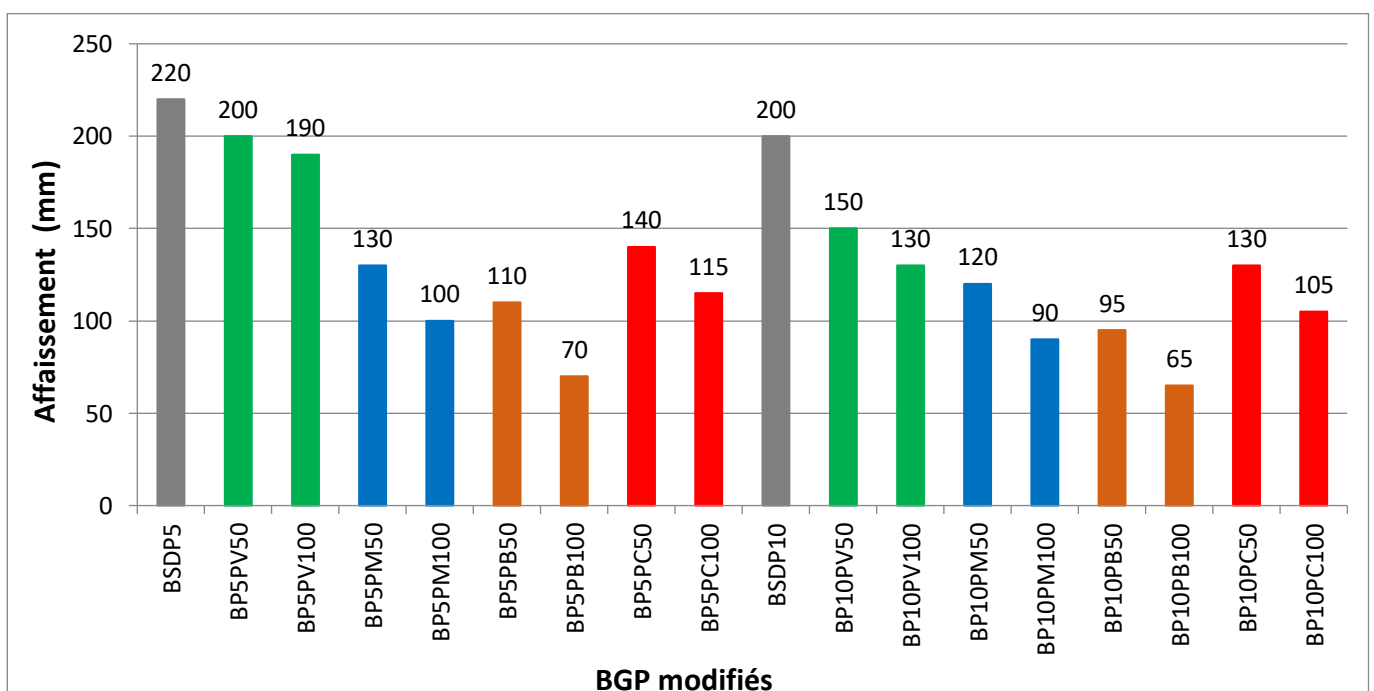
4.3.1 Essais à l'état frais :

4.3.1.1 Affaissement :

Les résultats d'affaissement des BGP modifiés par l'ajout des poudres sont indiqués dans la figure 4.2. Tous les BGP modifiés par l'ajout des poudres présentent une diminution progressive d'affaissement (Essam et al. 2023 ; Paithankar et al. 2023 ; Li et al. 2024). En effet, l'ajout de 50 kg/m³ de PV, PM, PB et PC au BSDP5 réduit la maniabilité de 9.09, 40.91, 50.0 et 36.36% respectivement. Cette tendance peut être expliquée par la grande surface spécifique de ces poudres qui conduit à la diminution de l'ouvrabilité de béton (Vieira et al. 2016 ; Ashish 2017 ; Aly et al. 2019 ; Bourzik et al. 2022 ; Prakash et al. 2023).

La figure 4.2 montre aussi que les BGP modifiés par l'ajout de PV présentent des valeurs de maniabilité supérieures à celle des autres BGP modifiés. Cela est dû à la surface lisse et vitreuse de PV, le faible taux d'absorption d'eau et peut être expliqué aussi par la SSB faible de PV (Tahwia et al. 2022 ; Katoch et al. 2020). On remarque aussi que les plus grandes réductions de maniabilité ont été enregistrées dans les BGP contenant de PB. Ces taux de réduction élevés sont attribués à la valeur élevée de SSB, le coefficient d'absorption d'eau élevé de PB, qui provoque un besoin en eau accru dû à la quantité plus importante de fines (Ge et al. 2015 ; Grellier et al. 2021).

Cependant les BGP modifiés par l'ajout de PC ou de PM affichent des valeurs intermédiaires. Malgré sa SSB et son coefficient d'absorption plus élevés, l'ajout de PC affecte moins la maniabilité des BGP que la PB et PM. Ces résultats peuvent être justifiés par la forme morphologique fortement anguleuse et très rugueuse de la PB et par la nature calcaire cohésive de PM qui favorise un bon écoulement (Vieira et al. 2015 ; Varadharajan 2020).



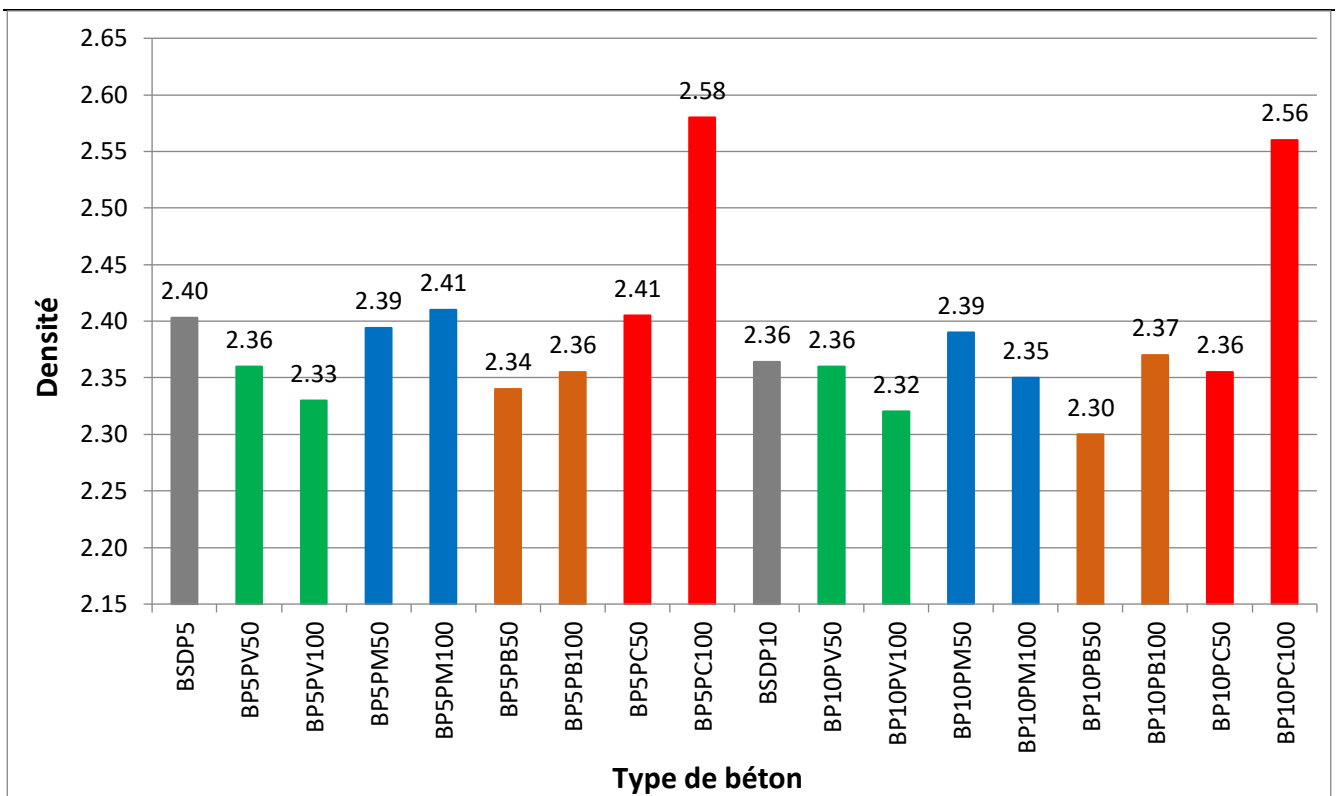
Type de béton	BP5PV50	BP5PV100	BP5PM50	BP5PM100
Taux de modification	-9	-15	-41	-54
Type de béton	BP5PB50	BP5PB100	BP5PC50	BP5PC100
Taux de modification	-50	-68	-36	-48
Type de béton	BP10PV50	BGP10PV100	BP10PM50	BP10PM100
Taux de modification	-25	-35	-40	-55
Type de béton	BP10PB50	BP10PB100	BP10PC50	BP10PC100
Taux de modification	-52	-67	-35	-47

Figure 4.2 Maniabilité des BGP modifiés.

4.3.1.2 Densité :

La figure 4.3 illustre les valeurs de la densité des BGP modifiés, on observe que l’ajout des poudres provoque généralement une diminution la densité des BGP, cette diminution reste faible et presque insignifiante. Par rapport au BSGP5 des taux de réductions de 1.79, 0.37, 2,62 dans les BGP modifiés par l’ajout 50 kg/m³ de PV, PB et PC. Cependant la PM l’augmente de 0.08 reste négligeable. Une observation similaire a été notée par (Wang et al.2022 ; Sabbrojjaman et al. 2024). On peut expliquer la légère variation de la densité par les valeurs proches des masses volumétriques des poudres et des granulats naturels (Vieira et al. 2015 ; Ibrahim 2021).

On remarque aussi les BGP contenant 100 de PC affiche des densités supérieures à celles des BGP et BT. En effet, une augmentation de 7.50,8.47 et 1.99% par rapport BSGP5 et BSGP10 respectivement. Et de 2.78 et 1.99% par rapport BT. Qui peut être expliqué par la SSB élevée de la PC conduit à la densification de mélange et augmente sa capacité liante et sa viscosité plastique (Khodabakhshian et al. 2017 ; Tahwia et al. 2022).



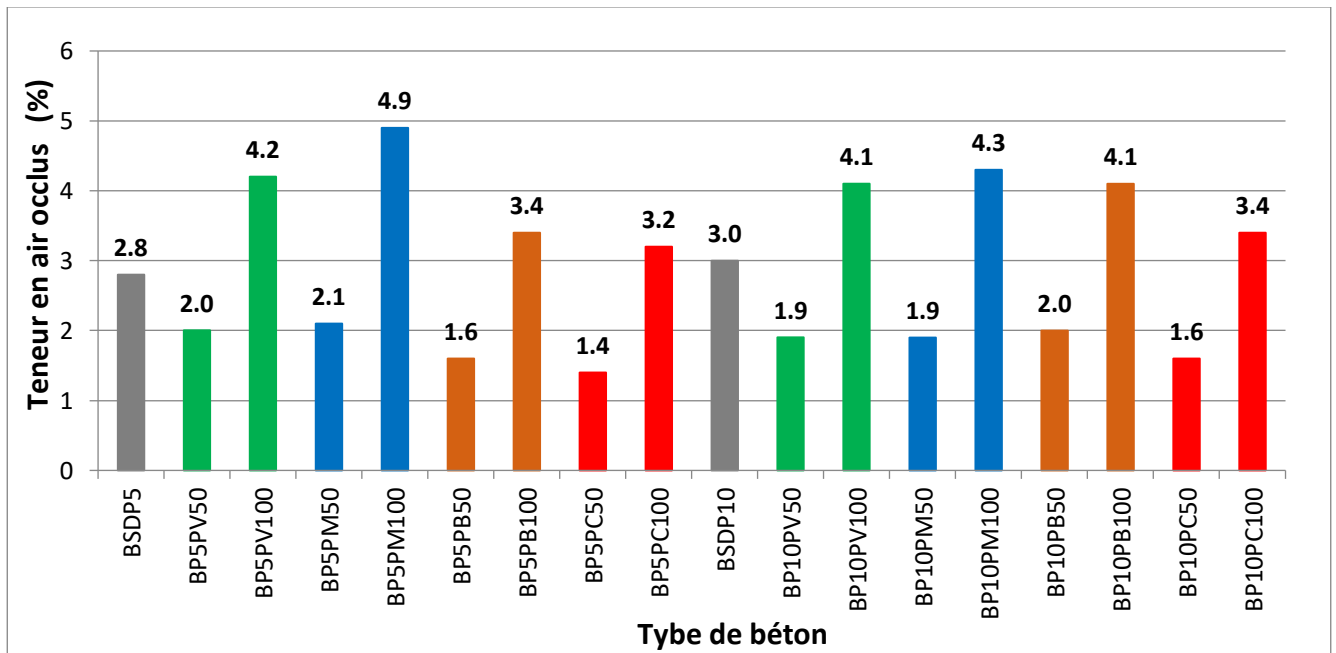
Type de béton	BP5PV50	BP5PV100	BP5PM50	BP5PM100
Taux de modification (%)	-2	-3	0	0
Type de béton	BGC5PB50	BGC5PB100	BGC5PC50	BGC5PC100
Taux de modification (%)	-3	-2	0	7
Type de béton	BP10PV50	BP10PV100	BP10PM50	BP10PM100
Taux de modification (%)	0	-2	1	0
Type de béton	BP10PB50	BP10PB100	BP10PC50	BP10PC100
Taux de modification (%)	-3	0	-0	8

Figure 4.3 Densité des BGP modifiés.

4.3.1.3 Teneur en air occlus :

Les valeurs de la teneur en air occlus des BGP modifiés par l'ajout des poudres sont présentées dans la figure 4.4. On peut constater que l'ajout de 50 kg/m³ des poudres de PV, PM, PB et PC montre un effet bénéfique sur la teneur en air occlus des BGP modifiés. En effet, Une réduction de 28.57, 25, 42.86 et 50% a été affichée respectivement par rapport au BSDP5, et de 36,67, 36.67, 33.33 et 47.0% respectivement par rapport au SDBP10. Cette diminution est attribuée à l'effet de remplissage des poudres qui comble les vides et augmente la compacité des mélanges. On remarque aussi que l'augmentation des dosages en poudres à 100 kg/m³ augmente la teneur en air occlus. Par exemple, les BGP10 contenant 100 kg de de PV, PM, PB et PC présentent une augmentation de la teneur en air occlus de 36.67, 43.33, 33.67 et 13.33% respectivement. Cette augmentation est attribuée au dosage élevé en

fine qui affecte l'empilement granulaire des mélanges et augmente le volume des vides et de la porosité (Verma et al. 2024).



Type de béton
Taux de modification (%)

BP5PV50	BP5PV100
-28	50

BP5PM50	BP5PM100
-25	75

Type de béton
Taux de modification (%)

BP5PB50	BP5PB100
-43	21

BP5PC50	BP5PC100
-50	14

Type de béton
Taux de modification (%)

BP10PV50	BP10PV100
-37	37

BP10PM50	BP10PM100
-37	43

Type de béton
Taux de modification (%)

BP10PB50	BP10PB100
-33	34

BP10PC50	BP10PC100
-47	13

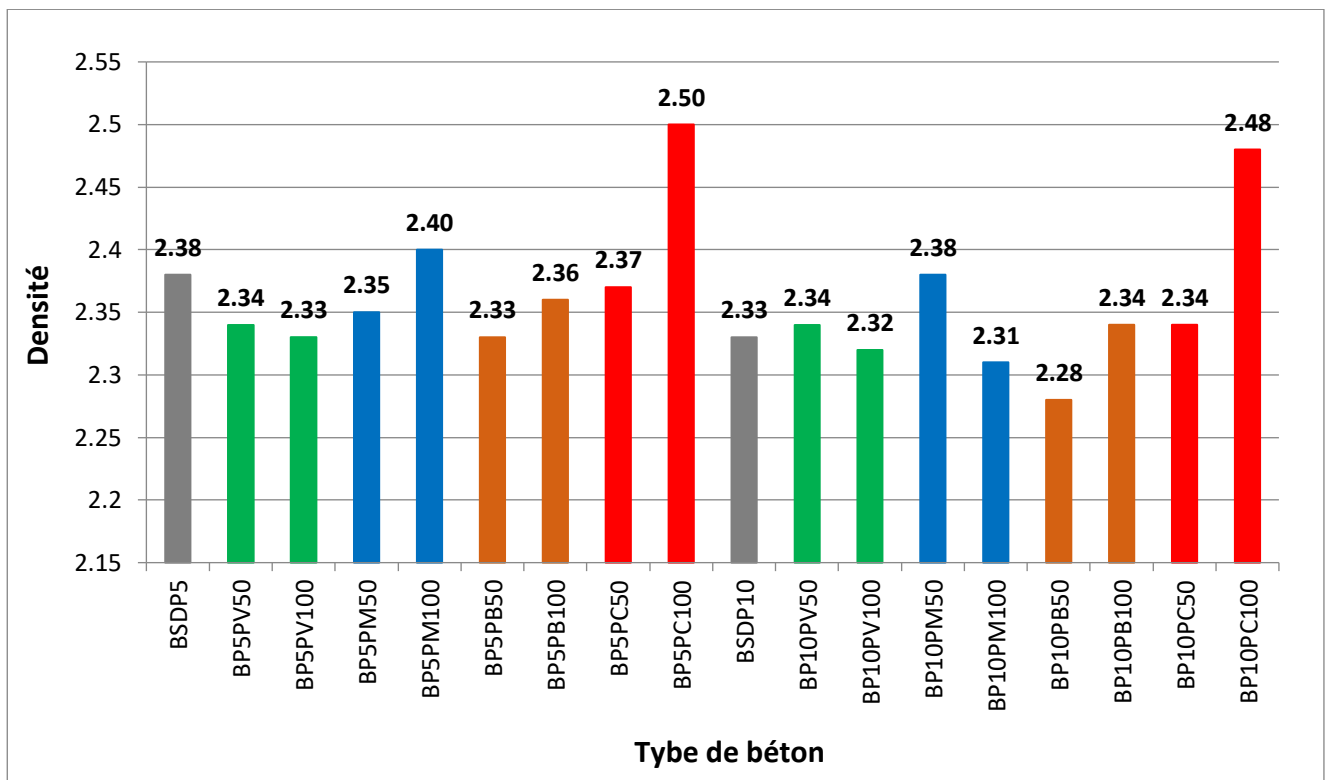
Figure 4.4 Teneur en air occlus des BGP modifiés.

4.3.2 Essais à l'état durci :

4.3.2.1 Densité :

La figure 4.5 illustre la densité des mélanges formulés à 28 jours, la majorité des mélanges modifiés par l'ajout de 50 kg/m³ des poudres présentent une densité durcie plus faible à celle du BGP sans poudre. Même l'augmentation du taux des poudres à 100 kg/m³ provoque des variations considérées comme négligeables. Cette variation est peu marquée aux BP5PM100 et BP10PM50 avec une augmentation de 0,84 et 2,15% respectivement. Cependant, le BP5PC100 et BP10PC100 montre une augmentation de

5.04% et 6.43% par rapport au BSDP5 et BSDP10 respectivement. Cette augmentation est due à la SSB élevé de la PC qui contribué à la densification de mélange (Arif et al. 2021 ; Prakash et al. 2023).



Type de béton	BP5 PV50	BP5 PV100	BP5 PM50	BP5 PM100	BP5 PB50	BP5 PB100	BP5 PC50	BP5 PC100
Taux de modification à 28 J(%)	-2	-2	-1	1	-2	-1	-0	5

Type de béton	BP10 PV50	BP10 PV100	BP10 PM50	BP10 PM100	BP10 PB50	BP10 PB100	BP10 PC50	BP10 PC100
Taux de modification à 28 J(%)	0	0	2	-1	-2	0	0	6

Figure IV.5 Densité des BGP modifiés.

4.3.2.2 Résistance à la compression :

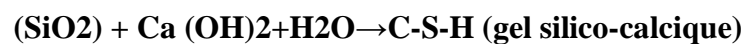
Les résultats de la résistance à la compression des BGP modifiés sont indiqués dans la figure 4.6, on observe une amélioration de la résistance à la compression en fonction de temps. Cela indique que l'incorporation des différentes poudres utilisées n'affecte pas la procédure d'hydratation. On peut constater aussi que l'ajout de PV, PM, PB et PC a un effet bénéfique clair sur la résistance à la compression. Par exemple, l'ajout de 50 kg de PV et PM dans le béton contenant 5 de SDP augmente la résistance à la compression de 32.18 et 41.67 à 28 jours. Aussi les mélanges BGP10 contenant 100 kg de PB et PC 36.38 et 28.38 à 90 jours. La littérature affirme l'effet bénéfique de l'ajout de ces poudres

sur la résistance à la compression qui peut être expliqué par la densification des mélanges de béton par l'effet de remplissage de celles-ci (Muhedin and Ibrahim 2023 ; Bagaria and Juneja 2023 ; Wu et al. 2024 ; Moolchandani 2025).

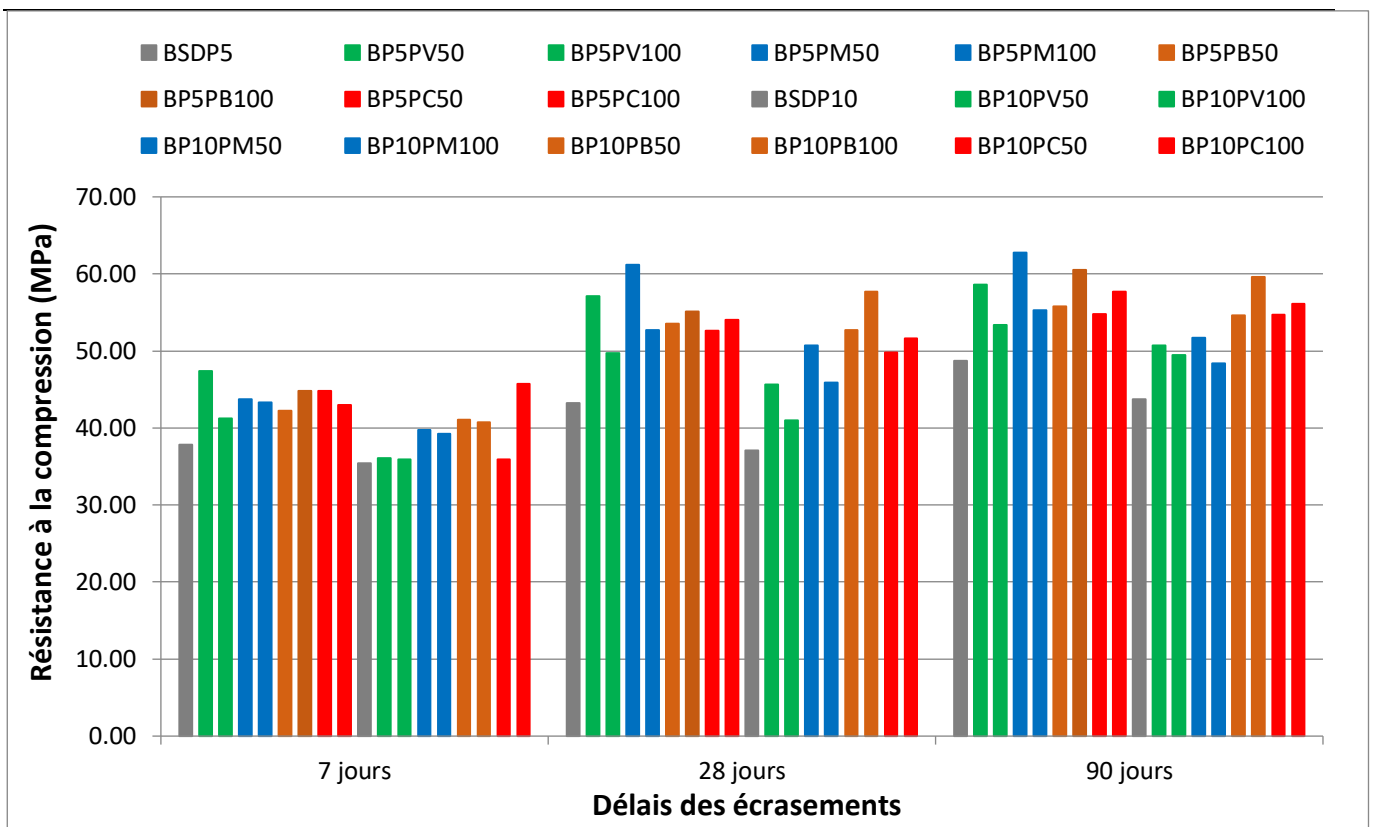
On constate aussi que les BGP modifié par l'ajout de 50 kg de PV et PM montrent les plus grandes valeurs de résistance à la compression. Cependant, l'augmentation du dosage à 100kg réduit le taux d'augmentation à 15.05% et 21.99% par rapport au BGP5 et à 10.51% et 23.72% par rapport à BGP10 respectivement à 28 jours. Ces résultats sont conformes aux résultats de (Kumar et al.2020 ; Wang et al. 2022 ; Sabbrojjaman et al. 2024). Cette amélioration est due à la surface spécifique élevée du PM et son excellent effet de remplissage (Singh et al. 2019 ; Selvasofia and Babu 2020). Cette augmentation est aussi attribuée à l'activité pouzzolanique de PV (Belkadi et al. 2024 ; Baikerikar et al. 2023).

Les BGP contenant la PB et PC montrent une augmentation progressive avec l'augmentation du dosage des poudres. Des résultats similaires ont été constaté par (Arif et al.2021 ; Zhang et al. 2024). Cette augmentation a été expliqué par la réaction pouzzolanique de PB et PC (Nassar et al. 2021 ; Tahwia et al.2022 ; Lauren et al. 2022 ; Paithankar et al.2023 ; Sinkhonde 2024). Cette réaction chimique qui déroule entre la silice et l'alumine réactive présente dans les particules de PV, PB et PC et la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment en présence d'eau et à une température ambiante, conduit à la formation du gel d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) (Paithankar et al. 2023 ; Yang et al. 2024). La formation de C-S-H favorise un affinement des pores (Wong et al. 2018b), une densification de la microstructure et une amélioration de la zone de transmission interfaciale (ZTI) (Mishra et al. 2025).

L'équation de la réaction pouzzolanique (Sinkhonde 2024)



On peut noter que les meilleurs mélanges sont BP5PV50, BP5PM50, BP10PB100, BP5PC100 ont montré une amélioration de 13.74%,21.91%,14.34%et 7.56% respectivement par rapport au BT.



Type de béton	BP5 PV50	BP5 PV100	BP5 PM50	BP5 PM100	BP5 PB50	BP5 PB100	BP5 PC50	BP5 PC100
Taux de modification à 7 Jours (%)	25	9	16	14	12	18	18	14
Taux de modification à 28 Jours (%)	32	15	42	22	24	27	22	25
Taux de modification à 90 Jours (%)	20	10	29	13	14	24	12	18

Type de béton	BP10 PV50	BP10 PV100	BP10 PM50	BP10 PM100	BP10 PB50	BP10 PB100	BP10 PC50	BP10 PC100
Taux de modification à 7 Jours (%)	2	1	12	11	16	15	1	29
Taux de modification à 28 Jours (%)	23	10	37	24	42	55	34	39
Taux de modification à 90 Jours (%)	16	13	18	11	25	37	25	28

Figure 4.6 Résistance à la compression des BGP modifiés.

4.3.2.3 Résistance à la traction par flexion :

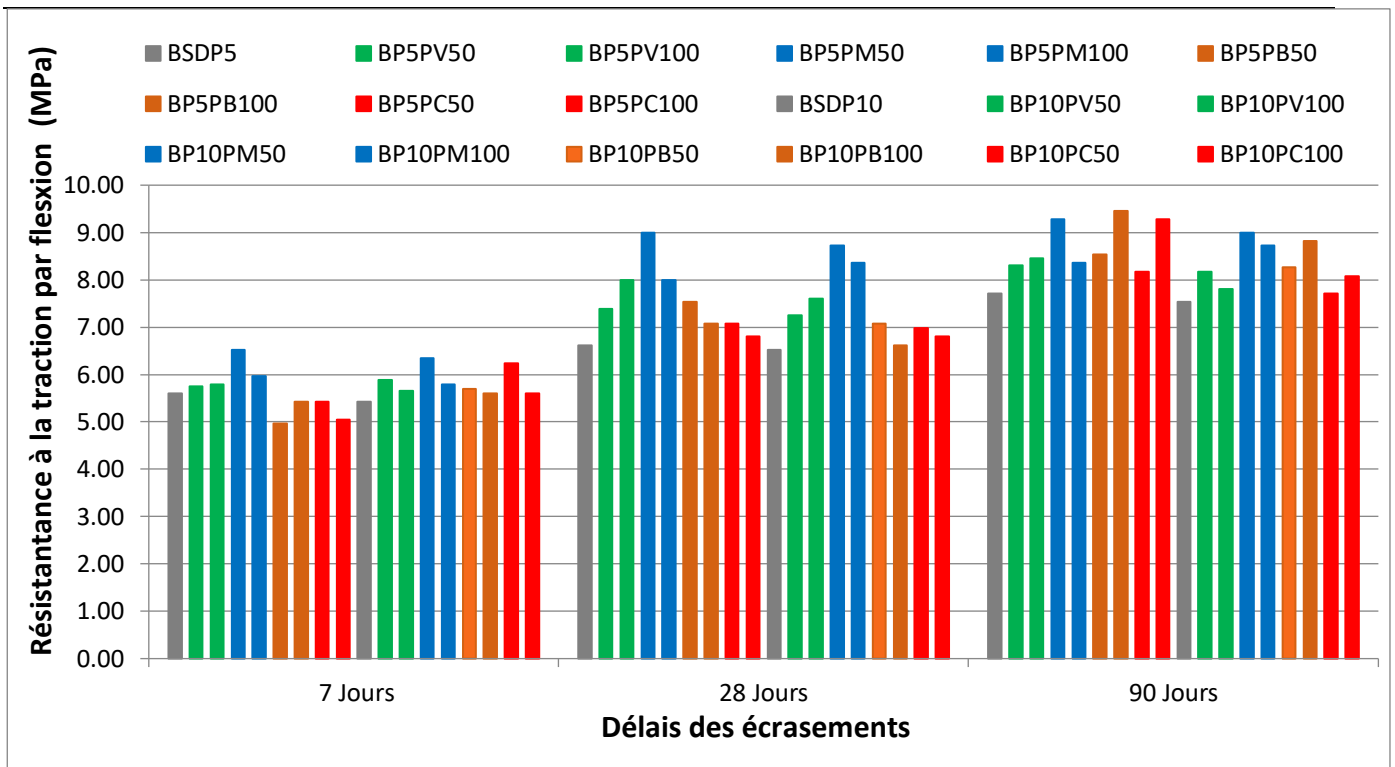
La figure 4.7 illustre les résultats de la résistance à la traction par flexion des BGP modifiés. Comme dans le cas de la résistance à la compression, l'ajout des poudres dans la composition des BGP a un effet bénéfique. Cette amélioration a été observée par (Kumar et al. 2020 ; Lezzerini et al. 2022). Qui l'ont attribué à la présence des fines qui densifier le mélange et conduit à une amélioration des propriétés mécaniques (Mishra et al. 2025).

On peut observer que le BSGP5 modifié par l'ajout de 50kg/m³ PM montre la plus grande amélioration des taux d'amélioration de 16.43, 36.16 et 20.36% à 7, 28 et 90 jours respectivement. Cette amélioration est expliquée par la capacité de remplissage de PM (Vardhan 2019 Singh et al. 2019 ; Özkılıç et al. 2023). Cependant, l'augmentation du dosage de PM à 100 kg/m³ réduit le taux d'amélioration de 60.86, 42.25 et 58.59% respectivement. Une tendance similaire a été observée par (Selvasofia and Babu 2020 ; Kumar et al. 2020), et a été justifié par le besoin d'une quantité supplémentaire en eau.

La modification du BSGP5 par l'ajout de PV montre une tendance différente. la présence de 50kg/m³ de PV dans le BSGP5 et BSGP10 montre des taux d'augmentation de 11.65 et 11.20%. Ces taux augmentent à 20.88 et 16.56% avec l'augmentation du dosage de PV à 100kg/m³ à 28 jours. Ces résultats concordent avec ceux de (Nassar et al. 2021 ; Tahwia et al. 2022 ; Paithankar et al. 2023 ; Mustafa et al. 2023).

La figure 4.7 présente aussi la variation de BGP modifiés par l'ajout de PB et PC. Une tendance identique été clairement notée, les bétons modifiés par l'ajout de PB et PC montrent une réduction de la résistance à la traction par flexion de 11.43 et 3.21% à 7 jours respectivement. Alors qu'à 28 jours on peut observer une amélioration de 13.92 et 6.96% des BSGP5 modifiés par l'ajout de PB et PC respectivement. Ces taux d'amélioration réduit à 6.9 et 2.87% des BP5PB100 et BP5PC100. une tendance inverse été enregistré à 90 jours, l'augmentation du dosage à 100kg/m³ montre un effet bénéfique par une amélioration de la résistance à la flexion avec des taux de 22.70 et 20.36% des BSGP5 avec l'ajout de 100kg/m³ de PB et PC respectivement. Des résultats identiques ont été observés par (Arif et al. 2024 ; Nassar et al. 2021). Cette augmentation peut expliquer par la réaction pouzzolanique (Muhedin and Ibrahim 2023 ; Sabbrojjaman et al. 2024).

On peut également noter que plusieurs BGP modifiées affichent des résistances à la traction par flexion plus élevés par rapport au BT. Des taux d'amélioration de 6.15, 16.58, 18.84 et 16.58% sont enregistrés dans les mélanges BP5PV100, BP5PM50, BP5PB100 et BP5PC100 respectivement.



Type de béton	BP5 PV50	BP5 PV100	BP5 PM50	BP5 PM100	BP5 PB50	BP5 PB100	BP5 PC50	BP5 PC100
Taux de modification à 7 J (%)	3	3	16	6	-11	-3	-3	-10
Taux de modification à 28 J (%)	12	21	36	21	14	7	7	3
Taux de modification à 90 J (%)	8	10	20	8	11	23	6	20

Type de béton	BP10 PV50	BP10 PV100	BP10 PM50	BP10 PM100	BP10 PB50	BP10 PB100	BP10 PC50	BP10 PC100
Taux de modification à 7 J (%)	8	4	17	7	5	3	15	3
Taux de modification à 28 J (%)	11	16	34	28	8	1	7	4
Taux de modification à 90 J (%)	8	3	19	16	10	17	2	7

Figure IV.7 Résistance à la traction par flexion des BGP modifiés.

4.3.2.4 Essais non destructif :

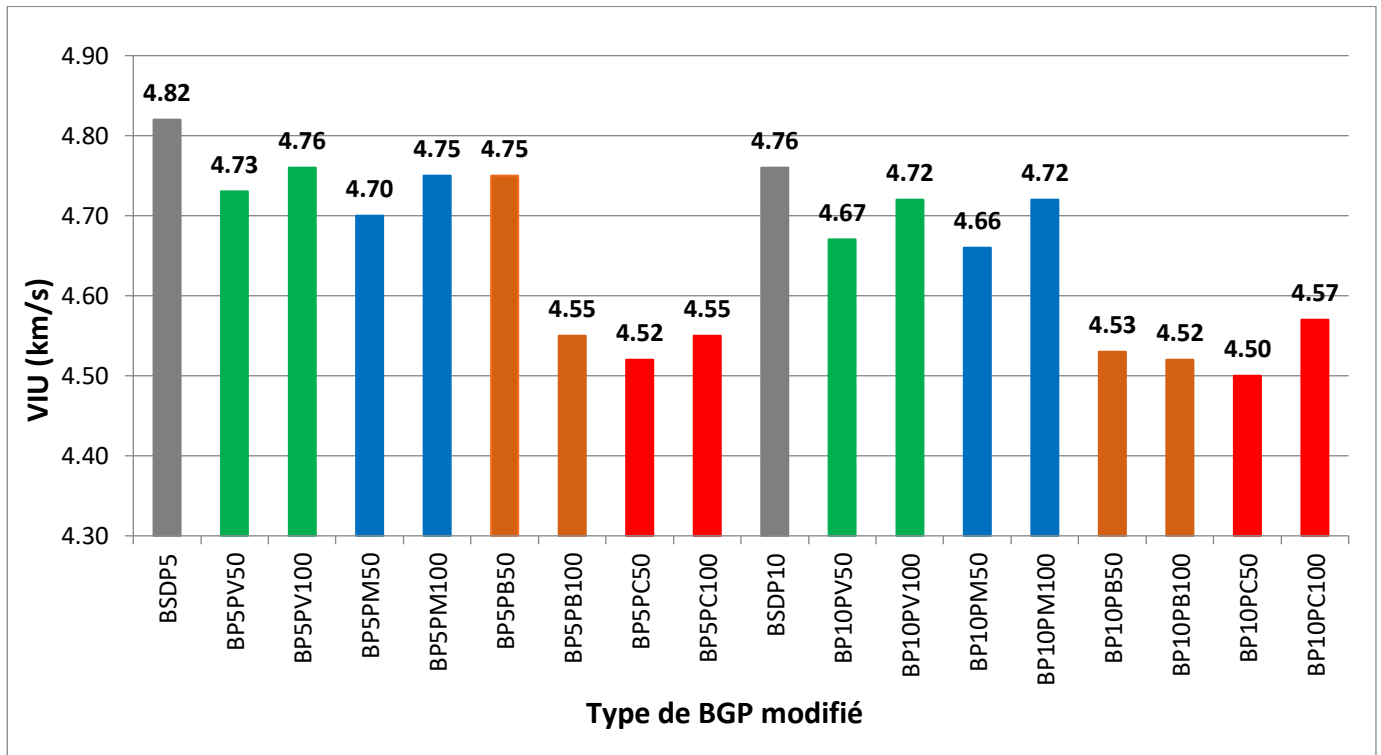
4.3.2.4.1 Auscultation dynamique :

Les vitesses d'impulsion ultrasonique (VIU) des BGP modifiés à 28 jours sont illustrées dans la figure 4.8. On peut constater que l'ajout des poudres a un effet défavorable sur les valeurs de l'VIU. Des taux de réduction de 1.86, 2.48, 1.45 et 6.22% ont été enregistrés dans les BGP5 modifiés par l'ajout de

50kg/m³ de PV, PM, PB et PC respectivement. On peut observer aussi que l'augmentation du dosage en poudre à 100kg/m³ augmente légèrement la VIU. Sauf les mélanges contenant la PB, l'augmentation du taux conduit à une réduction la VIU.

Malgré la diminution des VIU, tous les BGP formulés ont une valeur supérieure à 4.5 km/s (une excellente qualité), On peut expliquer la réduction des valeurs VIU des mélanges de BGP par l'hétérogénéité et la diversité des constituants (Arif et al. 2024 ; Arenas-Piedrahita et al. 2016).

Et aussi l'VIU sont significativement influencés par la densité des constituants ajoutés aux mélanges.



<table border="1"> <tr><td>Type de béton</td></tr> <tr><td>Taux de modification (%)</td></tr> </table>	Type de béton	Taux de modification (%)	<table border="1"> <tr><td>BP5PV50</td><td>BP5PV100</td></tr> <tr><td>-2</td><td>-1</td></tr> </table>	BP5PV50	BP5PV100	-2	-1	<table border="1"> <tr><td>BP5PM50</td><td>BP5PM100</td></tr> <tr><td>-2</td><td>-1</td></tr> </table>	BP5PM50	BP5PM100	-2	-1
Type de béton												
Taux de modification (%)												
BP5PV50	BP5PV100											
-2	-1											
BP5PM50	BP5PM100											
-2	-1											
<table border="1"> <tr><td>Type de béton</td></tr> <tr><td>Taux de modification (%)</td></tr> </table>	Type de béton	Taux de modification (%)	<table border="1"> <tr><td>BP5PB50</td><td>BP5PB100</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-6</td></tr> </table>	BP5PB50	BP5PB100	-1	-6	<table border="1"> <tr><td>BP5PC50</td><td>BP5PC100</td></tr> <tr><td>-6</td><td>-6</td></tr> </table>	BP5PC50	BP5PC100	-6	-6
Type de béton												
Taux de modification (%)												
BP5PB50	BP5PB100											
-1	-6											
BP5PC50	BP5PC100											
-6	-6											
<table border="1"> <tr><td>Type de béton</td></tr> <tr><td>Taux de modification (%)</td></tr> </table>	Type de béton	Taux de modification (%)	<table border="1"> <tr><td>BP10PV50</td><td>BP10PV100</td></tr> <tr><td>-2</td><td>-2</td></tr> </table>	BP10PV50	BP10PV100	-2	-2	<table border="1"> <tr><td>BP10PM50</td><td>BP10PM100</td></tr> <tr><td>-2</td><td>-01</td></tr> </table>	BP10PM50	BP10PM100	-2	-01
Type de béton												
Taux de modification (%)												
BP10PV50	BP10PV100											
-2	-2											
BP10PM50	BP10PM100											
-2	-01											
<table border="1"> <tr><td>Type de béton</td></tr> <tr><td>Taux de modification (%)</td></tr> </table>	Type de béton	Taux de modification (%)	<table border="1"> <tr><td>BP10PB50</td><td>BP10PB100</td></tr> <tr><td>-5</td><td>-5</td></tr> </table>	BP10PB50	BP10PB100	-5	-5	<table border="1"> <tr><td>BP10PC50</td><td>BP10PC100</td></tr> <tr><td>-5</td><td>-4</td></tr> </table>	BP10PC50	BP10PC100	-5	-4
Type de béton												
Taux de modification (%)												
BP10PB50	BP10PB100											
-5	-5											
BP10PC50	BP10PC100											
-5	-4											

Figure 4.8 Vitesses d'impulsion ultrasonique des BP modifiés.

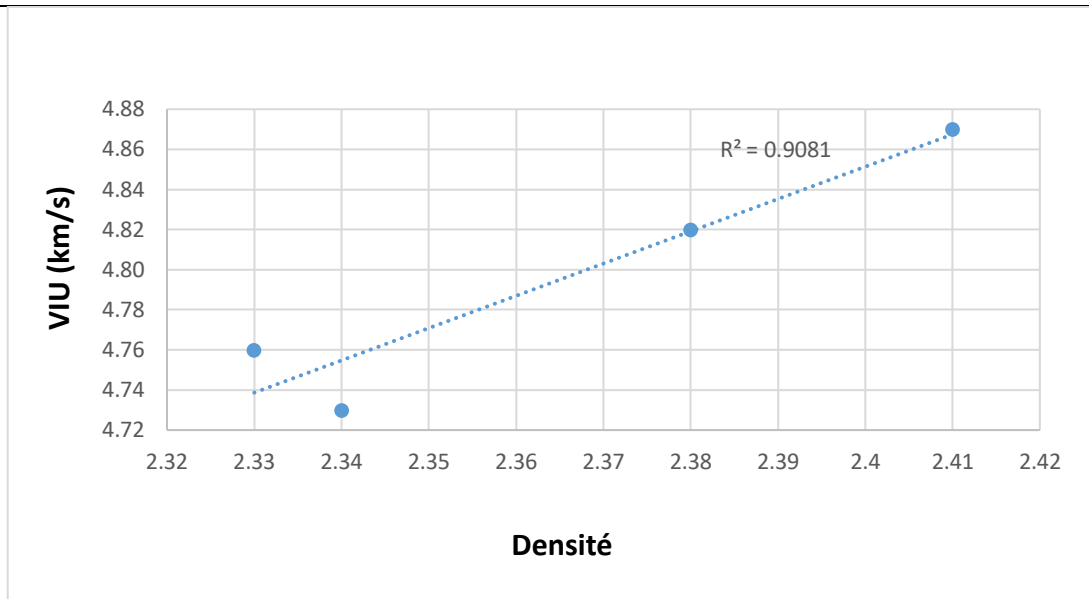
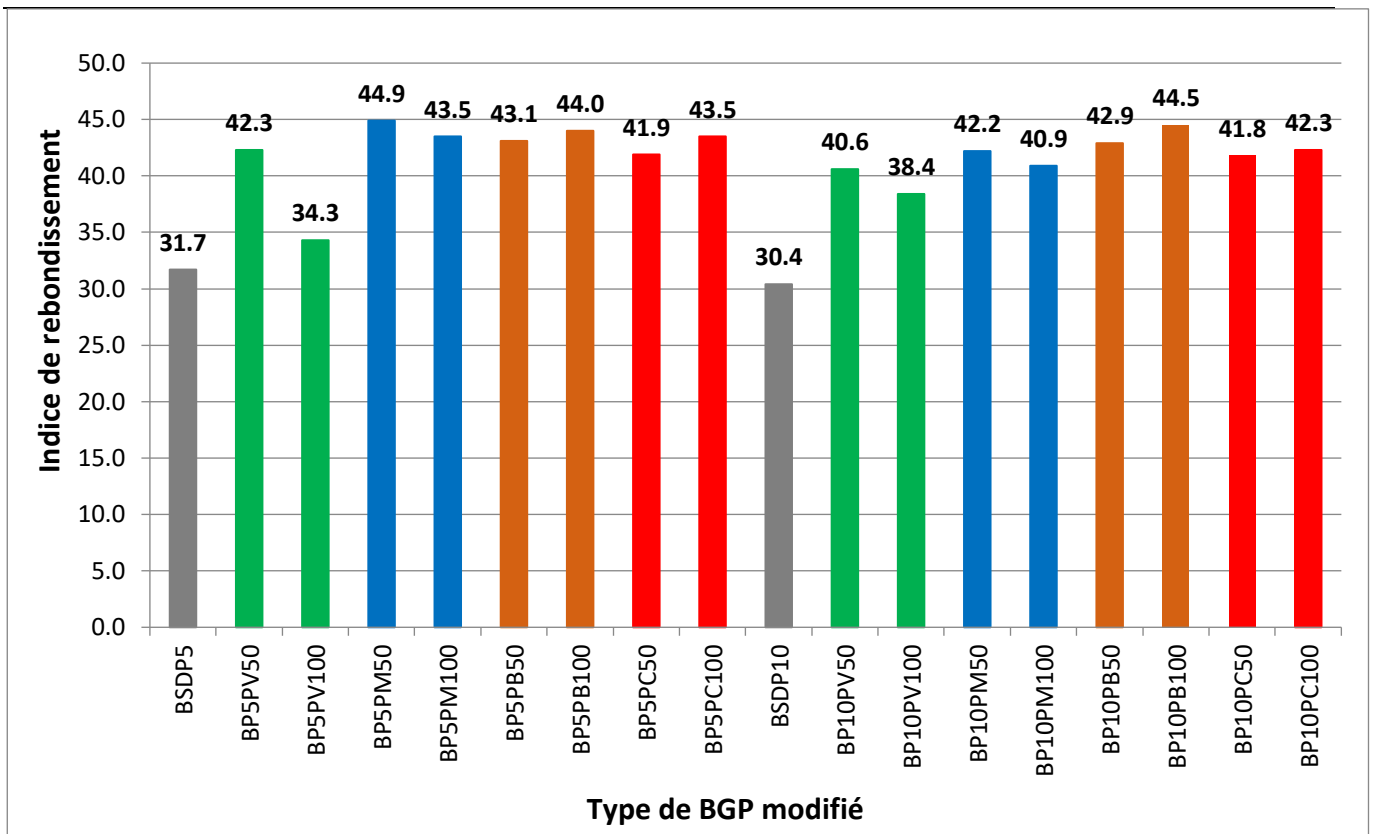


Figure 4.9 Corrélation entre la densité et VIU.

La corrélation entre la densité et la vitesse d'impulsion ultrasonique VIU à 28 jours est représentée dans la figure 4.9. Une forte corrélation entre ces deux propriétés avec un coefficient de corrélation (R^2) de 0.91 est remarqué. Ce qui confirme l'interaction entre ces deux propriétés.

4.3.2.4.2 Scléromètre (L'indice de rebondissement) :

La figure 4.10 Montre les valeurs des indices de rebondissement des différents mélanges formulés. On peut constater que la modification des BGP par l'ajout des poudres montre un effet bénéfique sur les indices de rebondissement des différents bétons modifiés. Une augmentation d'indice de rebondissement est enregistrée pour tous les mélanges par rapport aux mélanges BSDP5, BSDP10 et BT. On peut constater aussi que l'ajout de 50 kg/m³ montre des taux d'augmentation de 33.43 et 41.64% des BGP modifiés par la PV et PM, et de 38.80 et 37.22% des BGP modifiés par l'ajout de 100 kg/m³ de PB et PC. Une amélioration similaire a été observée par Arif et al. (2021).



Type de béton	BP5PV50	BP5PV100	BP5PM50	BP5PM100
Taux de modification (%)	33	8	42	37
Type de béton	BP5PB50	BP5PB100	BP5PC50	BP5PC100
Taux de modification (%)	36	39	32	37
Type de béton	BP10PV50	BP10PV100	BP10PM50	BP10PM100
Taux de modification (%)	33	26	39	34
Type de béton	BP10PB50	BP10PB100	BP10PC50	BP10PC100
Taux de modification (%)	41	46	37	39

Figure 4.10 Indices de rebondissement des BGP modifiés.

4.3.2.5 Essais de durabilité :

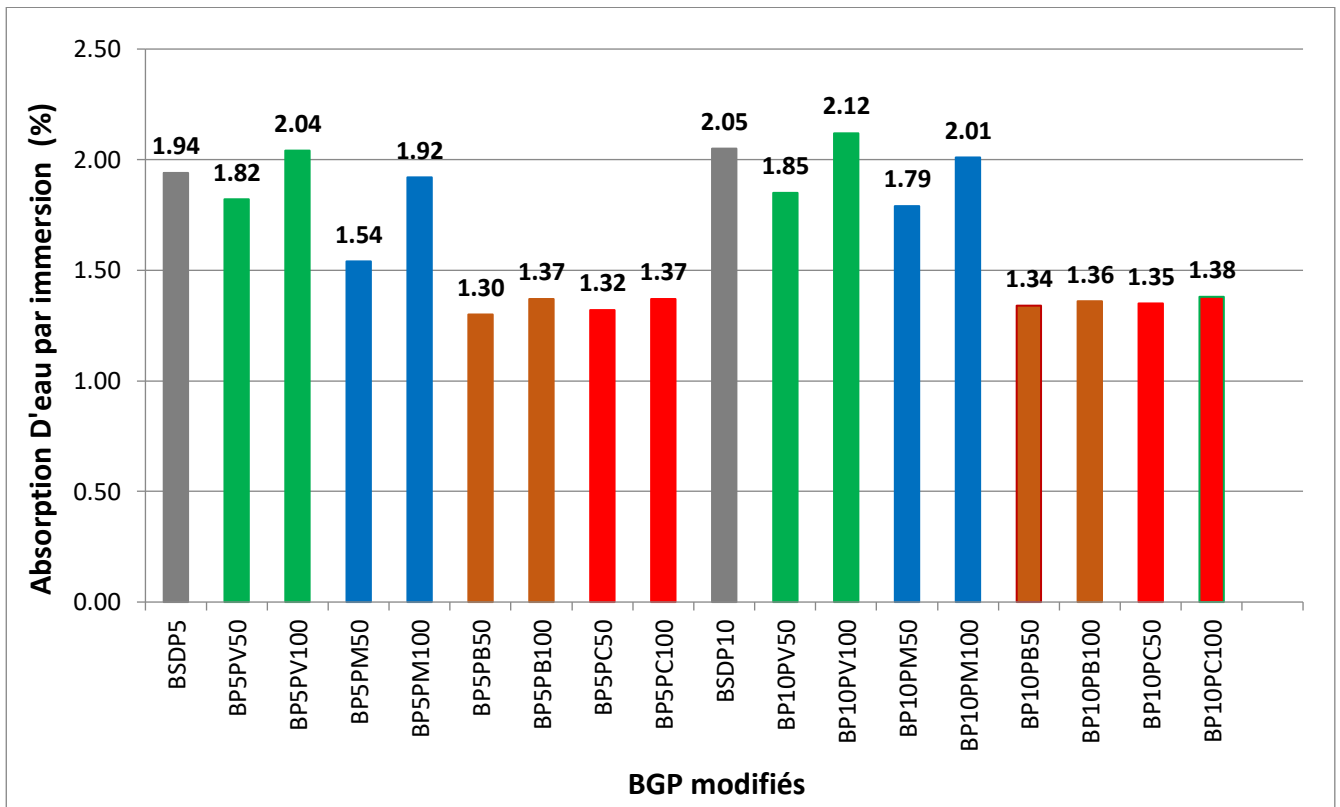
4.3.2.5.1 Absorption d'eau par immersion :

La figure 4.11 Montre les valeurs d'absorption d'eau des BGP modifiés. Comme on peut observer, l'ajout de 50 kg/m³ de poudres PV, PM, PB et PC aux BP5 conduit à une réduction d'absorption d'eau maximale. En effet des taux de réduction de 6.18, 1.03, 32.98 et 31.95% ont été enregistrés respectivement. Ces résultats concordent aux ceux de (Resin et al. 2018 ; Tahwia et al. 2022 ; Paul et al.

2022). Cette réduction peut justifier par la diminution de la porosité (Parashar et al. 2022). Elle peut-être aussi expliquée par la réaction pouzzolanique de la PV, PB et PC qui affine la structure des pores et diminuer leur connectivité (Khodabakhshian et al. 2017 ; Résin et al. 2018 ; Varadharajan 2020). Les taux de réduction élevés de l'absorption d'eau dans les BGP modifiés par la PB et PC sont attribués à la teneur en Fe₂O₃ dans le PB et PC qui peut également compacter le ciment et densifier la microstructure du béton (Li et al. 2024).

On peut constater aussi que l'augmentation du dosage des poudres de PV, PM, PB et PC à 100kg/m³ dans les BSDP5, diminue les taux de réduction, un écart de 12.08, 24.67, 5.38 et 3.78% ont été enregistré. Des résultats similaires ont été observés par (Heidari and Tavakol 2013 ; Chen et al. 2022 ; Zhang et al. 2022). Cette tendance de la diminution des taux de réduction d'absorption d'eau pour les BGP contenant de 100kg peut être expliqué par la présence d'une quantité importante des fines qui provoque une floculation conduit à un affaiblissement de la structure poreuse apparente (Un système dense comprend généralement plusieurs vides) (Aydin and Are 2019).

Malgré l'augmentation d'absorption d'eau, tous les BP ont des valeurs inférieures à 3 alors selon la norme ASTM C 642 (béton durci) ce sont des bétons de bonne qualité.



Type de béton	BSDP5	BP5PV50	BP5PV100	BP5PM50	BP5PM100
Taux de modification (%)	12	5	18	32	39

Type de béton	BSDP5	BP5PB50	BP5PB100	BP5PC50	BP5PC100
Taux de modification (%)	12	-33	-29	-32	-29

Type de béton	BSDP10	BP10PV50	BP10PV100	BP10PM50	BP10PM100
Taux de modification (%)	18	12	15	32	46

Type de béton	BSDP10	BP10PB50	BP10PB100	BP10PC50	BP10PC100
Taux de modification (%)	18	-35	-34	-34	-33

Figure 4.11 Absorption d'eau par immersion des BGP modifiés.

4.3.2.5.2 Absorption d'eau par capillarité :

La figure 4.12 montre les valeurs d'absorption d'eau par capillarité des BGP modifiés. On constate que l'absorption d'eau par capillarité augmente proportionnellement à la durée d'immersion. L'ajout des poudres réduit le coefficient d'absorption d'eau. On observe aussi que l'augmentation du dosage des poudres augmente le taux de diminution de l'absorption d'eau. Une observation similaire a été noté par Belouadah et al. (2019). Cette diminution est due à l'effet de remplissage des micropores des poudres et aussi due à la réaction pouzzolanique qui réduite la connectivité des pores (Tahwia et al. 2022 ; Ibrahim 2021).

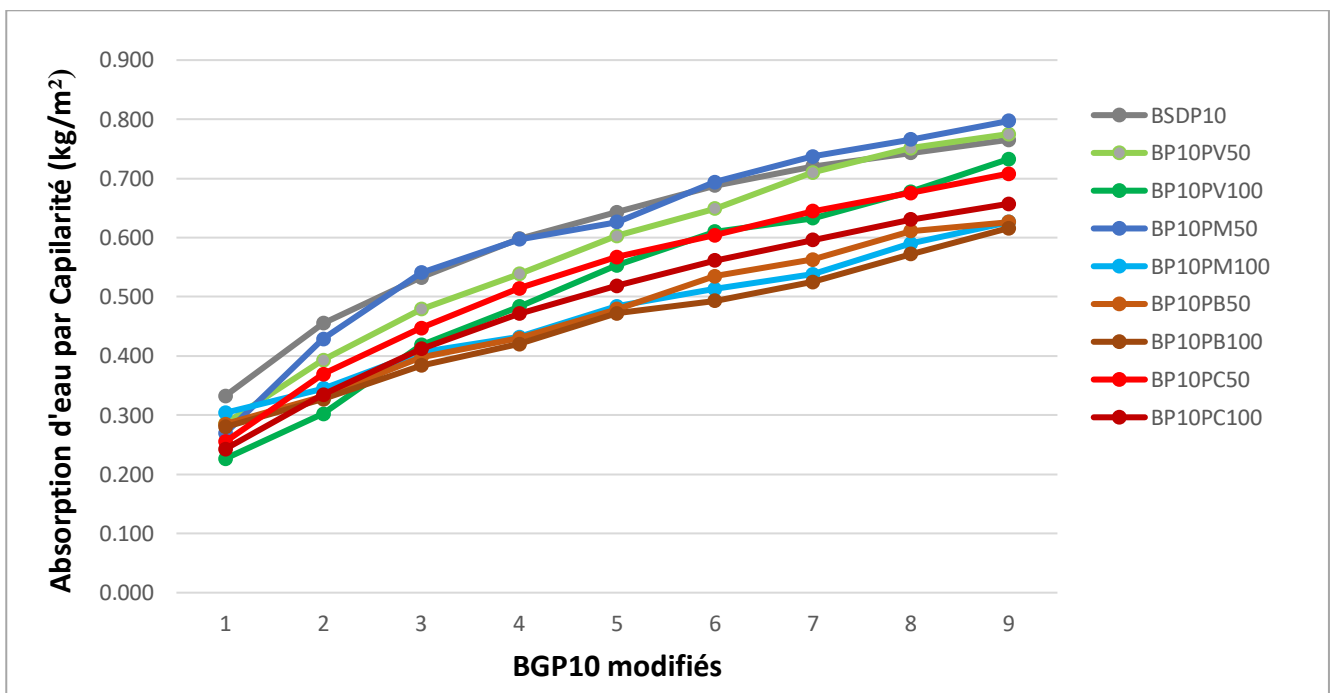
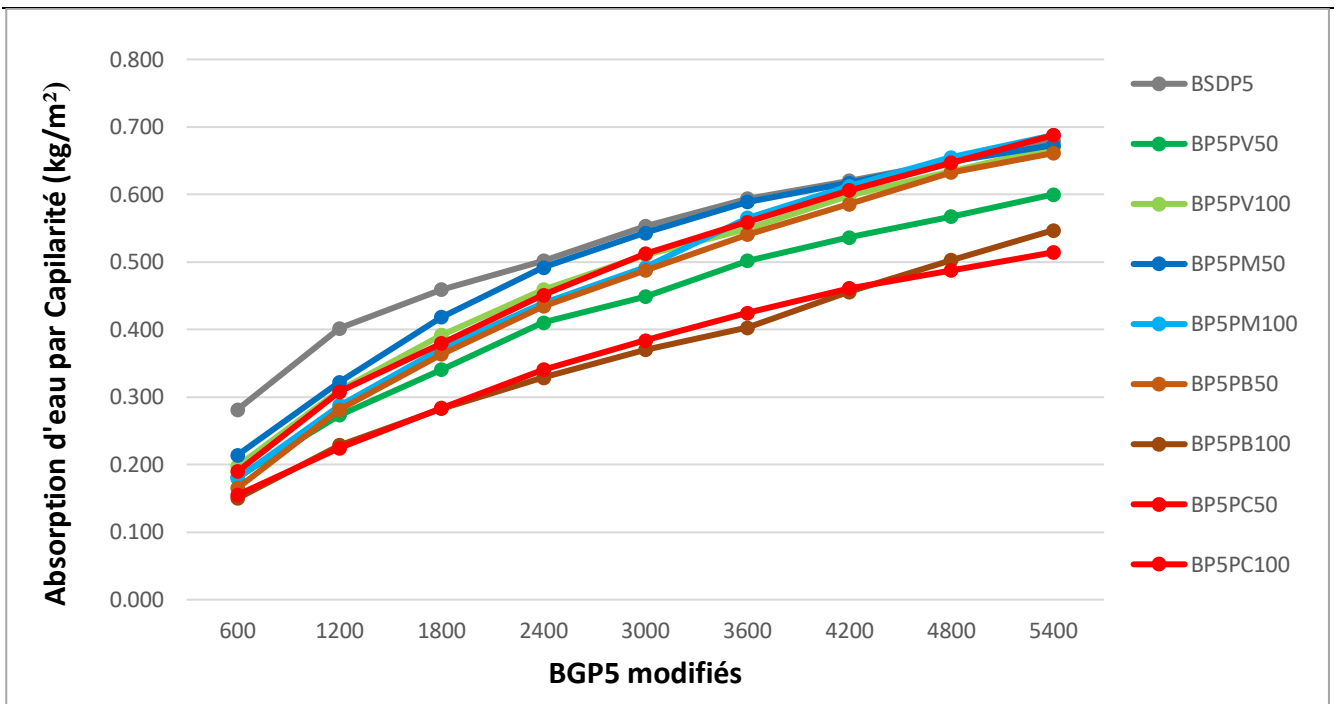


Figure 4.12 Absorption d'eau par capillarité des BGP formulés.

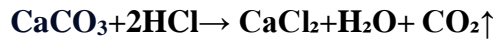
4.3.2.5.3 Résistance aux attaques chimiques :

4.3.2.5.3.1 Résistance à l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) :

La figure 4.14 illustre la variation de la résistance à la compression des BP modifiés conservés en milieu acide concentré à 5% de HCl à 56, 90 et 180 jours. Cette figure montre que tous les BGP modifiés par l'ajout des poudres présentent une perte de résistance après l'exposition à un milieu acide chlorhydrique. Cette perte augmente avec la durée d'exposition. On peut constater clairement que l'ajout de PM a un

effet défavorable sur la résistance à la compression dans ce milieu acide. En effet, une augmentation de taux de perte de 39.8 à 65.2 par rapport au BGP5 et de 37.9 à 60.4% par rapport au BGP10 à 180 jours. L'augmentation du dosage de PM à 100 kg/m³ augmente cette perte à 66.9 et 63.10% par rapport BGP5 et BGP10 respectivement. Une tendance similaire a été notée par Arel (2016).

Cette augmentation de taux de perte est expliquée à la forte réaction entre le composant essentiel de PM (CaCO₃) et le HCl. Aussi, la valeur élevée de SSB de PM augmente cette perte par la formation du sel soluble (CaCl₂) (Siad et al. 2010).



En effet, La présence d'une teneur élevée en carbonate de calcium (CaCO₃) augmente la capacité des fillers calcaires à absorber davantage de HCl. La très grande finesse des fillers calcaires augmente également l'agressivité de l'acide, qui lessive rapidement la pâte, notamment à la surface de l'éprouvette exposée

On peut observer également que les BGP modifiés par l'ajout de 50 kg/m³ des poudres de PV, PB et PC réduit le taux de perte de résistance à la compression. Effectivement, l'ajout de 50 kg/m³ de PV, PB et PC au BSGP5 réduit le taux de perte de 17.83, 13.82 et 17.58% respectivement. Même avec l'augmentation du dosage à 100 kg/m³ cette réduction a été enregistrée. Ces résultats concordent avec ceux de (Sivakumar et al. 2021 ; Meena et al. 2022). Cette augmentation de résistance dans ce milieu agressif peut être justifié par la réaction pouzzolanique qui contribue à la consommation de la portlandite libre qui constitue la phase la plus vulnérable de béton vis-à-vis les milieux acides et par l'effet de remplissage de ces poudres qui réduit la porosité (Bedici et al. 2024 ; Setinaa et al. 2013).

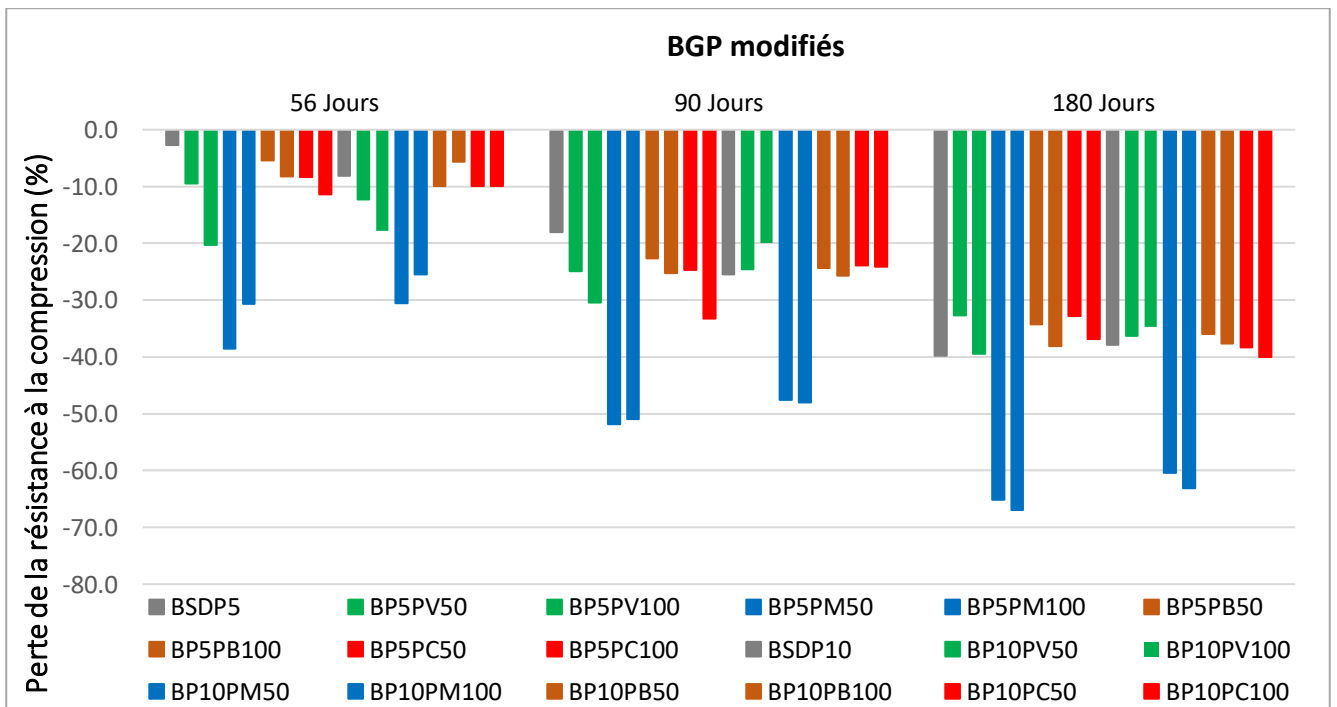
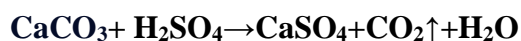


Figure 4.13 Perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans HCl des BGP modifiés.

4.3.2.5.3.2 Résistance à l'attaque par l'acide sulfurique H₂SO₄ :

La perte de résistance à la compression des BGP modifiés immergés dans une solution d'acide sulfurique H₂SO₄ concentrée à 5 % à 56, 90 et 180 jours est présentée dans la figure 4.15. Après l'exposition à un milieu acide sulfurique tous les BGP présentent une perte de la résistance à la compression. Cette perte augmente progressivement avec la durée d'exposition. La valeur de la perte de résistance est plus prononcée dans les BGP modifiés par l'ajout de PM. En effet, l'ajout de 50 kg/m³ de PM au BGP5 et BGP10 provoque un taux de perte de 65.1 et 53.6%, avec une augmentation de perte de résistance de 15.68 et 19.96% à la durée de 180 d'exposition. Ce taux de perte augmente avec l'augmentation de dosage de PM. Une tendance similaire a été observée par (Aydin and Are 2019 ; Prakash et al. 2023). Et a été expliquée par la dissolution de la calcite de marbre en présence d'un acide fort tel que l'acide sulfurique. Les carbonates sont facilement solubles dans un acide fort tel que l'acide sulfurique. Ces carbonates redeviennent du CO₂ gazeux et la structure du béton devient plus poreuse (Messaloudene et al. 2019).



On peut également noter que la perte de résistance dans la solution H₂SO₄ est faible par rapport à le HCl. Cette observation a été notée par (Siad et al. 2010).

Cependant, l'ajout des autres poudres montre une diminution des taux de perte de la résistance à la compression. Effectivement, l'ajout de 50 kg/m³ de PV, PB et PC au PGB5 réduit les taux de perte de 47.3 à 38.6, 38.4 et 37.3 respectivement. L'ajout de cette même quantité au PGB10 réduit aussi les taux de perte de 42.9 à 41.8, 38.8 et 39.8 respectivement à 180 jours. Les études (Wong et al 2018 ; Chandra Prakash et al. 2022 ; Ebrahimi et al. 2023 ; Mustafa et al. 2023 ; Matos et al. 2024) ont justifié cet effet bénéfique par la réaction pouzzolanique qui génère de C-S-H et qui conduit à la densification de la microstructure. Cette réaction réduit la présence d'hydroxyde de calcium libérée lors de l'hydratation et par conséquent minimise le risque de la formation de gypse expansif (Liu and Wang 2015 ; Abdala et al. (2024)). On peut noter aussi que l'augmentation du dosage des poudres augmente légèrement le taux de perte. Cette tendance a été notée par Bedici et al. (2024).

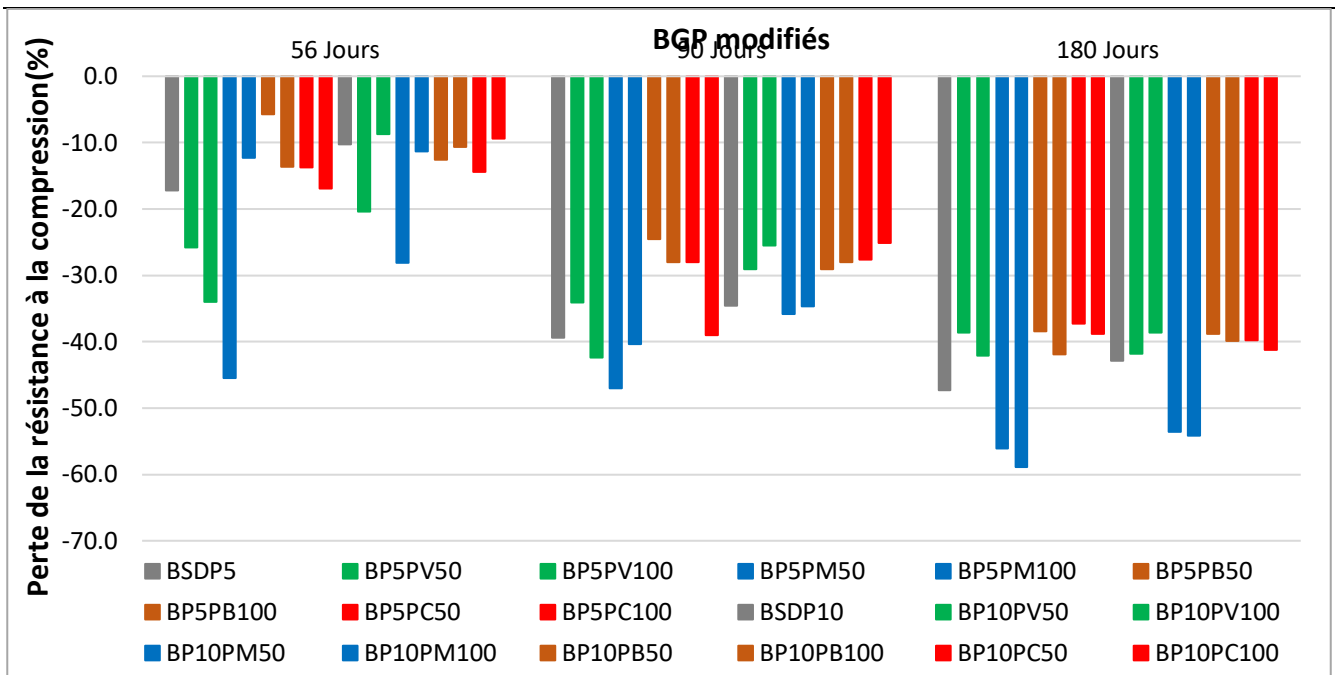


Figure 4.14 Perte de résistance en fonction de la période d'immersion dans H₂SO₄ des BGP modifiés.

4.3.2.6 Microstructure des BGP modifiés :

La microstructure des BGP modifiés par les poudres recyclées a été analysés à l'aide d'un microscope à balayage MEB.



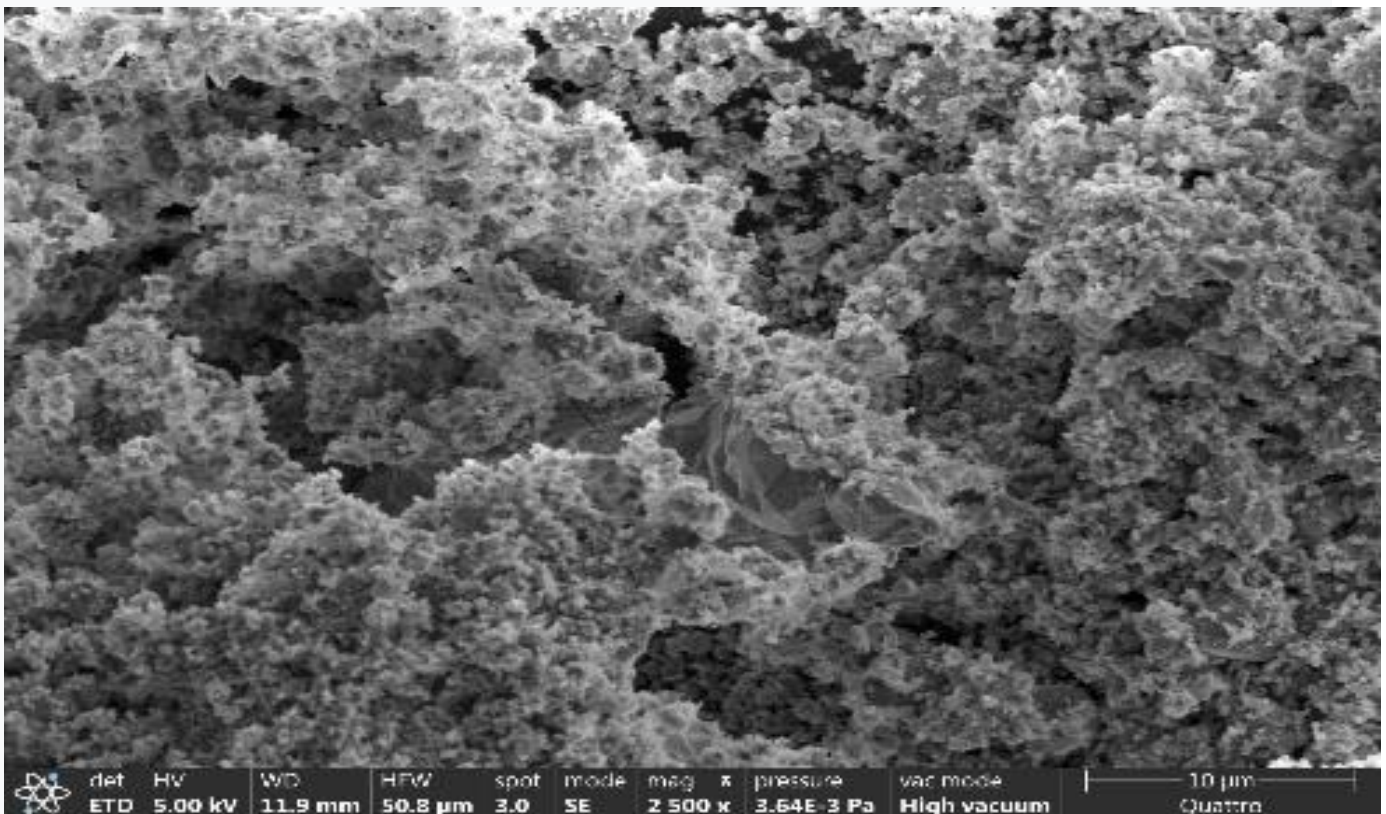
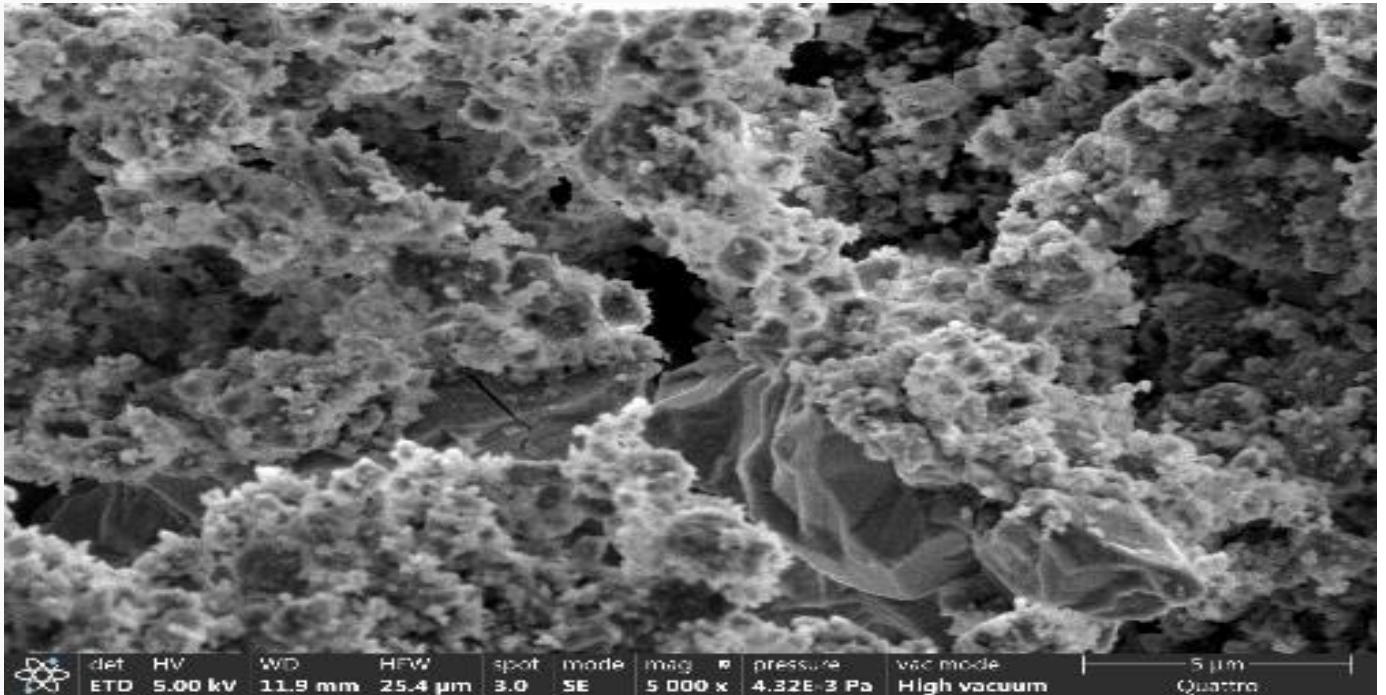
Figure 4.15 Analyse microscopique des BGP modifiés

Le but de cette analyse est d'observer la morphologie et la microstructure des différents bétons à petite échelle. Cette analyse a été réalisée sur des échantillons de béton témoin (BT), béton contenant de SDP (BSDP10), et bétons modifiés par les poudres (BP10PV100, BP10PM100, BP10PB100 et BP10PC100).

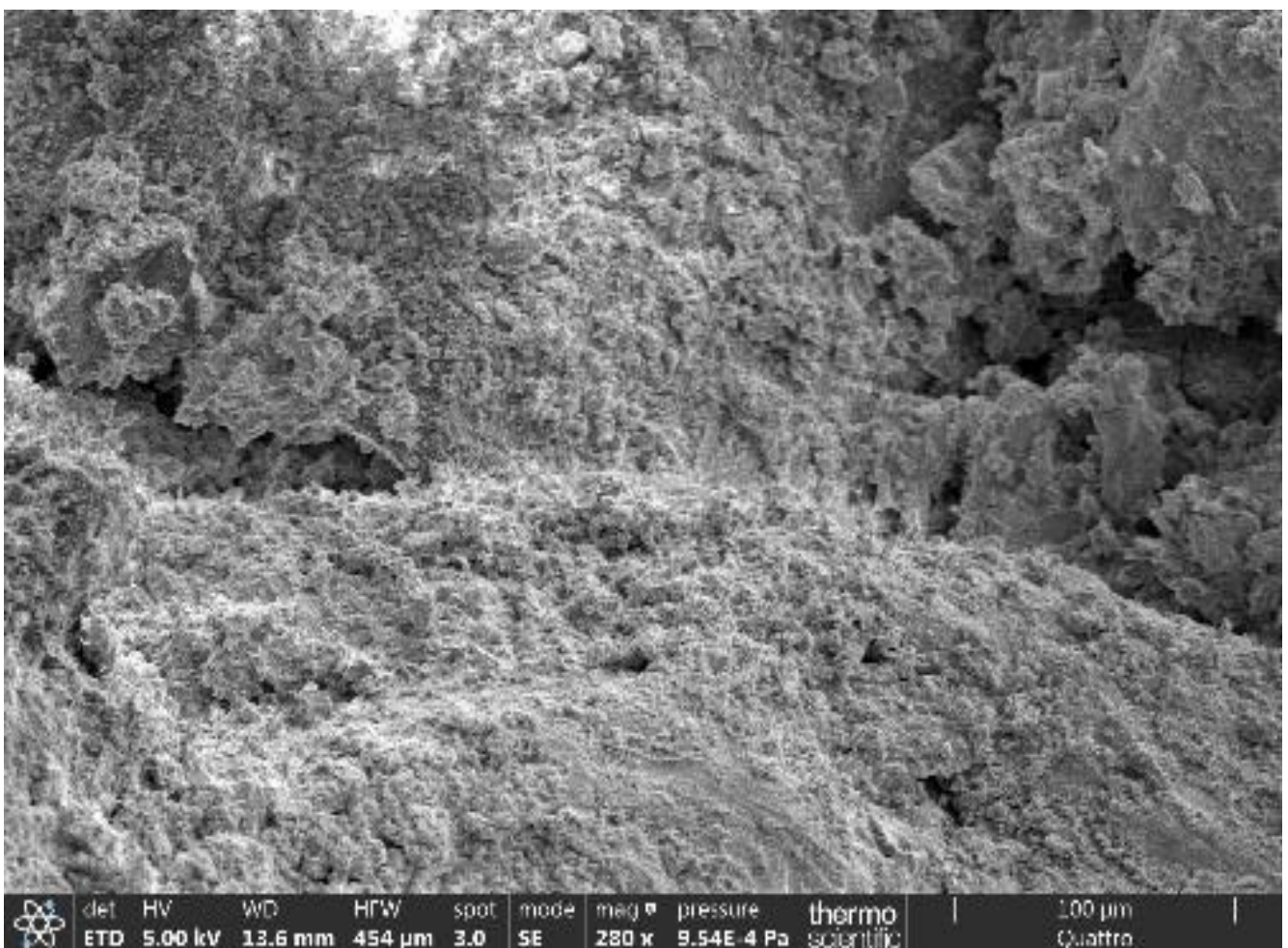
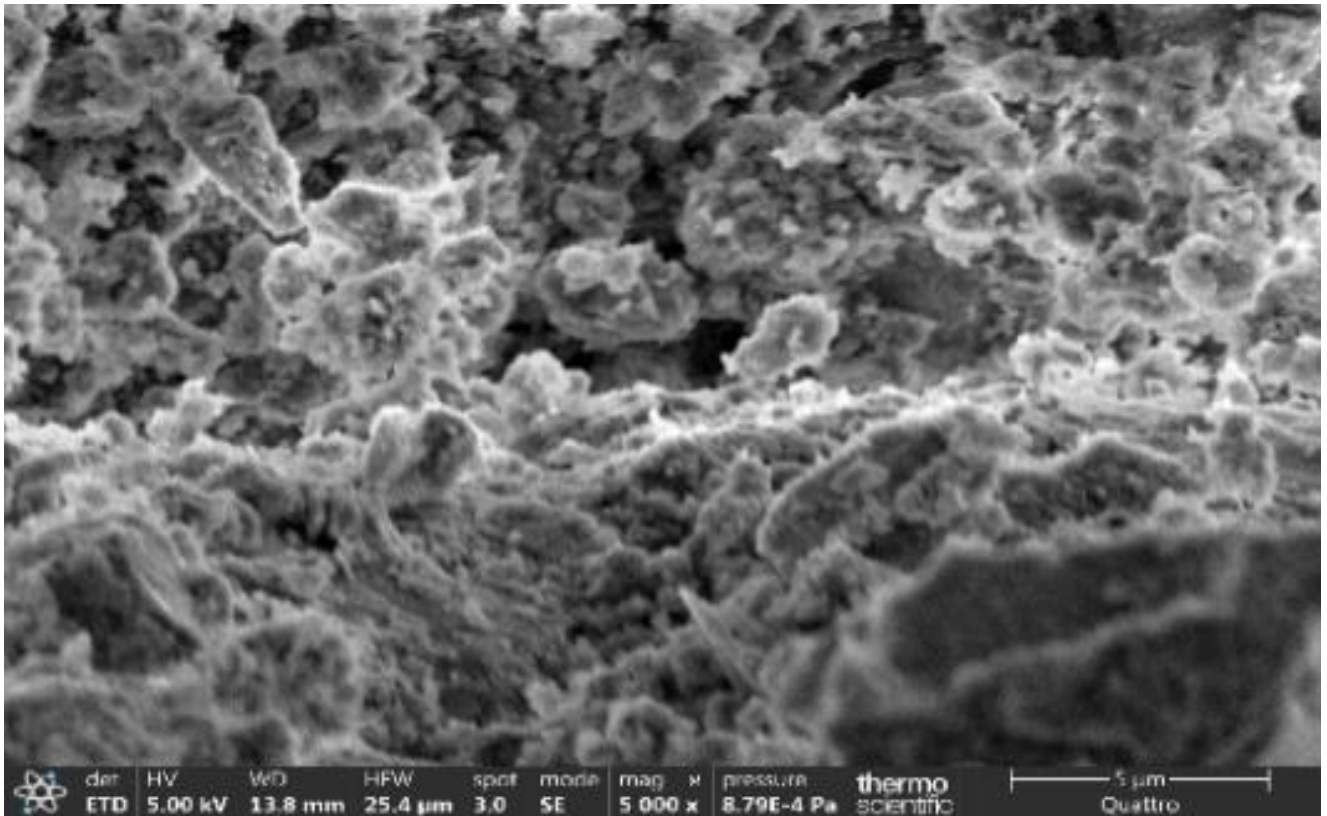
La figure 4.16 montre les images MEB des BGP analysés. Le BSDP10 présente une structure poreuse et non homogène. Une observation similaire de celle de (Abdelmonem et al. 2019 ; Zhou et al. 2025), tandis que les mélanges BP10PV100, BP10PM100, BP10PB100 et BP10PC100, présentent une

structure dense grâce à l'effet de remplissage des PV, PM, PB et PC ce qui améliore la compacité du BGP (Sum et al. 2021 ; Li et al. 2024 ; Moolchandani (2025). Aussi la réaction pouzzolanique peut contribuer à la densification des BGP (Wang et al. 2022 ; Ebrahimi et al. 2023 ; Muhedin and Ibrahim 2023 ; Benli 2024). Cette observation explique également l'amélioration des résistances mécaniques du béton contenant des poudres utilisées.

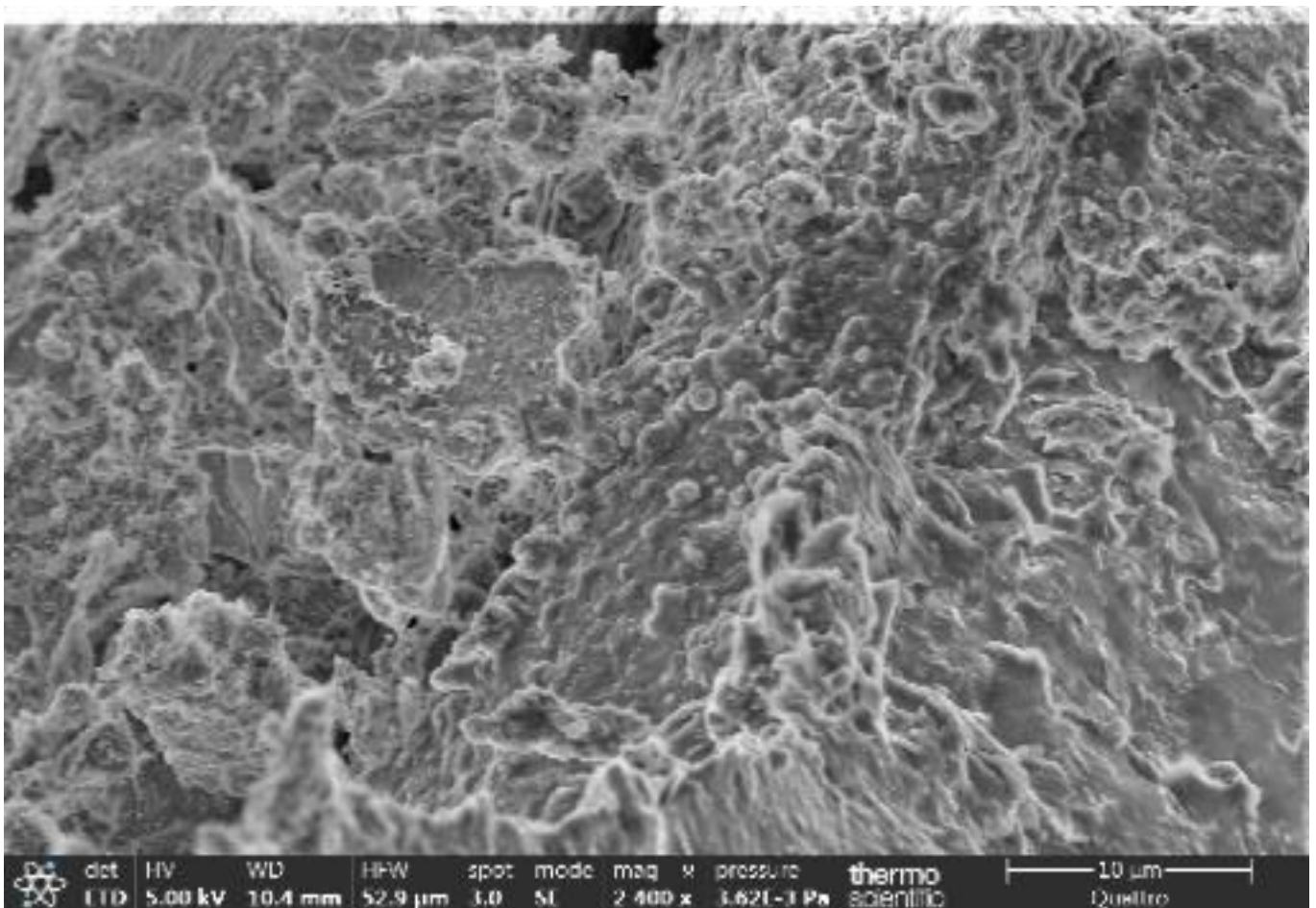
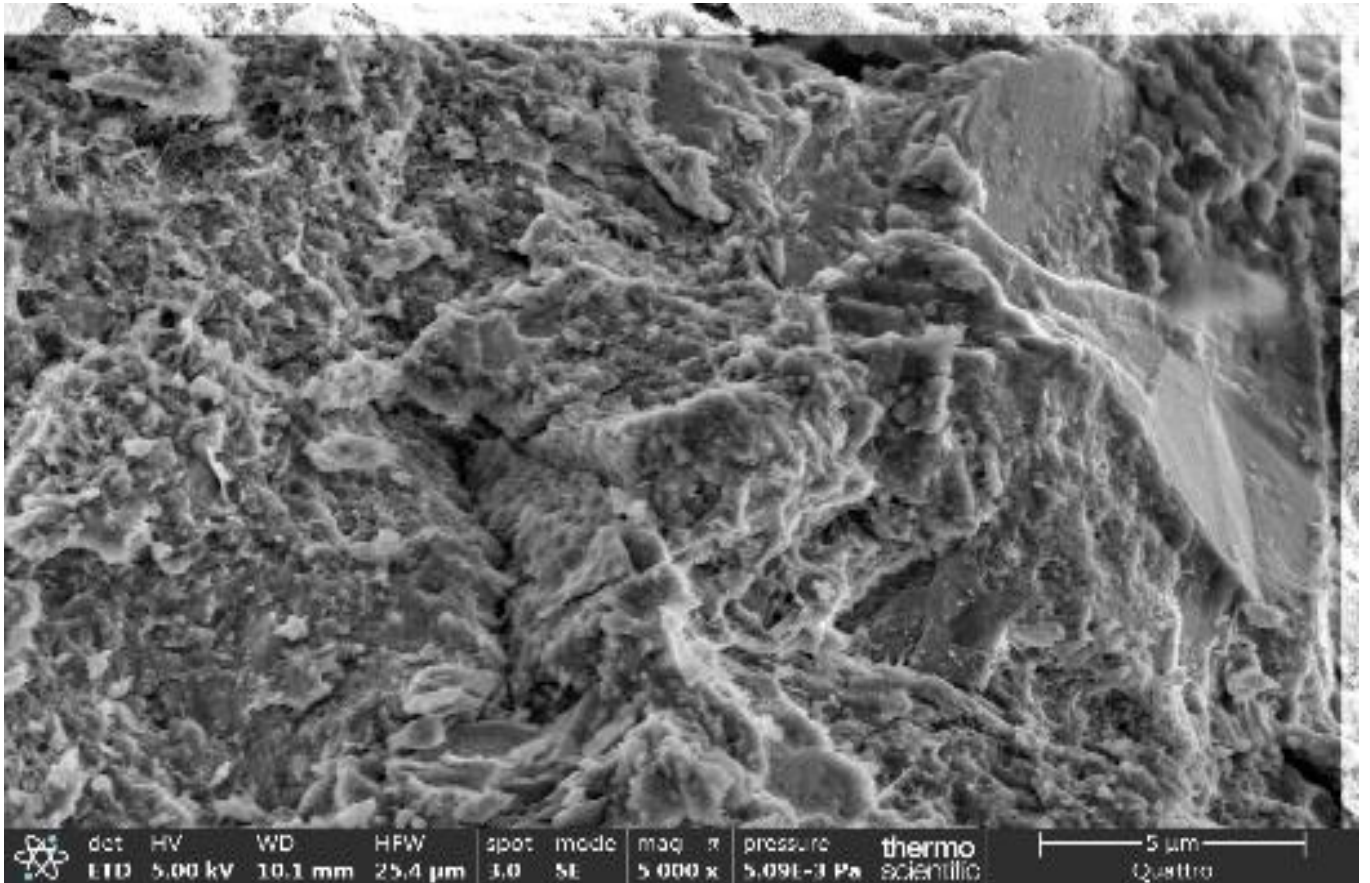
BT



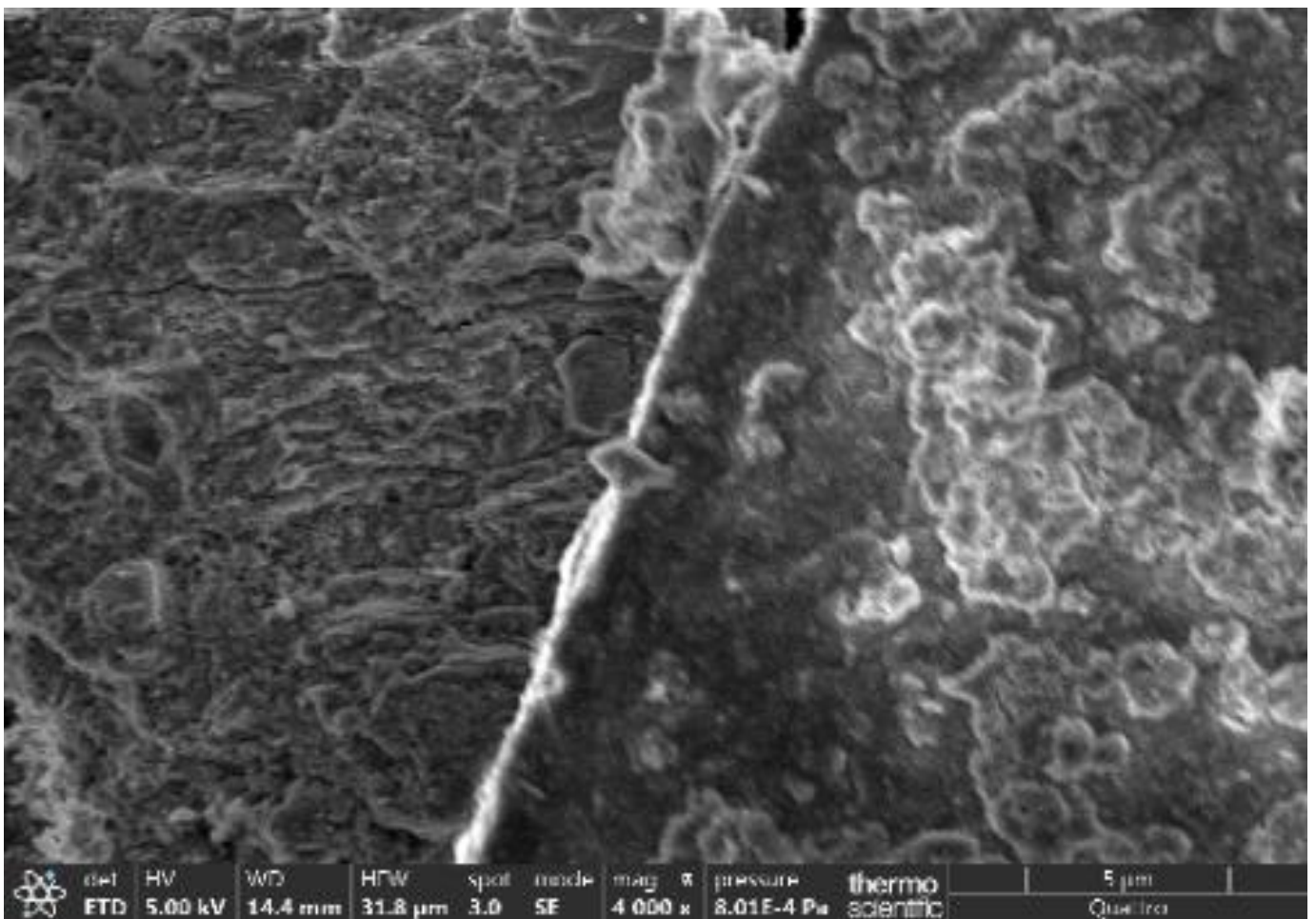
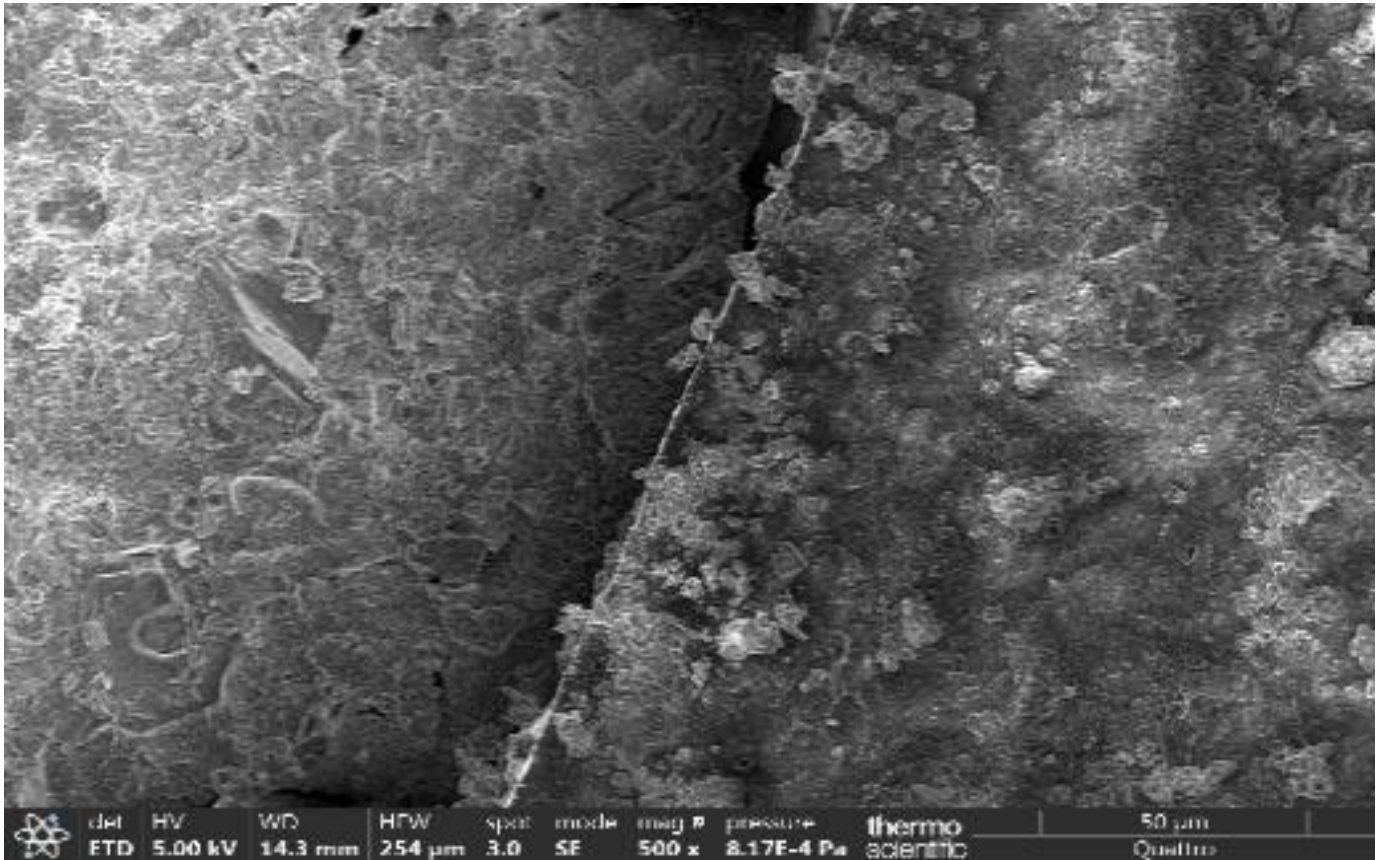
BSDP10



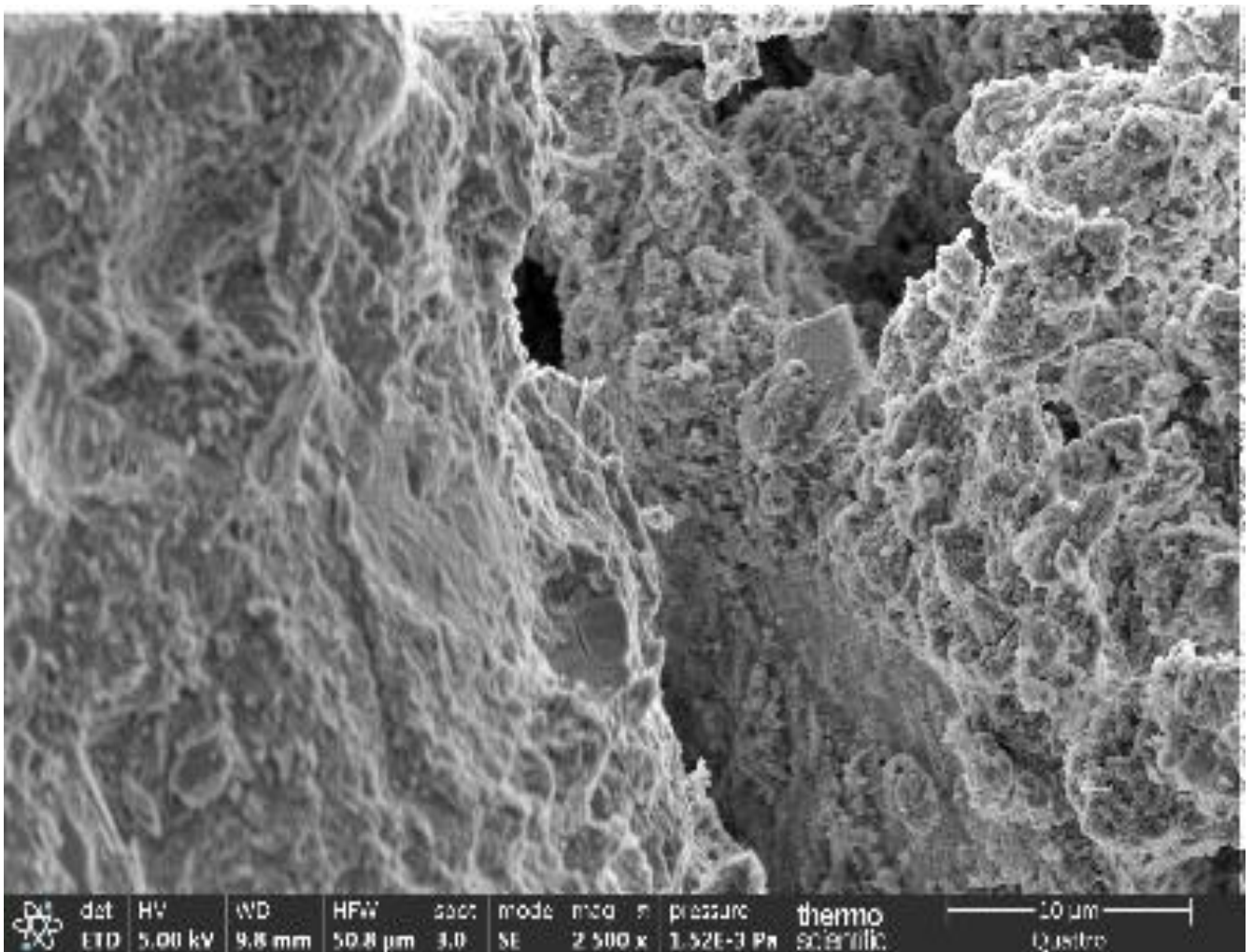
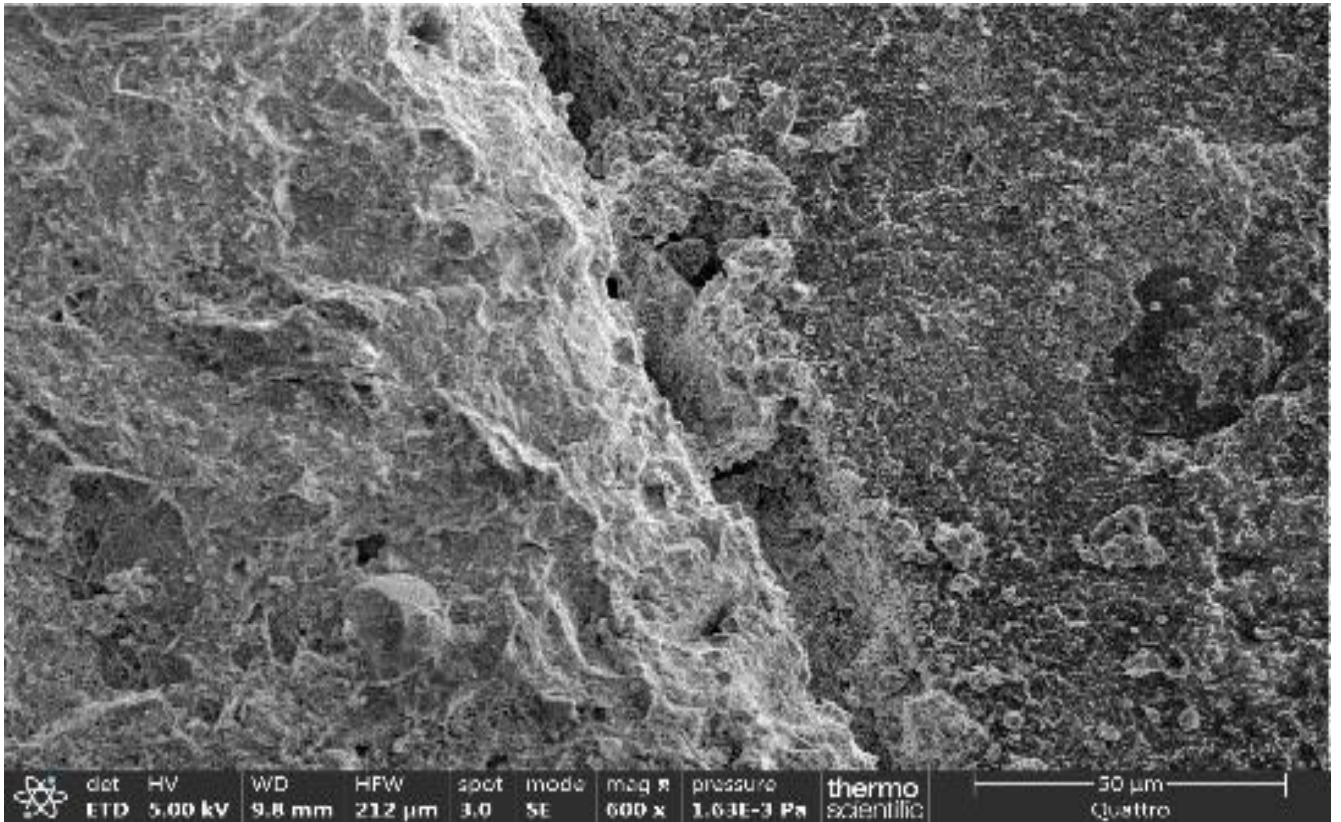
BP10PV100



P10PM100



BP10PB100



BP10PC100

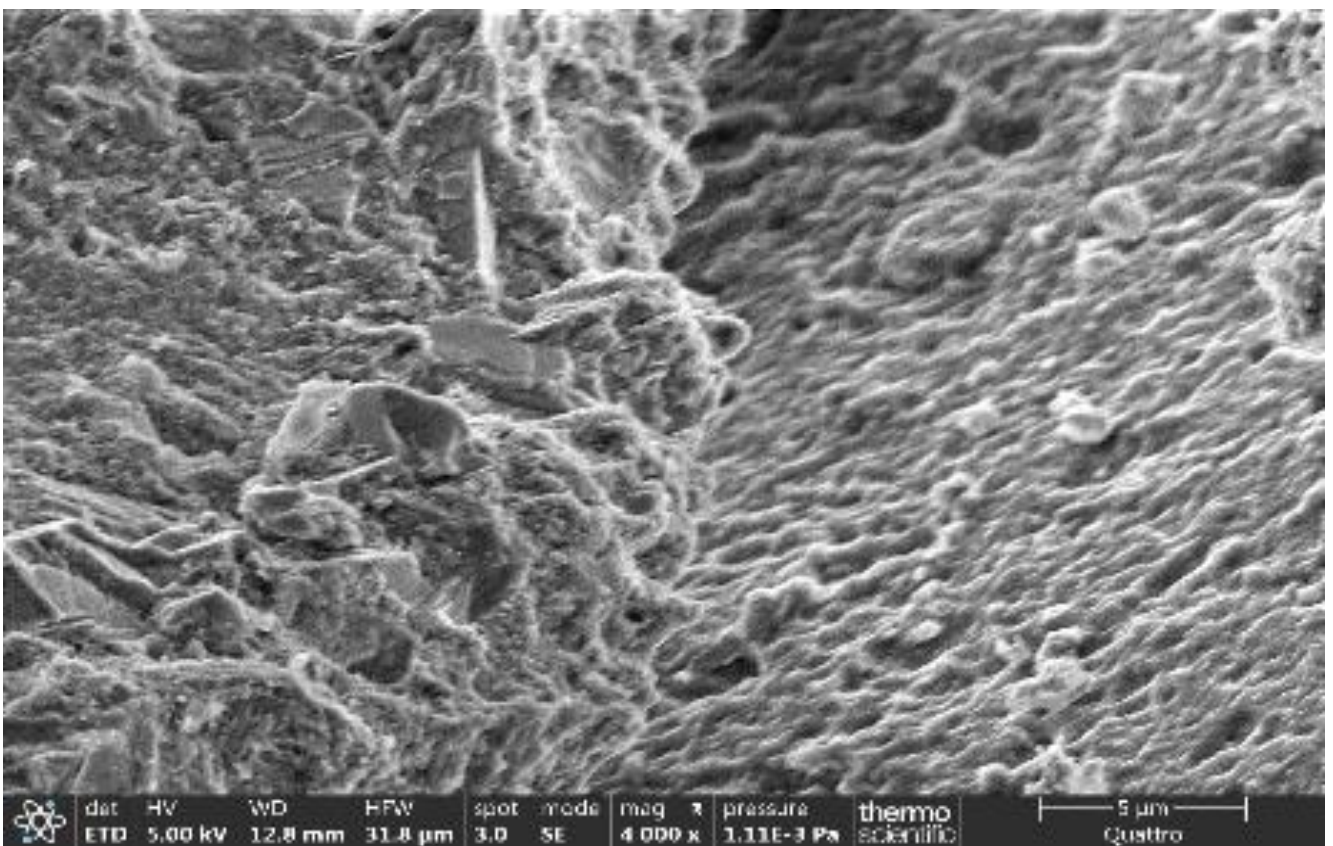
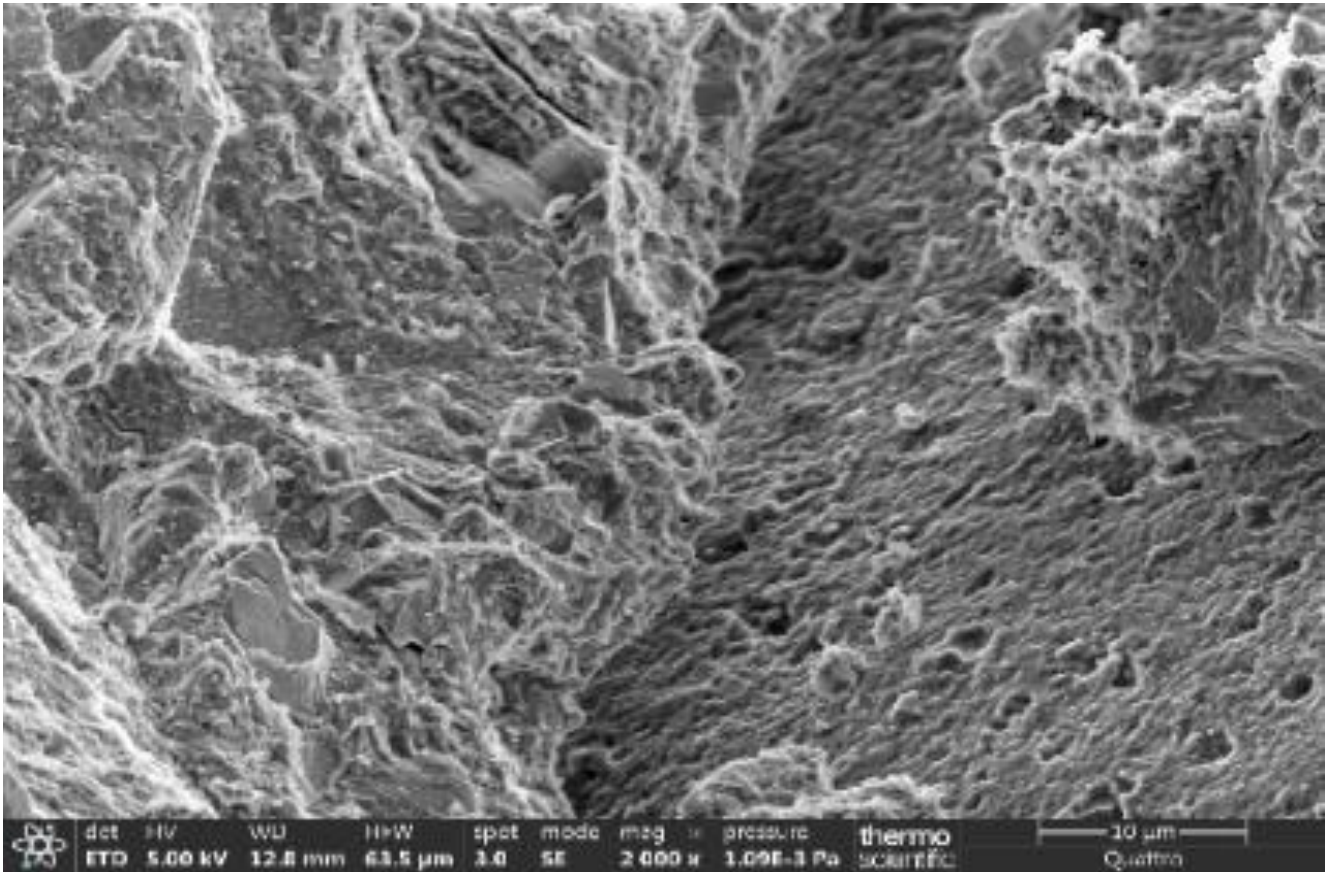


Figure 4.16 Microstructure des BGP modifiés.

4.3.2.7 Analyse thermogravimétrique (ATG) :

Une analyse thermogravimétrique a été réalisée par l'analyseur thermogravimétrique et calorimétrique de type ATG/SCD.



Figure 4.17 Analyse thermogravimétrique des BGP modifiés.

Les échantillons ont été préparés en broyant de minuscules morceaux et en les chauffant à une vitesse de 20 °C/min jusqu'à ce qu'ils atteignent 1200 °C dans une atmosphère dynamique d'azote. La figure 4.18 montre une diminution continue du poids de l'échantillon avec l'augmentation de la température.

On peut constater que la perte de masse des différents BGP augmente avec la température, avec une perte de masse symétrique entre BT et BSDP10 jusqu'à 800 °C. On observe que les courbes de BP10PV100, BP10PB100 et BP10PC100 présentent une perte de masse supérieure à celle des autres mélanges entre 400 et 800 °C, tandis qu'à une température d'environ 1000 °C, tous les mélanges présentent une perte de masse identique. Cette variation de perte de masse est due à la présence d'une réaction pouzzolanique dans RC CWP et BWP (Jerônimo et al. 2018 ; Dong et al., 2021 ; Tahwia et al. 2022).

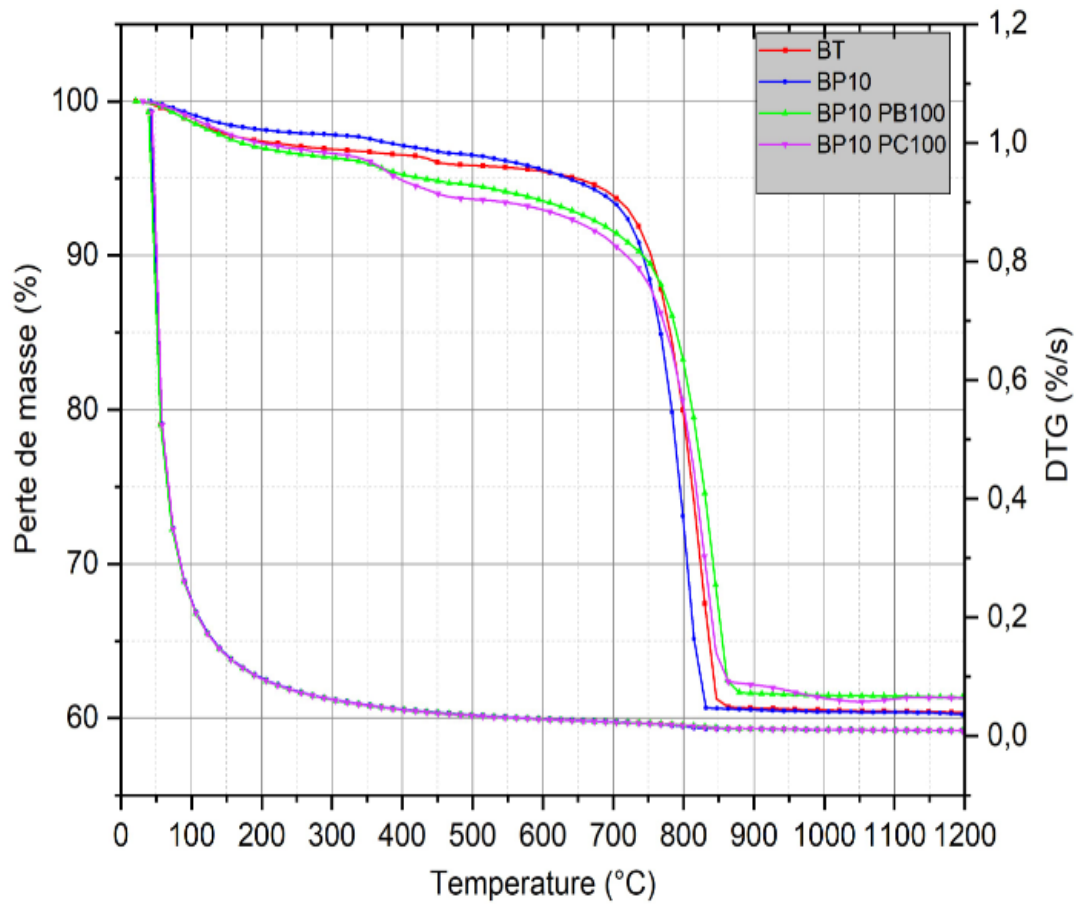
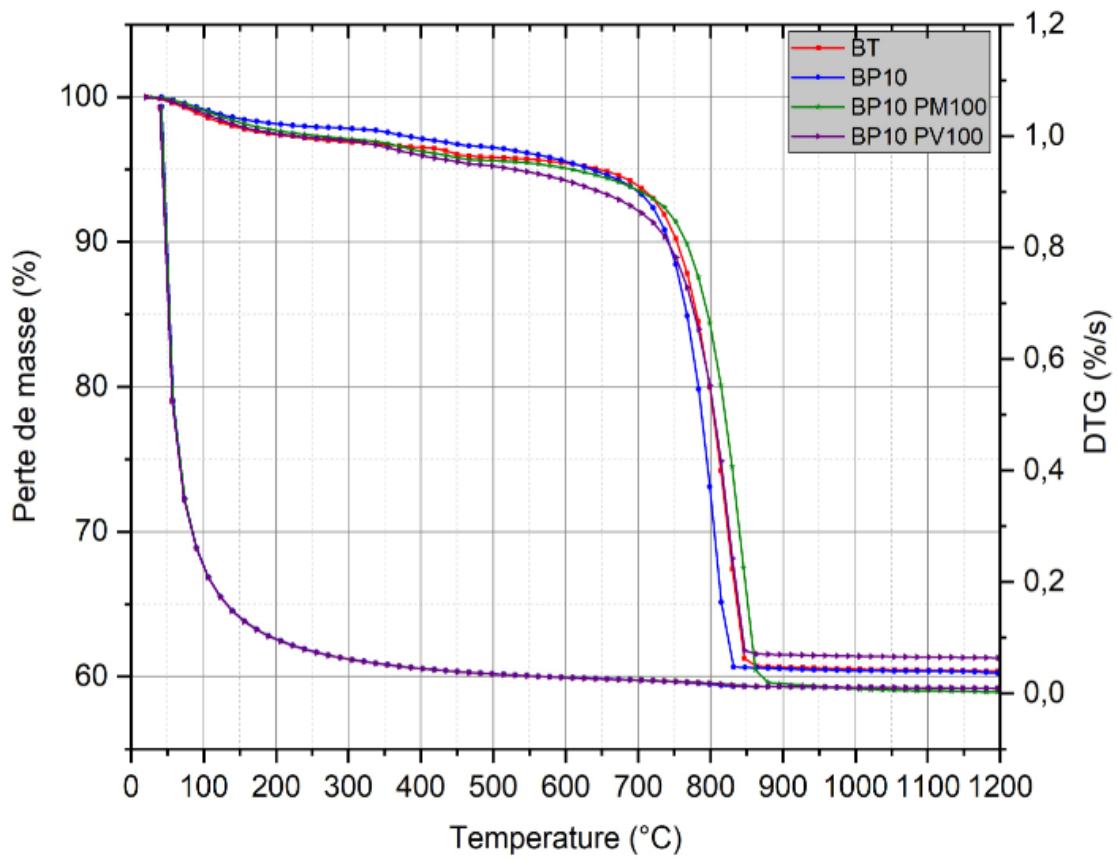


Figure 4.18 Courbes d'ATG des BGP modifiés.

4.4 Conclusion :

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais effectués sur les BP modifiés par l'ajout des poudres. L'objectif de cette étude était d'examiner l'effet d'ajout de quatre types de déchet sous forme de poudre sur les propriétés du béton contenant 5 et 10% de pneu recyclé en substitution de sable naturel. Une augmentation du dosage de liant de 350 à 400 et 450 kg/m³ par l'ajout de 50 et 100 kg/m³ de PV, PM, PB et PC ont été réalisées. Les résultats expérimentaux obtenus permettent de tirer les conclusions les suivants :

- L'ajout de 50 kg/m³ des différentes poudres au BGP présente une diminution de la maniabilité cette diminution augmente progressivement avec l'augmentation du dosage et le type de la poudre utilisé. Les forts taux de réduction ont été enregistré dans les BGP contenant 100 kg/m³ de PB avec un taux de 68.18%. Cependant les BGP contenant de PV montrent les plus faibles taux de réduction qui a atteint 9,09%.
- Un effet bénéfique est clairement observé dans la réduction de la teneur en air occlus des BGP modifiés par l'ajout de 50 kg/m³ de PV, PM, PB et PC avec des taux de réduction de 28.57, 25.0, 64.28 et 50.0% respectivement. Tandis que l'augmentation du dosage à 100kg/m³ entraine une augmentation de la teneur en air occlus.
- Les BGP contenant des poudres montrent des valeurs de densité à l'état frais et à l'état durci proche à celles des BGP sans poudres. Seulement le BGP5 et BGP10 modifiés par l'ajout de 100 kg/m³ de PC présentent une augmentation de 7.50 et 8.47% respectivement à l'état frais. Cette augmentation se réduit à 5.04 et 6.44% respectivement à l'état durci.
- Les BGP modifiés par l'ajout des poudres de PV, PM, PB et PC montrent une augmentation significative de la résistance à la compression atteignant jusqu'à 32.18, 41.47, 55.53 et 39.08% respectivement à 28 jours. L'amélioration de la résistance à la compression est accompagnée par l'amélioration de la résistance à la traction par flexion. Des taux d'augmentation de 20.88, 36.16%, 22.70 et 20.36% ont été enregistrés dans les BGP modifiés par la PV, PM, PB et PC respectivement.
- Les résultats des essais non destructifs montrent que l'ajout des poudres dans les BGP entraine une réduction de la vitesse d'impulsion ultrasonique. Malgré cela, tous les BP modifiés gardent une excellente qualité, Tandis qu'une augmentation des indices de rebondissement a été

enregistrée par l'ajout des poudres aux BGP. La meilleure amélioration a été affichée dans le BP10PB100 avec un taux d'augmentation de 46.38%.

- L'ajout des poudres diminue l'absorption d'eau par immersion avec un dosage optimale de 50kg/m³. Cet effet bénéfique est plus prononcé et atteint des taux de diminution de 32.98 et 31.95% lorsque la PB et PC sont utilisés respectivement. La diminution de l'absorption par immersion a été confirmée aussi par l'essai d'absorption par capillarité
- Après 180 jours d'immersion dans le H₂SO₄ et HCl, les BGP modifiés par l'ajout de PV, PB et PC montrent une réduction des taux de perte de la résistance à la compression, tandis que l'ajout de PM affecte négativement la résistance dans les milieux agressifs. Le plus faible taux de perte a été enregistré dans le cas de BP5PC50 (37.3 et 32.8% dans les solutions H₂SO₄ et HCl respectivement).
- L'étude microscopique a montré une densification de la matrice cimentaire des BGP contenant de PV, PM, PB et PC. Cette densification est attribuée à l'effet de remplissage et la réaction pouzzolanique que ces poudres jouent.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale et Perceptive

Le présent travail de recherche qui s'inscrit dans le contexte de développement durable vise à fabriquer un béton vert à base de GDP qui répond aux exigences structurales. En effet, Le facteur principal limitant l'utilisation des BGP correspond à leurs résistances mécaniques réduite. Pour pallier ce handicap ce travail a consisté à étudier la possibilité d'amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité des BGP à travers l'utilisation des déchets dont la littérature a démontré leurs effets bénéfiques sur les propriétés du béton tels que la PV, PM, PB et PC. Pour atteindre cet objectif, 50 et 100 kg de ces poudres ont été introduit dans la composition d'un BGP préalablement optimiser. Cette étude expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de GDP dans la composition de béton diminue la maniabilité de celui-ci quel que soit la forme de GDP utilisée. Cette diminution devient plus significative lorsque le taux de substitution dépasse 10%.
- Due à sa faible densité, L'ajout de GDP dans la composition du béton diminue la densité de celui-ci. Cette diminution est accompagnée par une augmentation des valeurs de la teneur en air occlus, due à la capacité élevée d'emprisonnement de l'air.
- L'incorporation de GDP dans la composition du béton réduit ces performances mécaniques. Cette réduction est plus prononcée lorsque le GDP est utilisée sous forme de poudre. Cette réduction qui due au manque d'adhérence entre les GDP et la matrice cimentaire qui contribue à la formation de vides et de microfissures entraîne une augmentation de l'aptitude de BGP à absorber de l'eau.
- L'ajout de GDP dans la composition a un effet bénéfique sur la résistance de celui-ci contre les attaques chimiques. Une amélioration maximale de 40.8 à 26.2 et de 42,8 à 12.0 dans HCl et H₂SO₄ été enregistrée dans le cas du béton contenant 20 de GDP sous forme de PDP et SDP respectivement.
- L'ajout des poudres réduit la maniabilité des BGP modifiés. Cette réduction est progressive avec l'augmentation du dosage des poudres. Le taux de réduction est plus faible dans les BP modifiés par la PV est plus prononcé dans BP modifié par la PB. Cette diminution de la maniabilité est accompagnée par réduction de la teneur en air occlus notamment avec 50 kg de poudre.
- L'ajout de de PV, PM, PB et PC conduit à une amélioration considérable de les résistance mécaniques des BGP qui peut atteindre 32.18, 41.67, 39.08 et 55.53% dans le cas de la résistance à la compression et 20.88, 36.16, 22.70 et 20.36% dans le cas de la résistance à la flexion. Cette

Conclusion générale et Perceptive

amélioration qui dépend du type et de dosage des poudres utilisées est attribué à l'amélioration de la compacité des BGP en présence des poudres.

- L'ajout de PV, PM, PB et PC réduit l'aptitude des BGP à absorber de l'eau par immersion et par capillarité. Cette réduction qui atteint de 34.63 avec l'ajout de 50 kg de PB ce qui confirme l'amélioration de la densification de la microstructure sous l'effet de remplissage des poudres.
- Une diminution des taux de perte de la résistance à la compression des BGP modifiés par l'ajout de PV, PB et PC a été enregistrée dans les milieux agressifs de HCl et H₂SO₄. Cependant l'ajout de PM augmente significativement cette perte.

Comparaison entre le HCl et H₂SO₄, L'amélioration maximale a été enregistré dans le BP5PC50 avec des taux de réduction de 17.58 et 21.14% conserver en HCl et H₂SO₄ respectivement.

- L'analyse microscopique des BGP formulé a validé l'effet bénéfique de l'incorporation de PV, PM, PB et PC sur la qualité du béton qui s'est traduit par une réduction de la porosité et une amélioration de l'homogénéité des BGP.

En résumé, les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité d'ajout de PV, PM, PB et PC pour l'amélioration des propriétés mécaniques et la durabilité des BGP. La formulation d'un béton à base de GDP incorporant ces poudres conduit aussi à minimiser les vastes quantités des différents déchets disponible dans la nature et à Minimiser l'épuisement des ressources naturelles. Les résultats encouragent obtenus ouvrent la voie à ces déchets pour être valoriser dans le domaine de fabrication du béton

La recherche effectuée dans le cadre de cette thèse se sont concentrées sur l'investigation des propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et de durabilité des BGP à base de déchets industriels et des matériaux locaux. Cependant, d'autres aspects demeurent encore à approfondir. Pour cela, nous suggérons, pour des travaux futurs, les points suivants :

- Etude de l'effet des déchets industriel sur les déformations différées et les propriétés thermiques et acoustiques des BGP.
- Etude de l'effet de la température sur le comportement des BGP à base de déchets industriels.
- Évaluation économique et environnemental de l'ajout de déchets industriels dans la composition des BGP.

Références bibliographiques

- Abendeh R, Rabayah H, Hunaiti Y (2016) Experimental studies on the behavior of concrete-filled steel tubes incorporating crumb rubber. *Journal of Constructional Steel Research*. V 122.P 251-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.022>
- Abdalla T, Shitote SM, Matallah M, Koteng D (2024) Effect on Sulfuric Acid Resistance and Shrinkage of Concrete Incorporating Processed Bagasse Ash and Silica Fume. *Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2024/5534536>
- Abdelaleem A, Moawad M, El-Emam H, Salim H, Sallam H (2024) Long term behavior of rubberized concrete under static and dynamic loads. *Case Studies in Construction Materials*. V 20. e03087. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03087>
- Abdelmonem A, El-Feky MS, El-Sayed Nasr AR, Kohai M (2019) Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and building materials*. V227.116660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>
- Abdullah D.I, Abbas Z, Abed S (2022) Some Properties of Concrete Containing Waste Brick As Partial Replacement Of Coarse Aggregate And Addition Of Nano Brick Powder. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. V 961.1. 012093. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012093>
- Abdullah S, Zainal Abidin W, Shahidan S (2016) Strength of Concrete Containing Rubber Particle as Partial Cement Replacement. *The 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering for Sustainability (IConCEES 2015)*. V 47. 01009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164701009>
- Advincula P, Luong D.X, Chen W, Raghuraman S, Shahsavari R, Tour J.M (2021) Flash graphene from rubber waste. *Journal Carbon* .V 178. P 649-656. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.03.020>
- Afshinnia K, Rangaraj P (2016) Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*. V 117.P 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072>
- Ahmed Khan F, Fahad M, Shahzada K, ALam H, Ali N (2015) Utilization of waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*. V .4.
- Ahmad J, Sabri M, Majdi A, Alattyih W, Khan I, Alam M (2025) Durability and microstructure aspects of sustainable concrete made with ceramic waste: a review. *Structural Materials*.V 11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1508989>
- Ahmed Kabeer K, Vyas A (2018) Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*. V 165.P 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>
- Ahmed J, Zhou Z, Majdi A, Alqurashi M, Deifalla A (2022) Overview of Concrete Performance Made with Waste Rubber Tires: A Step toward Sustainable Concrete. *Materials*. V 15-16. 5518. <https://doi.org/10.3390/ma15165518>

- Akinyele J.O, Salim R.W, Kupolati W.K (2016) Effect of rubber crumb on the microstructural properties of concrete. African Journal of Science, Technology, Innovation & Development.V8. P 467-474. <https://doi.org/10.1080/20421338.2016.1224611>
- Al-Akhras N, Smadi M (2004) Properties of tire rubber ash mortar. Cement and Concrete Composites. V 26.7.P 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.004>
- Alamri M, Khawaji M (2024) Utilizing Edge-Oxidized Graphene Oxide to Enhance Cement Mortar's Properties Containing Crumb Rubber: Toward Achieving Sustainable Materials. Polymers. V 16.14.2082. <https://doi.org/10.3390/polym16142082>
- Ali E, Al-Tersaw S (2012) Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self - compacting concrete. Construction and Building Materials.V 35.P 785-791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- Aliabdo A, Abd Elmoaty A, Aboshama A (2016) Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials.V 124.P 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>
- Aliabdo A, Abd Elmoaty A, Auda E (2014) Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials. V.50.P. 28-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>
- Al Rawahi Z, Waris M.B (2017) Use of recycled tires in non-structural concrete. International Conference on Advances in Sustainable Construction Materials & Civil Engineering Systems (ASCMCES-17). 120.03002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712003002>
- Alves A.V, Vieira T.F, De Brito J, Correia J.R (2014) Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates, Construction and Building Materials. V 64. P 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.037>
- AL-Zubaid A, Shabeeb K, Ali A (2017) Study The Effect of Recycled Glass on the Mechanical Properties of Green Concrete. Energy Procedia. V 119.P 680-692. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.095>
- Angelin A, Cecche Lintz R, Gachet-Barbosa L, Osório W (2017) the effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. Construction and Building Materials. V 151.P 534-545. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.061>
- Arel H (2016) Recyclability of waste marble in concrete production. Journal of Cleaner Production. V 131.P 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.052>
- Arenas-Piedrahita JC, Arenas-Piedrahita P, Mendoza-Rangel JM, López Calvo HZ, Valdez-Tamez PL, Martínez-Reyes J (2016) Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. Construction and Building Materials. V 105. P 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>

- Arif E, Clark M, Lake N (2016) Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. *Construction and Building Materials*. V 128. P 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>
- Arif E, Clark M, Lake N (2017) Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. *Construction and Building Materials*. V151. P 692-703. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136>
- Arif U, Ikbal Tutar A, Shams M, Cakir F (2024) Impact of iron powder and blast furnace slag on the mechanical properties of polymer concrete: An experimental and hyperparameter-tuned ANN-based study. *Challenge journal of structural mechanics*. V 10.4. P 149-158. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2024.04.003>
- Arif R, Khatib A, Kırgız M, Khan R.B, Tayyab S, Khan R, Anwar W, Arshad M (2021) Experimental analysis on partial replacement of cement with brick powder in concrete. *Case Studies in Construction Materials*. V.15. e00749. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00749>
- Ashish D.K (2018) Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*. V 15.P 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.024>
- Assaggaf R, Al-Dulaijan S, Maslehuddin M, Al-Amoudi O, Ahmad S, Ibrahim M (2022) Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete. *Construction and building materials*.318. 126030. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126030>
- Assaggaf R.A, Ali M.R, Al-Dulaijan S.U, Maslehuddin M (2021) Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review. *Journal of Materials Research and Technology*. V 11.P 1753-1798. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019>
- Attaelmanan M, Kamba M (2021) Study the Effect of Using Ceramic Waste Powder as Partial Replacement for Cement on Concrete Properties. *Journal of Karary University for Engineering and Science*. <http://dx.doi.org/10.54388/jkues.v1i1.125>
- Ay N, Ünal M (2000) The use of waste ceramic tile in cement production. *Cement and Concrete Research*. V 30.3.P 497-499. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00202-7)
- Aydin E, Are H (2019) High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability. *Journal of Cleaner Production*. V 237. 117801. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117801>
- Azunna S, Abdul Aziz F, Rashid R, Bakar N (2024) Review on the characteristic properties of crumb rubber concrete. *Cleaner materials*. V12. 100237. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100237>
- Bagaria A, Juneja D (2023) Experimental research on influence of marble powder, silica fume and polypropylene fiber on the porous concrete. *Materials today proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.240>

Références bibliographiques

- Baikerikar A, Mudalgi S, Ram V (2023) Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete. *Construction and Building Materials*. V 377. 131078. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131078>
- Bedici O, Bedici A, Ashour A (2024) Utilization of Recycled Brick Powder as Supplementary Cementitious Materials-A Comprehensive Review. *Materials*. V 17.3. 637. <https://doi.org/10.3390/ma17030637>
- Belkadi A, Kessal O, Berkouche A, Noui A, Daguiani S, Dridi M, Benaniba S, Tayebi T (2024) 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*. V 64. 103710. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103710>
- Belouadah M, Rahmouni Z, Tebbal N (2019) Experimental characterization of ordinary concretes obtained by adding construction waste (glass, marble). *Procedia computer science*. V 158.P 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.038>
- Benazzouk A, Douzane O, Mezreb K, Laidoudi B, Quéneudec M (2008) Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*. V 22.4.P 573-579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.011>
- Benli A (2024) Sustainable use of waste glass sand and waste glass powder in alkali-activated slag foam concretes: Physico-mechanical, thermal insulation and durability characteristics. *Construction and Building Materials*. V 438. 137128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137128>
- Bensaci H, Menadi B, Kenai S (2019) Comparison of some Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete Composites Containing Rubber and Steel Fibers Recovered from Waste Tires. *Nano Hybrids and Composites*. V 24.P 8-13. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/NHC.24.8>
- Bentlemsan N, Yahiaoui W, Kenai S (2023) Strength and durability of self-compacting mortar with waste marble as sand substitution. *Case Studies in Construction Materials*. V 19. e02331. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02331>
- Bhogilal V, Jayantilal M (2018) Pertinence of Ceramic Waste in Self Compacted Concrete as Partial Equivalent of Cement. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. V 5.1.
- Bideci O, Saka R, Bideci A (2017) Physical Characteristics of Rubberized Concrete Including Granulated Waste Tire Aggregate. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.368985>
- Binici H, Shah T, Aksogan O, Kaplan H (2008) Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*. V 208.1-3.P 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.120>

Références bibliographiques

Boukhelkhal A, Azzouz L, Benabed B, Belaïdi A (2017) Strength and durability of low-impact environmental self-compacting concrete incorporating waste marble powder. *Journal of Building Materials and Structures*. V 4. P 31-41. DOI: 10.5281/zenodo.1134146

Bouleghebar Y, Bentchikou M, Boukendakdji O, El-Hadj K, Debieb F, Maisarah A (2023) The effect of brick and glass powder on the mechanical and porosity of self-compacting mortar. *Journal of Applied Engineering Sciences*. V 13. https://doi.org/10.2478/jaes-2023-0006?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate

Bourzik O, Akkouri N, Baba K, Nounah A (2022) Study of the effect of wood waste powder on the properties of concrete. *Materials today proceedings*. V58.4. P1459-1463. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.518>

Bravo M, Brito J (2011) Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*. V 25.P 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.066>

Bu C, Zhu D, Lu X, Liu L, Sun Y, Yu L, Xiao T, Zhang W (2022) Modification of Rubberized Concrete: A Review. *Buildings*. V 12(7), 999. <https://doi.org/10.3390/buildings12070999>

Bui P Dao X, Pham P, Phuong T, Luu X (2022) Effect of marble powder content on compressive strength and water absorption of high-strength concrete. *Journal of Engineering and Technology* (2615-9872).

Bulut H.A, kandil U (2024) Mechanical properties of cement-based composites incorporating eco-friendly aggregate of waste rubber. *Journal of Construction*. V 23. <https://doi.org/10.7764/RDLC.23.2.246>

Chand G, Ram S, Kumar S, Gupta U (2021) Microstructural and engineering properties investigation of sustainable hybrid concrete produced from industrial wastes. *Cleaner Engineering and Technology*.V.2. 100052. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100052>

Chauhan M and Sood H (2017) Rubber Modified Concrete- A Green Approach for Sustainable Infrastructural Development. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. V 4.6. P 2395-0072.

Chen B, Guo L, Sun W (2014) Fatigue Performance and Multiscale Mechanisms of Concrete Toughened by Polymers and Waste Rubber. *Advances in Materials Science and Engineering*. V 2014. 84207. <https://doi.org/10.1155/2014/684207>

Chen P, Wang C, Fang Y, Li J, Xu Y, Gu Z, Wang J (2023) Bio-inspired functionalization of crumb rubber using polydopamine to enhance the performance of rubberized mortars. *Construction and building materials*. V 407.133550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133550>

Chen X, Zhang D, Cheng S, Xu X, Zhao C, Wang X, Wu Q, Bai X (2022) Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties, durability and microstructure assessment. *Journal of Building Engineering*. V 52. 104418. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104418>

- Copetti C, Borges P, Squiavon J, Silva S, Andrade J (2020) Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and silica fume on physical-mechanical behavior and microstructural properties of concrete. *Journal of Cleaner Production*. V 256. 120670. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120670>
- Corinaldesi V, Donnini J (2019) Waste rubber aggregates. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. P 87-119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00004-X>
- Costa J, Pinelo C, Rodoiguez A (1991) Characterization of the Estremoz, Borba and Vila Viçosa region marble quarrying dump ins NPR/GERO, Natl. Lab. Civil. Engineering. Lisbon Port. 246.
- Dang J, Zhao J (2019) Influence of waste clay bricks as fine aggregate on the mechanical and microstructural properties of concrete. *Construction and Building Materials*. V 228. 116757. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116757>
- Dang U, Zhao J, Dai Pang S, Zhao S (2020) Durability and microstructural properties of concrete with recycled brick as fine aggregates. . *Construction and building materials*. V 262. 120032. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120032>
- Daniel R.J, Sangeetha S.P (2023) Experimental Study of the Effect of Ceramic Waste Powder on the Mechanical and Structural Properties of Concrete: A Sustainable Approach. *International Journal of Civil Engineering*. V 10.10. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V10I10P102>
- Dezhampanah S, Nikbin I, Charkhtab S, Fakhimi F, Bazkiaei S, Mohebbi R (2020) Environmental performance and durability of concrete incorporating waste tire rubber and steel fiber subjected to acid attack. *Journal of Cleaner Production*. V 268. 122216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122216>
- Dobrotă D, Dobrotă G, Dobrescu T (2020) Improvement of waste tyre recycling technology based on a new tyre markings. *Journal of Cleaner Production*. V 260.121141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121141>
- Dong Q, Huang B, Shu X (2013) Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent. *Construction and building materials*. V 48.P 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.072>
- Du H, Tan K (2013) Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali–silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*.V35.1. P 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.029>
- Ebrahimi A, Ahmad E, Dulawat Sh, Nuhu Garko M, Ubayi S, Ibrahim M (2023) A Review on the Impact of Rice Husk Ash and Marble Waste Powder on Concrete Properties. *International Journal of Mechanical and Civil Engineering*. V 7.1.P 145-159. <https://doi.org/10.52589/IJMCE-DK2IHEJF>
- Elbially S, Ibrahim W, Mahmoud S, Ayash N, Mamdouh H (2024) Mechanical characteristics and structural performance of rubberized concrete: Experimental and analytical analysis. *Case Studies in Construction Materials*.V 21. e03727. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03727>

- Elchalakani M, Karrech A, Dong M, Santos N, Yang B (2018) Experiments and Finite Element Analysis of GFRP Reinforced Geopolymer Concrete Rectangular Columns Subjected to Concentric and Eccentric Axial Loading. *Structures*. V 14. P 273-289. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.04.001>
- El-Dieb A, Reda Taha M, Kanaan D, Sama T (2018) Ceramic waste powder: from landfill to sustainable concretes. *Construction Materials*. V 171.3.P 109- 116. <https://doi.org/10.1680/jcoma.17.00019>
- El Saffar D, Tawfik T, Tayeh B (2022) Stability of glassy concrete under elevated temperatures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.V26.8. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1783368>
- EL Sodani KH (2022) Mix design, mechanical properties and durability of the rubberized geopolymer concrete: A review. *Case Studies in Construction Materials*.V 17. e01480. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01480>
- EL Sodani KH, Adewumi A, Mohd Ariffin M, Salami B, Yusuf M, Ibrahim M, AlAteah A, Al-Tholaia M, Shamsah S, Ismail M (2022) Acid Resistance of Alkali-Activated Natural Pozzolan and Limestone Powder Mortar. *Sustainability*. V 14.21). 14451. <https://doi.org/10.3390/su142114451>
- Esmaeili J, AL-Mwanes A (2021) A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement. *Materials today proceedings*. V 42.5. P 1958-1965. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>
- Essam A, Mostafa S, Khan M, Tahwia A (2023) Modified particle packing approach for optimizing waste marble powder as a cement substitute in high-performance concrete. *Construction and Building Materials*.V 409. 133845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133845>
- Fadiel A, Al Rifaie F, Abu-Lebdeh T, Fini E (2014) Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement- based. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. V 7.1. P 1-11, 2014. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2014.1.11>
- Farhan A, Dawson A, Thom N (2015) Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis. *Construction and building materials*. V 105.P 94-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.018>
- Fawzy H, Mustafa S, Abd El Badie A (2020) Effect of Elevated Temperature on Concrete Containing Waste Tires Rubber. *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*. V 29.P 1–13. <http://www.eijest.zu.edu.eg/>
- Formela K (2024) Strategies for compatibilization of polymer/waste tire rubber systems prepared via melt-blending. *Advanced industrial and engineering polymer research*. V7.4. P 466-481. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.08.001>
- Fort J, Vejmelkova E, Konakova D, Alblova N, Cachova M, Keppert M, Rovnaníková P, Cerný R (2018) Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: functional and environmental aspects *Journal of Cleaner Production*. 194. P 714-725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.181>

Fraile-Garcia E, Ferreiro-Cabello J, Defez B, Peris-Fajanes G (2016) Acoustic Behavior of Hollow Blocks and Bricks Made of Concrete Doped with Waste-Tire Rubber. *Materials* V 9.12. 962. <https://doi.org/10.3390/ma9120962>

Fu S, Lee J (2024) Recycling of ceramic tile waste into construction materials. *Developments in the Built Environment*. V18. 100431. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100431>

Gautam L, Kumar Jain J, Jain A, Kalla P (2022) Valorization of bone-china ceramic powder waste along with granite waste in self-compacting concrete. *Construction and building materials*. V 315. 125730. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125730>

Gerges N, Issa C, Fawaz S (2018) Rubber Concrete: Mechanical and Dynamical Properties. *Case Studies in Construction Materials*. Réf CSCM 184. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00184>

Ge Z, Wang Y, Sun R, Wu X, Guan Y (2015) Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. *Construction and Building Materials*.V 98. P 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100>

Gesoğlu M, Güneyisi E, Khoshnaw G, Ipek S (2014) Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*. V63. 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>

Ghonaim S, Morsy A (2023) Utilization of Ceramic Waste Material as Cement Substitution in Concrete. *Buildings*. V 13.8. 2067. <https://doi.org/10.3390/buildings13082067>

Gisbert A, Borrell J, García F, Sanchis E, Amorós E, Alcaraz J, Vicente F (2014) Analysis behaviour of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar. *Construction and building materials*. V 50.P 671-682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.018>

Gonçalves T, Silva R, Brito J, Fernández-Rodríguez J, Esquinas A (2020) Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement. *Cement and Concrete Composites*. V 105. 103420. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103420>

Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M (2014) Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials*.V 68.P 618-626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016>

Grellier A, Bulteel D, Bouarroudj M, Rémond S, Zhao Z, Courard L (2021) Alternative hydraulic binder development based on brick fines: Influence of particle size and substitution rate. *Journal of Building Engineering*. V 39. 102263. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102263>

Gupta T, Chaudhary S, Sharma R (2014) Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*.V 73.P 562-574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>

Références bibliographiques

- Gupta T, Chaudhary S, Sharma R (2016) Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production*. V112.1. P 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.081>
- Gupta T, Sharma R, Chaudhary S (2015) Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *International Journal of Impact Engineering*. V83.P 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.05.002>
- Gupta T, Siddique S, Sharma R, Chaudhary S (2019) Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment. *Construction and building materials*. V 217.P 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.080>
- Haido J, Zainalabdeen M, Tayeh B (2021) Experimental and numerical studies on flexural behavior of high strength concrete beams containing waste glass. *Advances in concrete construction*. V 97. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.11.3.239>
- Hall M, Najim K (2014) Structural behaviour and durability of steel-reinforced structural Plain/Self-Compacting Rubberised Concrete (PRC/SCRC). *Construction and building materials*. V 73.P 490-497. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.063>
- Hall M, Najim Kh, Hopfe Ch (2012) Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings. *Applied Thermal Engineering*. V 33-34. P 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.015>
- Hamad A, Sldozian R, Mikhaleva Z (2020) Effect of ceramic waste powder as partial fine aggregate replacement on properties of fiber-reinforced aerated concrete. *Engineering Reports*.21. <https://doi.org/10.1002/eng2.12134>
- Hameed A.S, Shashikala A.P (2016) Suitability of rubber concrete for railways sleepers. *Perspectives in science*. V 8. P 32–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pisc.2016.01.011>
- Han Q, Yang Y, Zhang J, Hou D, Dong B (2024) Experimental investigation and numerical simulation of chloride diffusion in rubber concrete under dry-wet cycles. *Journal of Building Engineering* V 96. 110558. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110558>
- Hashamfirooz M, Dehghani M.H, Khanizadeh M, Hassanvand M.S, Hassanabadi M, Momniha F (2025) A systematic review of the environmental and health effects of waste tires recycling. *Heliyon*. V 11.2. e41909. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41909>
- He S, Jiang Z, Chen H, Chen Z, Ding J, Deng H, Mosallam A (2023) Mechanical Properties, Durability, and Structural Applications of Rubber Concrete: A State-of-the-Art-Review. V 15.11. 8541. <https://doi.org/10.3390/su15118541>
- He L, Ma Y, Liu Q, Mu Y (2016) Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete. *Construction and building materials*. V 120.P 403-407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.025>
- Hebhoub H, Aoun H, Belachia M, Houari H, Ghorbel E (2011) Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*. V 25.3.P 1167-1171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>

- Heidari A, Tavakol D (2013) A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles. *Construction and Building Materials*. V 38.P 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.110>
- Han Q, Yang Y, Zhang I, Hou D, Dong B (2025) Experimental investigation and numerical simulation of chloride diffusion in rubber concrete under dry-wet cycles. *Journal of Building Engineering*. V 96. 110558. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110558>
- Hiremath P, Kamalanathan J, Rai R, Yaragal S (2019) Experimental Investigation on Utilization of Waste Shredded Rubber Tire as a Replacement to Fine Aggregate in Concrete. *Construction and Building Materials*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_49
- Hisbani N, Shafiq N, Shams M, Farhan S, Zahid M (2025) Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine Aggregate -A review. *Hybrid Advances*. V 10. 100481. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100481>
- Holmes N, Browne A, Montague C (2014) Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and building materials*. V73.P 195-204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107>
- Holmes N, Dunne K, O'Donnell J (2014) Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings. *Construction and building materials*. V 55.P 365-378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.046>
- Hou M, Xu K, Monteiro P, Li V (2023) Rubber particle bridging effect on crack width control of low carbon Engineered Cementitious Composites (ECC). *Cement and concrete Composites*. V 140. 105106. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105106>
- Huang B, Shu X, Cao J (2013) A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites. *Construction and building materials*.40: 270–274. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.014>
- Ibrahim K (2021) Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash. V 15. e00630. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00630>
- Ince C, Shehata B, Derogar S, Ball R (2022) Towards the development of sustainable concrete incorporating waste tyre rubbers: A long-term study of physical, mechanical & durability properties and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*. V 334. 130223. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130223>
- Ismail Z, AL-Hashm E (2009) Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*. V 29.2. P 655-659. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>
- Issa C, Salem G (2013) Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. *Construction and building materials*. V 42.P 48-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>

- Ikotun B.D, Senatsi K.B, Abdulwahab R, Nkala M.L (2024) Effects of Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement on the Structural Performance of Concrete. *Civil Engineering and Architecture*. V 12.4.P 2547 -2556. <http://dx.doi.org/10.13189/cea.2024.120404>
- Jalal M, Jalal H (2020) RETRACTED : Behavior assessment, regression analysis and support vector machine (SVM) modeling of waste tire rubberized concrete. *Journal of Cleaner Production*. V 273. 122960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122960>
- Jang B, Lee J, Kim J, Chung C (2017) Enhancement of thermal neutron shielding of cement mortar by using borosilicate glass powder. *Applied Radiation and Isotopes*. V 123.P 1-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.01.047>
- Jerônimo V, Meira G, Silva Filho L (2018) Performance of self-compacting concretes with wastes from heavy ceramic industry against corrosion by chlorides. *Construction and Building Materials*. V 169. P 900-910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.034>
- Ji W, Pei Z, Xu W, Li Z, Li Y, Jia Y (2024) Deterioration performance analysis of recycled brick concrete subjected to freezing and thawing effect. *Case Studies in Construction Materials*. V 20. e02722. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02722>
- Ji Y, Qasem M, Xu T, Mohammed A (2022) Mechanical properties investigation on recycled rubber desert sand concrete. *Journal of CO2 Utilization*. V88. 102939. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102939>
- Jiang Y, Zhang S, Xue G, Wang W (2023) Compressive behavior of rubberized concrete under high strain rates. *Structures*. V 56. 104983. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104983>
- Jwaida A, Dulaimi A, Bernardo L (2024) The Use of Waste Ceramic in Concrete: A Review. *Civil engineering*. V 5.2.P 482-500. <https://doi.org/10.3390/civileng5020024>
- Kannan DM, Aboubakr AS, Taha MMR (2017) High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of portland cement. *Construction and Building Materials*. V 144.P 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115>
- Kardos A, Durham S (2015) Strength, durability, and environmental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavement applications. *Construction and building materials*. V 98. P832-845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.065>
- Kashani A, Ngo T, Hemachandra P, Hajimohammadi A (2018) Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam. *Construction and building materials*. V 171.P 467-473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.163>
- Katoch D, Lalotra S, Bhardwaj S (2020) Experimental study on the strength of concrete by partial replacement of fine aggregates with glass powder. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. V7.8.
- Kenan Y, Uğur D, Serhan I, İsmail I, Okan K, Cengiz D (2019) Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar . 10.7764/RDLC.18.2.290

- Keshavarz Z, Mostofinejad D (2019) Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. V 195. P 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033>
- Khaloo A, Dehestani M, Rahmatabadi P (2008) Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*. V 28.12. 2472-2482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>
- Khan K, Ahmad W, Amin M, Ahmad A, Nazar S, Alabdullah A, Abu Arab A (2022) Exploring the Use of Waste Marble Powder in Concrete and Predicting Its Strength with Different Advanced Algorithms. *Materials*. V. 15.12. 4108. <https://doi.org/10.3390/ma15124108>
- Khatib J.M (2005) Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*. V 35.4.P 763-769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- Khodabakhshian A, Brito J, Ghalehnovi M, Shamsabadi E (2018) Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Construction and Building Materials*. V 169. P 237-251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192>
- Khodabakhshian A, Ghalehnovi M, Brito J, Shamsabadi E (2017) Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*. V 170.P 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.116>
- Kulovaná T, Vejmelková E, Keppert M, Rovnaníková P, Keršner Z, Černý R (2015) Mechanical, durability and hygrothermal properties of concrete produced using Portland cement-ceramic powder blends. *Structural Concrete*.59. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201500029>
- Kumar K, Jain S (2017) Combined Effect of Marble Dust and Steel Fiber on the Mechanical Properties of High Strength Concretes. *INTERNATIONAL JOURNAL OF TREND IN SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT*. V 9.5. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd163>
- Kumar G, Sandeep V, Sudharani Ch (2014) Using tyres wastes as aggregates in concrete to form Rubcrete – Mix for engineering applications. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. V3.11. P 500-509.
- Kumarappan N (2013) Partial Replacement Cement in Concrete Using Waste Glass. *International Journal of Engineering Research & Technology*. V.2.10.
- Kore S.D, Vyas A.K (2016) Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*. V 4.P 85-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2016.01.002>
- Kou S, Xing F (2012) The Effect of Recycled Glass Powder and Reject Fly Ash on the Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Ultrahigh Performance Concrete. *Materials Science and Engineering*.48. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/263243>

- Kuoribo E and Mahmoud H (2022). Utilisation of waste marble dust in concrete production: A scientometric review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*. V 374. 133872. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133872>
- Kuoribo E, Shokry H, Hassanin A, Asawa T, Mahmoud H (2023) Optimizing concrete performance: An investigation into the impact of supplementary cementitious materials and sand particle sizes. *Materials Letters*. V 347. 134593. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134593>
- Lauren L, Markandeya A, Haider M.M, Bollinger D (2022) Recycled concrete and brick powders as supplements to portland cement for more sustainable concrete. *J Clean Prod*. 364: 132651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651>
- Lavagna L, Nistico R, Sarasso M, Pavese M (2020) An Analytical Mini-Review on the Compression Strength of Rubberized Concrete as a Function of the Amount of Recycled Tires Crumb Rubber. *Materials*. V13.5. 1234. <https://doi.org/10.3390/ma13051234>
- Letelier V, Ortega J, Muñoz P, Tarela E, Moriconi G (2018) Influence of Waste Brick Powder in the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability*. V 10.4. 1037. <https://doi.org/10.3390/su10041037>
- Lezzerini M, Luti L, Aquino A, Gallelo G, Pagnotta S (2022) Effect of Marble Waste Powder as a Binder Replacement on the Mechanical Resistance of Cement Mortars. *Applied Sciences*. V 12.9. 4481. <https://doi.org/10.3390/app12094481>
- Li S, Huang S, Kuang Y, Zou Q, Wang L, Fu B (2024) Rubber concrete reinforced with macro fibers recycled from waste GFRP composites: Mechanical properties and environmental impact analysis. *Case Studies in Construction Materials*. V21. e03720. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03720>
- Li L, Joseph P, Kuang Y, Zou Q, Zhang X, Zhang L (2024) A study of some relevant properties of concrete incorporating waste ceramic powder as a cement replacement agent. *Journal of Building Engineering*. V87. 109106. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109106>
- Li Y, Yang X, Lou P, Wang R, Li Y, Si Z (2021) Sulfate attack resistance of recycled aggregate concrete with NaOH-solution-treated crumb rubber. *Construction and building materials*. V 287. 123044. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123044>
- Li Z, Li S, Jiang C (2025) A Study on the Mechanical Properties and Performance of Fibrous Rubberized Concrete. *Buildings*. V15.18. 1245. <https://doi.org/10.3390/buildings15081245>
- Li D, Zhuge Y, Gravina R, Mills J.E (2018) Compressive stress strain behavior of crumb rubber concrete (CRC) and application in reinforced CRC slab, *Construction and building materials*. V 166. P745–759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.142>
- Li L, Zhuo Z, Zhu J, Chen J, Kwan A (2019) Reutilizing ceramic polishing waste as powder filler in mortar to reduce cement content by 33% and increase strength by 85%. *Powder Technology*. V 355.P 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.043>

Références bibliographiques

- Liu F, Chen G, Li L, Guo Y (2012) Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Construction and building materials*. V 36. P 604-616. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.014>
- Liu M, Lu J, Jiang W, Ming B (2023) Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete. *Journal of Building Engineering*. V 65. 105718. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105718>
- Liu S, Wang Z (2015) Effect of Limestone Powder on Acid Attack Characteristics of Cement Pastes. *Materials Science*. V 20. No. 4.
- Liu F, Zheng W, Feng W, Ning G (2013) Mechanical and fatigue performance of rubber concrete. *Construction and building materials*. V 47.P 711-719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.055>
- Lijuan L, Shenghua R, Lan Z (2014) Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles. *Construction and building materials*. V 70.P 291-308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105>
- Mahmoud A, Yassen M, Hama S (2019) Effect of Glass Powder as Partial Replacement of Cement on Concrete Strength and Stress-Strain Relationship. *International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. <https://doi.org/10.1109/DeSE.2019.00030>
- Malek M, Smarzewski P, Kunikowski M, Kluczyński J (2025) Utilization of brick powder as a sustainable additive in concrete: Optimization of mechanical and thermal performance. *Construction and Building Materials*.V 492. 143092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143092>
- Mashaly A, El-Kaliouby B, Shalaby B, El – Gohary A, Rashwan M (2016) Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*. V 112.1. P 731-741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>
- Matos A, Milheiro-Oliveira P, Pimentel M.J (2024) Eco-efficient high performance white concrete incorporating waste glass powder. *Construction and Building Materials*.V411. 134556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134556>
- Meena Ch, Kumar A, Jain S, Rehman A, Mishra S, Sharma N, Bajaj M, Shafiq M, Tag Eldin E (2022) Innovation in Green Building Sector for Sustainable Future. *Energies*. V 15.18. 6631. <https://doi.org/10.3390/en15186631>
- Meera M and Gupta S (2024) Performance evaluation of marble powder and fly ash concrete for non-structural applications. *Journal of Building Engineering*. V 84. 108499. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108499>
- Medina C, Frías M, Sánchez de Rojas M.I (2012) Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. V 31.P 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075>

Références bibliographiques

- Mei J, Xu J, Ahmad W, Khan K, Nasir Amin M, Aslam F, Alaskar A (2022) Promoting sustainable materials using recycled rubber in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*. V373. 133927. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133927>
- Messaoudene I, Mebarkia R, Atia M, Molez L (2019) Effect of the marble fineness on the rheological characteristics of concrete. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*. 2437-1114.
- Mhaya A, Huseien GH, Zainal Abidin A, Mohammad I (2020) Long-term mechanical and durable properties of waste tires rubber crumbs replaced GBFS modified concretes. *Construction and building materials*. V 256. 119505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119505>
- Mhaya A, Baghban M, Faridmehr I, Huseien G, Zainal Abidin A, Ismail M (2021) Performance Evaluation of Modified Rubberized Concrete Exposed to Aggressive Environments. *Materials*. V 14.8. <https://doi.org/10.3390/ma14081900>
- Miao X, Chen B, Zhao Y (2024) Prediction of compressive strength of glass powder concrete based on artificial intelligence. *Journal of Building Engineering*. V 91. 109377. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109377>
- Mishra S, Abdi Elmi E, Panda S, Sarkar P (2025) Experimentation of concrete properties of crumb rubber with SCMs: Mechanical, stiffness, NDT and micro-structural. *Cleaner Waste Systems*. V 12. 100395. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100395>
- Moein M, Rahmati K, Moein A, Rigby S, Saradar A, Karakouzian M (2024) Utilizing construction and demolition waste in concrete as a sustainable cement substitute: A comprehensive study on behavior under short-term dynamic and static loads via laboratory and numerical analysis. *Journal of Building Engineering*. V 97. 110778. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110778>
- Mohammadi I, Khabbaz H, Vessalas K (2016) Improvement of mechanical performance of rubberized concrete pavements through sodium hydroxide treatment. *Materials and Structures*. V49. P 813-827. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0540-7>
- Mohseni E, Koushkbaghi M (2023) Recycling of landfill waste tyre in construction materials: Durability of concrete made with chipped rubber. *Construction and Building Materials*. V 409. 134114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134114>
- Molnar L, Manea D (2016) New Types of Plastering Mortars Based on Marble Powder Slime. *Procedia Technology*. V 22. P 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.076>
- Mondal S, Mondal b (2024) Assessment of urban solid waste management in a Class II Indian city using geospatial and statistical approaches: A case study of Rampurhat municipality. *Waste Management Bulletin*. V 1.4. P 74-92. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.09.003>
- Moolchandani K (2025) Industrial byproducts in concrete: A state-of-the-art review. *Next Materials*. V 8. 100593. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100593>

- Moustafa A, ElGawad M (2015) Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*. V 93.P 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>
- Muhedin D, Ibrahim R (2023) Effect of Waste Glass Powder As Partial Replacement of Cement & Sand in Concrete. *Case Studies in Construction Materials*. V 19. e02512. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512>
- Mustafa T, Mahmoud A, Mories E, El Beshlawy S (2023) Flexural behavior of reinforced concrete slabs containing recycled glass powder and steel fibers. *Structures*. V 54. 1491-1508. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.101>
- Nadim E, Bajaba N (2012) The Effect of Rubber Crumbs Addition on Some Mechanical Properties of Concrete Composites. *International Journal of Mechanic Systems Engineering*. V 2.2. P 53-58.
- Najim K, Hall M (2012) Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and building materials*. V 27.1.P 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.013>
- Nassar R, Soroushian P, Sufyan-Ud-Din M (2021) Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement. *Case Studies in Construction Materials*. V 15. e00745. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00745>
- Nepomuceno M, Isidoro R, Catarino J (2018) Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. *Construction and Building Materials*. V.165.20.P 284-294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052>
- Nie X, Xiao C, Zhang S (2024) Axial compressive behavior of CFRP-confined rubber concrete-encased H-shaped steel hybrid columns. *Construction and building materials*. V445. 137710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137710>
- Noaman A.T, Abu Bakar B.H, Akil H (2016) Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete. *Construction and building materials*. V 115. 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.022>
- Olofinnad O, Ede A, Ndambuki J, Oyeyemi K (2019) Reuse of pulverized fired clay brick wastes as cement substitute in mortar for sustainable construction. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 652.1. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/652/1/012048>
- Onuaguluchi O, Panesar D (2014) Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production*. V 82. P125–131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.068>
- Ossola G, Wojcik A (2014) UV modification of tire rubber for use in cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*. 52: 34–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.04.004>

- Özkılıç Y, Zeybek O, Bahrami A, Çelik A, Othuman Mydin M.D, Karalar M, Hakeem I, Roy K, Jagadesh P (2023) Optimum usage of waste marble powder to reduce use of cement toward eco-friendly concrete. *Journal of Materials Research and Technology*.V.25. P 4799-4819. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.126>
- Pacheco-Torres R, Cerro-Prada E, Escolano F, Varela F (2018) Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements. *Construction and building materials*. V 176. P 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.030>
- Paithankar D, Sharma A, Thenmozhi S, Ramteke P, Dhanalakshmi A, Sivakumar S (2023) Influence of glass powder silica fume and scrapped ceramic waste on the mechanical properties of concrete. *Materials today proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.213>
- Parashar AK, Sharma P, Sharma N (2022) An investigation on Properties of Concrete with the adding of Waste of Ceramic and micro silica. *Materials Today Proceedings*. V 62.6.P 4036-4040. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.603>
- Parhaco-Torgal F, Ding Y, Jalali S (2012) Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and building materials*. V 30.P 714-724. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
- Paul D, Bindhu K.R, Matos A, Delgado J (2022) Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution. *Construction and Building Materials*. V 355.14. 129217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129217>
- Pelisser F, Zavarise N, Longo T, Bernardin A.M (2011) Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*. V 19.6-7. P 757-763. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014>
- Pham T, Elchalakani M, Hao H, Lai J, Ameduri S, Tran T (2019) Durability characteristics of lightweight rubberized concrete. *Construction and building materials*. V 224.P 584-599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.048>
- Polydorou T, Constantinides G, Neocleous K, Kyriakides N, Koutsokeras L, Chrysostomou C.Z, Hadjimitsis D.G (2020) Effects of pre-treatment using waste quarry dust on the adherence of recycled tyre rubber particles to cementitious paste in rubberised concrete. *Construction and building materials*. V254. 119325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119325>
- Pongsopha Ph, Sukontasukkul P, Zhang H, Limkatanyu S (2022) Thermal and acoustic properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete. *Results in Engineering*. V 13.7.100333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100333>
- Prakash B, Saravanan T, Kabeer K, Bisht K (2023) Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A Review. *Construction and Building Materials*. V 401. 132887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132887>

Qureshi M, Li J, Wu C, Sheng D (2024) Mechanical strength of rubberized concrete: Effects of rubber particle size, content, and waste fibre reinforcement. *Construction and building materials*. V 444. 137868. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137868>.

Rahimi S, Nikbin I, Allahyari H, Habibi S (2016) Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. *Journal of Cleaner Production*. V 126.P 166-177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.074>

Rahma A, el Naber N, Issa Ismail S, Sanjay Kumar S (2017) Effect of glass powder on the compression strength and the workability of concrete. *Cogent Engineering*. V 4.1. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1373415>

Raffoul S, Garcia R, Pilakoutas K, Guadagnini M, Medina N.F (2016) Optimization of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*. V124.391-404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054>

Rana A, Kalla P, Csetenyi L.J (2015) Sustainable Use of Marble Slurry in Concrete. *Journal of Cleaner Production*. V 94.P 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.053>

Rashid Kh, Yazdanbakhsh A, Ul Rehman M (2019) Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material. *Journal of Cleaner Production*. V 224.P 396-410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>

Reda Taha, M.M.- ASCE, M.- El-Dieb, A.S.- Abd El-Wahab, M.A.- Abdel-Hameed, M.E. (2008) Mechanical, Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. V 20.P 640-649. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:10\(640\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:10(640))

Resin R, Alwared A, Al-Hubboubi S (2018) Utilization of brick waste as pozzolanic material in concrete mix. *MATEC Web of Conferences* 162, 02006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816202006>

Richardson A, Coventry K, Edmondson V, Dias E (2016) Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (optimal particle size). *Journal of Cleaner Production*. V 112.1.P 599-606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.028>

Rodrigues R, Brito J, Sardinha M (2015) Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials*. V 77.P 349-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.104>

Rocha J, Ruiz B, Filho R (2024) Evaluating the Use of Recycled Brick Powder as a Partial Replacement for Portland cement in Concrete. *Civil and Sanitary Engineering*. V 44.1 <http://doi.org/10.15446/ing.investig.107462>

Roychand R, Gravina R, Zhuge Y, Ma X, Youssf O, Mills J.E (2020) A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and building materials*. V 237. 117651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117651>

Ruiz-Sánchez A, Sanchez-Polo M, Rozalen M (2019) Waste marble dust: An interesting residue to produce cement. *Construction and Building Materials*. V 224.P 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.031>

Rumiński P, Szeląg M, Matos P (2022) Evaluating the Feasibility of Using Brick Powder and Clay Powder in Cement Replacement. *Materials*. V 15.22. 8127. <https://doi.org/10.3390/ma15228127>

Sabbrojjaman MD, Liu Y, Tafsirojjaman T (2024) A comparative review on the utilisation of recycled waste glass, ceramic and rubber as fine aggregate on high performance concrete: Mechanical and durability properties. *Developments in the Built Environment*. V 17. 100371. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100371>

SanthoshKumar R, Manodeepan N, Manikandan K, Arulkesavan S, Prabhavathi S (2015) An Experimental Investigation on Rubberized Concrete. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. V 2.P 82-88.

Seghir N.T, Mellas M, Sadowski L, Krolicka A, Zak A, Ostrowski K (2022) The Utilization of Waste Marble Dust as a Cement Replacement in Air-Cured Mortar. *Sustainability*. V 11.8. <https://doi.org/10.3390/su11082215>

Sellaf H, Balegh B (2023) Effect of waste marble powder on the properties of white mortar made from tuff. *Journal of New Technology and Materials*. Vol. 13 .01. P 25-32

Selvasofia S.D, Sarath Babu A (2020) Investigation of waste marble powder in the development of sustainable concrete. *Materials Today Proceedings*.44. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.536>

Senin M.S, Shahidan Sh, Abdullah S.R, Guntor N.A, Leman A.S (2017) A review on the suitability of rubberized concrete for concrete bridge decks. *Materials Science and Engineering*. V 271.012074. [doi:10.1088/1757-899X/271/1/012074](https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012074)

Setinaa A, Gabreneh A, Juhnivicac I (2013) Effect of Pozzolanic Additives on Structure and Chemical Durability of Concrete. *Procedia Engineering*. V57. P1005-1012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.127>

Serge N, Joekes I, Galves A.D, Rodrigues J.A (2004) Rubber-mortar composites: Effect of composition on properties. *Journal of Materials Science*. V 39.P 3319-3327. <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000026932.06653.de>

Schackow A, Stringari D, Senff L, Correia S.L, Segadães A.M (2015) Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and Concrete Composites*. V 62. P 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019>

Shahjalal M.d, Islam K, Ahmed A, Ahsan R (2024) Mechanical characterization of fiber-reinforced rubberized recycled concrete. *Construction and building materials*. V412. 134799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134799>

Shao R, Wu Ch, Li J (2022) A comprehensive review on dry concrete: Application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance. *Journal of Building Engineering*. V 55. 104676. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104676>

Shayan A, Xu A (2006) Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*. V 36.3. P457-468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>

Shu X, Huang B (2014) Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and building materials*. V67. P 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>

Shukla A, Gupta N, Kishore K (2020) Experimental investigation on the effect of steel fiber embedded in marble dust based concrete. *Materials today proceedings*. V 26.2.P 2938-2945. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.607>

Siad H, Mesbah HA, Kamali-Bernard S, Mouli M (2010) Influence Of Natural Pozzolan On The Behavior Of Self-Compacting Concrete Under Sulphuric And Hydrochloric Acid Attacks, Comparative Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 35.1.

Siddika A, Al Mamun A, AL Yousef R, Mugahed M, Aslani F, Alabduljabbar H (2019) Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*. V 224. P 711-731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>

Siddique S, Chaudhary S, Shrivastava S, Gupta T (2019) Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions. *Journal of Cleaner Production*. V 210.P 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.231>

Siddique S, Shrivastava S, Chaudhary S (2017) Influence of ceramic waste on the fresh properties and compressive strength of concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. V 29.2.P 212-225. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1275985>

Silva R, Brito J, Dhir R (2014) Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. V 65. P 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>

Singh M, Choudhary K, Srivastava A, Sangwan K, Bhunia D (2017) A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*. V 13.P 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.009>

Singh R, Mohanty B (2024) Effect of waste glass powder on the durability and microstructural properties of fly ash-GGBS based alkali activated concrete containing 100 % recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*.V 447. 138024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138024>

Singh M, Srivastava A, Bhunia D (2019) Long-term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. *Construction and Building Materials*.V 198.P 553-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005>

- Sinkhonde D (2024) Energy assessments of concrete incorporating waste tire rubber and waste brick powder: A comparative analysis of various concrete grades. *Cleaner Energy Systems*. V 8. 100115. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100115>
- Sivakumar A, Srividhya S, Sathiyamoorthy V, Seenivasan M, Subbarayan M.R (2021) Impact of waste ceramic tiles as partial replacement of fine and coarse aggregate in concrete. *Materials Today Proceedings*. V 61.2.P 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.142>
- Skripkiunas G, Grinys A, Janavičius E (2009) Porosity and Durability of Rubberized Concrete. Second international conference on sustainable construction materials and technologies. 978.
- Sofi A (2018) Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete - A review. *Ain Shams Engineering Journal*. V 9.4.P 2691-2700. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.007>
- Soliman N.A, Tagnit Hamou A (2016) Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials*. V 125. 600-612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>
- Son K, Hajirasouliha I, Pilakoutas K (2011) Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns. *Construction and building materials*. V 25.1.P 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.035>
- Sothornchaiwit K, Dokduea W, Tangchirapat W, Keawsawasvong S, Thongchom C, Tangchirapat C (2022) Influences of Silica Fume on Compressive Strength and Chemical Resistances of High Calcium Fly Ash-Based Alkali-Activated Mortar . *Sustainability*. V14.5. 2652. <https://doi.org/10.3390/su14052652>
- Su H, Su J, Ling T, Ghataora G, Dirar S (2014) Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*. V 91.P 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Subası S, Öztürk H, Emiroğlu M (2017) Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. V 149.P 567-574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>
- Sukontasukkul P (2009) Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and building materials*. V 23.2.P 1084-1092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>
- Sum YL, Rheinheimer V, Soong BH, Monteiro PJM (2021) Effect of iron (III) oxide concentration on the performance of meta-resonators embedded in cementitious matrix. *Cement and Concrete Composites*. V116. 103890. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103890>
- Taha B, Nounou G (2008) Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 5, May 2008, pp. 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>

- Taher M, Abed E.H, Hashim M (2023) Using ceramic waste tile powder as a sustainable and eco-friendly partial cement replacement in concrete production. *Materials today proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.060>
- Tahir A, Poloju K (2017) Use of Ceramic Powder in Concrete - Strength & Durability Properties. *Journal of Student Research*. <http://dx.doi.org/10.47611/jsr.vi.541>
- Tahwia A, Essam A, Tayeh B, Abd Elrahman M (2022) Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*. V 17. e01648. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01648>
- Tang W, Chen P, Lin Z, Zhang L, Zheng W, Huang X, Zhang J, Zhang W (2023) Effectively reutilizing waste clay brick to prepare a novel green foam concrete base on a new two-step paste substitution method. *Construction and Building Materials*. V .372. 130794. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130794>
- Tang Q, Ma Z, Wu H, Wang W (2020) The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*. V 114. 103807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>
- Tayeh B, Al Saffar D, Aadi A, Almeshal I (2020) Sulphate resistance of cement mortar contains glass powder. *Journal of king saud university engineering-sciences*. V 32.8.P 495-500. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.07.002>
- Thomas B.S, Gupta R.C (2016), Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *Journal of Cleaner Production*. V113.P 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>
- Thomas B.S, Kumar S, Mehra P, Gupta R.C, Joseph M, Csetenyi L.J (2016 a) Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. *Construction and Building Materials*, 124, 906–909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.110>
- Thomas BS, Gupta RC, Mehra P, Kumar S (2015) Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment. *Construction and building materials*. V83. P 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.012>
- Thomas BS, Chandra Gupta R (2016) A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and sustainable energy*. V54.P 1323-1333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>
- Thomas BS, Gupta RC, Panicker V (2016) Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*. V 112.1.P 504-513. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>
- Tian S, Zhang T, Lei Y (2011) Research on modifier and modified process for rubber-particle used in rubberized concrete for road. *Advanced Materials Research*. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.4125>

- Topçu I (1995) The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*. V 25.2. P 304-310. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00014-3)
- Topçu IB, Canbaz M (2004) Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*. V34. P 267-274. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00014-3)
- Torretta W, Rada EC, Ragazzi M, Trulli E, Istrate IA, Cioca LI (2015) Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste Management*. V 45. P152-160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>
- Vaitkevicius V, Šerelis E, Hilbig H (2014) The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*. V 68.P 102-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101>
- Vandhiyan R, Ramkumar K, Ramya R (2013) Experimental Study on Replacement of Cement by Glass Powder. *International Journal of Engineering Research & Technology*. V 2.5.
- Varadharajan S (2020) Determination of mechanical properties and environmental impact due to inclusion of fly ash and marble waste powder in concrete. *Structures*. V 25.P 613-630. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.040>
- Verma P, Kumar R, Mukherjee S, Sharma M (2024) Sustainable self-Compacting concrete with marble slurry and fly ash: Statistical modeling, microstructural investigations, and rheological characterization. *Journal of Building Engineering*. V 94. 109785. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109785>
- Vieira T, Alves A, de Brito J, Correia JR, Silva RV (2016) Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. *Materials and Design*. V 90. P767–776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.023>
- Vijayakumar G, Vishaliny H, Govindarajulu D (2013) Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. V 3.2.
- Wang J, Du B (2020) Experimental studies of thermal and acoustic properties of recycled aggregate crumb rubber concrete. *Journal of Building Engineering*. V 32.12. 101836. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101836>
- Wang R, Yu N, Li Y (2020) Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and building materials*. 242. 118164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>
- Wang L, Zhang P, Golewski G, Guan J (2023) Fabrication and properties of concrete containing industrial waste. *Frontiers in Materials*. Volume 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1169715>
- Wong CL, Mo KH, Yap SP, Alengaram UJ, Ling TC (2018) Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of Cleaner Production*. V195. P 226-239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>

- Wu H, Gao J, Liu C, Guo Z, Luo X (2024) Reusing waste clay brick powder for low-carbon cement concrete and alkali-activated concrete: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. V 449. 141755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141755>
- Xu K, Huang W, Zhang L, Fu S, Chen M, Ding S, Han B (2021) Mechanical properties of low-carbon ultrahigh-performance concrete with ceramic tile waste powder. *Construction and Building Materials*. V 287. 123036. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123036>
- Xie J, Zheng Y, Guo Y, Ou R, Xie Z, Huang L (2018) Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs. *Composite structures*. V 228. 111371. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111371>
- Xue J, Shinozuka M (2013) Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability. *Construction and building materials*. V 42. P 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005>
- Yang Y, Lu P, Shao R, Zhao Q, Yang T, Wu C (2024) A comprehensive review of multisource solid wastes in sustainable concrete: From material properties to engineering application. *Construction and building materials*. V435. 136775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136775>
- Yan P, Chen B, Zhu M, Meng X (2024) Study on mechanical properties and microstructure of green ultra-high performance concrete prepared by recycling waste glass powder. *Journal of Building Engineering*. V 82. 108206. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108206>
- Yang C, Xu X, Lei Z, Sun J, Wang Y, Luo G, Yao H, Mei Y (2024) Enhancing mechanical properties of three-dimensional concrete at elevated temperatures through recycled ceramic powder treatment methods. *Journal of Materials Research and Technology*. V 31.P 434-446. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.036>
- Yasser N, Abdelrahman A, Kohail M, Moustafa A (2023) Experimental investigation of durability properties of rubberized concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. V 14.1. 102111. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102111>
- Youssf O, ElGawad M (2012) An overview of sustainable concrete made with scrap rubber. 22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. <http://dx.doi.org/10.1201/b15320-185>
- Youssf O, ElGawady M.A, Mills J.E (2015) Experimental Investigation of Crumb Rubber Concrete Columns under Seismic Loading. *Structures*. V3. P 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.02.005>
- Youssf O, ElGawady M, Mills JE, Ma X (2014) An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and building materials*. V 53.P 522-532. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>
- Youssf O, ElGawady MA, Mills JE, Ma X (2017) Analytical modeling of the main characteristics of crumb rubber concrete. *Acids Spec Publ*. V314.P1–18. <https://doi.org/10.14359/51689742>

Références bibliographiques

- Youssif O, Hassanli R, Mills JE, Skinner W, Ma M, Zhuge X, Roychand R, Gravina (2019) Influence of Mixing Procedures, Rubber Treatment, and Fibre Additives on Rubcrete Performance. *Journal of Composites Science*. V 3 (2). 41. <https://doi.org/10.3390/jcs3020041>
- Youssif O, Mills JE, Ellis M, Benn T, Zhuge Y, Ma X, Gravina R (2022) Practical Application of Crumb Rubber Concrete in Residential Slabs. *Structures*. V 36.P 837-853. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.062>
- Yung W, Yung L, Lee H (2013) A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and building materials*. V 41.P 665-672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>
- Zhang S.H, Cao K, Wang C, Wang X, Wang J, Sun B (2020) Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 117980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>
- Zhang M, Qi Y, Zhang W, Wang M, Li J, Lu Y, Zhang S, He J, Cao H, Tao X, Xu H, Zhang S (2024) A review on waste tires pyrolysis for energy and material recovery from the optimization perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V 199. 114531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114531>
- Zhang P, Zhang P, Wu J, Guo Z, Zhang Y, Zheng Y (2023) Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concrete Manufactured Using Ceramic Waste: A Review. *Journal of Renewable Materials*. V .11.2. P 937-974. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.023290>
- Zhang Y, Zhao Z (2015) Internal Stress Development and Fatigue Performance of Normal and Crumb Rubber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, V 27.2. 0899-1561. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001000](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001000)
- Zhao Y, Gao O, Chen F, Liu C, Chen X (2018) Utilization of waste clay bricks as coarse and fine aggregates for the preparation of lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*. V 201.P 706-715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.103>
- Zhao H, Wang Y, Liu X, Wang X, Chen Z, Lei Z, Zhou Y, Singh A (2024) Review on solid wastes incorporated cementitious material using 3D concrete printing technology. *Case Studies in Construction Materials*.V 21. e03676. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03676>
- Zhao Z, Xiao J, Duan Z, Hubert J, Grigoletto S, Courard L (2022) Performance and durability of self-compacting mortar with recycled sand from crushed brick. *Journal of Building Engineering*. V 57. 104867. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104867>
- Zheng L, Huo X, Yuan Y (2008) Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and building materials*. V 22:5. P 939-947. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.005>

Références bibliographiques

Zhou W, Lu C, Yu Z, Mo J (2025) Mechanical properties and pore structure characterization of crumb rubber concrete using equal size replacement method. Journal of Building Engineering. V102. 112026. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112026>

Zhu Q, Dai H, Chen D, Liang Z (2019) Study on Influence of Waste Tire Rubber Particles on Concrete Crack Resistance at Early Age. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 242(5).052060. [doi:10.1088/1755-1315/242/5/052060](https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/5/052060)

Lien 1 :

<https://journaldupneu.com/marche/incendie-dune-decharge-de-pneumatiques-illegale-en-espagne/>

Lien 2 :

<https://www.20minutes.fr/planete/1099237-20130212-madrid-millions-pneus-abandonnes-decharge-sauvage>

Lien 3 :

<https://www.parismatch.com/Actu/Environnement/La-plus-grande-decharge-de-pneus-au-monde-est-en-flammes-1751615>

Lien 4 : <https://gurdebeke.com/que-deviennent-les-pneus-usages/>

Annexes

Essais de caractérisation des granulats

1- Résultats détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval) selon NF EN 1097-

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Désignation	MDE (%)	Observations
Gravier 15/25	17,90 %	Acceptable
Gravier 8/15	15,60 %	Acceptable
Spécification ≤ 20 %		≤ 20 %

2- Résultats détermination de la résistance à choc (Los Angeles) selon NF EN 1097-2 :

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Désignation	L A (%)	Observations
Gravier 15/25	20 ,10 %	Acceptable
Gravier 8/15	22,08 %	Acceptable
Spécification ≤ 20 %		≤ 30 %

3- Résultats détermination du Coefficient d'Aplatissement selon NF EN 933-3 :

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Désignation	A (%)	Observations
Gravier 15/25	05,88 %	Acceptable
Gravier 8/15	13,27 %	Acceptable
Spécification ≤ 20 %		≤ 20 %

4- Masses Volumiques :

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Désignation	M.V absolues (gr/cm3)	M.V apparents (gr/cm3)
Gravier 15/25	2,74	1,46
Gravier 8/15	2,68	1,48
Sable de carrière 0/4	2,62	1,54

5- Essai de Propreté :

Fraction	Gravier 15/25	Gravier 8/15	sable 0/4	Spécifications
EP	0,52	0,47	-	< 2 %
ES	-	-	68,40 %	> 65 %

MasterGlenium® 26

Superplastifiant, haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

MasterGlenium 26 est un adjuvant non chloré à base d'éther polycarboxylates modifié.

Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du MasterGlenium

MasterGlenium se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment. Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du MasterGlenium dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires. Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

DOMAINES D'APPLICATION

MasterGlenium 26 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

MasterGlenium 26 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Recommandé pour les usages suivants :

- Bétons à très long maintien d'ouvrabilité
- Fondations profondes (parois moulées, pieux...etc.),
- Pompage de longues distances
- Bétons de bâtiment, ouvrages d'art et tunnels
- Béton Auto Plaçant /Béton Auto Nivelant
- Bétons à faible E/C et long maintien d'ouvrabilité

PROPRIÉTÉS ET AVANTAGES

MasterGlenium 26 a un excellent effet d'ouvrabilité qui permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1h 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Il apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton.

Augmente :

- La résistance à la compression à jeune âge et à long terme
- La résistance à la flexion à jeune âge et à long terme
- Le module d'élasticité
- La résistance à la carbonatation
- L'imperméabilité
- La résistance aux agressions atmosphériques
- La qualité des parements et de la texture du béton

Diminue :

- La vibration
- Le retrait
- Le risque de fissuration
- Le fluage

CARACTÉRISTIQUES*

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Densité à 25 °C	1,08g/cm ³ ± 0,02
Chlorures	<0,01%
pH	7 ± 1
Taux des alcalins	< 2%

MODE D'EMPLOI

MasterGlenium 26 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du MasterGlenium 26 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % d'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le MasterGlenium 26 dans l'eau de gâchage. Éviter d'ajouter le MasterGlenium 26 sur les granulats.

DOSAGE

Plage normale d'utilisation

0,3 à 2,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 2,86L pour 100kg de ciment.

MasterGlenium[®] 26

Superplastifiant, haut réducteur d'eau

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

NORMES

MasterGlenium 26 est conforme aux normes :

- ASTM C-494 Type F&G
- BS EN 934-2
- NF EN 934-2+A1

CONDITIONNEMENT

MasterGlenium 26 est disponible dans les conditionnements suivants :

- Container de 1000 litres
- Fût de 210 litres
- En vrac

COMPATIBILITÉ

MasterGlenium 26 est compatible avec la majorité des ciments.

MasterGlenium 26 n'est pas compatible avec les superplastifiants MasterRheobuild

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

MasterGlenium 26 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

STOCKAGE

MasterGlenium 26 doit être stocké à l'abri du soleil et protégé des températures extrêmes.

DURÉE DE VIE

La durée de conservation est de 12 mois, lorsqu'il est stocké comme signaler dans la fiche de données de sécurité.

Note : *Les propriétés inscrites sont basées sur des tests de laboratoire contrôlé.

Les informations données sont réelles, représentent notre savoir actuel et sont basées non seulement sur des essais en laboratoire mais également sur les expériences du terrain. Cependant, du fait de nombreux facteurs affectant les résultats, nous offrons ces informations sans garantie et aucune responsabilité ne pourra nous être imputée.

Pour plus d'informations ou de questions, Contacter votre représentant local.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact de votre représentant local.

® = registered trademark of BASF group in many countries

BASF Construction Chemicals Algeria
Zone Industrielle Sidi Moussa, Route de Dar El Beïda,
District 13 lot N° 15 Alger, Algérie
Tel. +213 (0) 21 760 222
Fax +213 (0) 21 760 233



Caracalla Quartz

4,9 K followers • 670 suivi(e)s

0560442021 RIDHA

Ajouter ami(e)

Message



Publications

À propos

Reels

Photos

Détails

Profil · Création digitale

Production company, à Tébessa

Habite à **Tébessa**

Membre depuis Janvier 2018

Granulé Caoutchouc Poudrette Pneus Sbr

45 DA Fixe



-  foudiwahid
-  Sétif - Setif
-  0771 03 56 10
-  Message Ouedkniss
-  foudiwahid1@gmail.com

- 
- 
- 
- 

-  Message
-  Appeler

Informations de l'annonce

Numéro	26023216
Date	29/10/2025 12:52:37
Vues	2528



CERAM DECOR Group

266 K J'aime • 280 K followers



J'aime déjà

Message



Publications

À propos

Photos

Plus

Détails

Page · Société industrielle

USINE : Zone Industrielle Draa ben sebah N°32 TAZOULT - 5100 BATNA A...

0560 99 90 00

service.client@ceramdecor-dz.com

instagram.com/ceramdecor.officiel





Caracalla Quartz

4,9 K followers • 670 suivi(e)s

0560442021 RIDHA

Ajouter ami(e)

Message



Publications

À propos

Reels

Photos

Détails

Profil · Création digitale

Production company, à Tébessa

Habite à **Tébessa**

Membre depuis Janvier 2018