

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
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 :D012125004D



جامعة 02 أوت 5511 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع : D012125004D

Thèse présentée en vue de L'obtention
du diplôme de

Doctorat en sciences
En génie civil
Option : Géo-matériaux

Contribution à l'étude d'un béton de sable à base des granulats recyclés

Présentée par :

REZAIGUIA Nouha

Soutenue publiquement le 30/01/2025

Devant le jury composé de :

Dr. Boughamsa Wassila	MCA	Président	Université de Skikda
Pr. Hebhoub Houria	Professeur	Rapporteur	Université de Skikda
Dr. Kherraf Leila	MCA	Co-rapporteur	Université de Skikda
Dr. Abdelouahed Assia	MCA	Examineur	Université de Skikda
Dr. Khaldi Nacira	MCA	Examineur	Université de Guelma
Dr. Kechkar Chiraz	MCA	Examineur	Université de Guelma
Dr. Amouri Chahinez	MCA	Examineur	Université de Constantine

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier ALLAH, le Très Haut, le Tout Puissant, de m'avoir accordé la force, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail de thèse de doctorat.

Les travaux ont été réalisés sous la direction scientifique du **Pr. Hebhoub Houria** et du **Dr. Kherraf Leila**, à qui j'adresse mes plus profonds et sincères remerciements. Je les remercie chaleureusement de m'avoir offert l'opportunité de travailler au sein de leur équipe, et je suis profondément reconnaissante pour leurs compétences exceptionnelles, leur soutien constant, ainsi que pour l'aide et les encouragements qu'elles m'ont prodigué. Leur enthousiasme, leur gentillesse et leur grande compréhension, manifestés à travers tous les précieux moments qu'elles ont su m'accorder, ont été essentiels à l'accomplissement de ce travail.

J'exprime mes vifs et sincères remerciements à **Dr. Boughamssa Wassila**, maître de conférences à l'université de Skikda, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Je tiens à lui témoigner ma profonde reconnaissance pour sa disponibilité, son engagement et l'intérêt qu'elle va porter à mon travail. Sa présence et son expertise vont grandement enrichir cette étape importante de mon parcours.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à **Dr. Abdelouahed Assia**, maître de conférences à l'université de Skikda, **Dr. Khaldi Nacira** et **Dr. Kechkar Chiraz**, maîtres de conférences à l'université de Guelma, ainsi que **Dr. Amouri Chahinez**, maître de conférences à l'université de Constantine, pour l'honneur qu'elles m'ont faites en acceptant d'examiner ce travail. Je leur témoigne toute ma reconnaissance pour le temps précieux qu'elles vont consacrer pour la lecture attentive et à l'analyse critique de ma thèse, ainsi que pour l'intérêt qu'elles vont porter à ce projet.

Je tiens à adresser mes remerciements à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil de l'université de Skikda pour leurs précieux conseils et leur soutien tout au long de mon travail de recherche. Je souhaite également exprimer ma gratitude aux responsables, ingénieurs et techniciens du laboratoire de génie civil et du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC-Skikda), notamment à **Mme. Boussalia Linda**, **Mme. Hdji Fahima** et **Mme Zitouni Razika**, pour leur accueil chaleureux, leurs conseils avisés et leur aide précieuse dans la réalisation de certains essais. Leur collaboration a été essentielle à l'avancement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma chère collègue et amie, **Dr. Mansouri Ouarda**, dont la présence à mes côtés a été inestimable tout au long de ce parcours. Son soutien inébranlable, tant sur le plan professionnel que personnel, a été une véritable source de motivation et de réconfort. A chaque étape, dans les moments de doute comme dans ceux de réussite, elle a su me prodiguer des conseils avisés et des encouragements qui m'ont permis d'avancer avec confiance. Sa générosité, sa bienveillance et sa capacité à toujours trouver les mots justes ont grandement contribué à la réussite de ce projet. Je lui en suis profondément reconnaissante.

J'exprime ma sincère et profonde gratitude à mes chères collègues et amies, **Dr. Boughamssa Wassila**, **Dr. Abdelouahed Assia** et **Dr. Mouats Ouacila** de l'université de Skikda, **Dr. Djebri Noura** de l'université de Msila et **Mme. Meziani Nedjma** de l'université de Ouargla, pour leurs encouragements constants et leurs précieuses contributions à l'accomplissement de cette thèse. Leur soutien moral, leurs conseils éclairés ont été des éléments clés qui m'ont aidé à surmonter les défis rencontrés tout au long de ce travail. Je leur en suis infiniment reconnaissante.

Finally, I want to express my immense gratitude to my husband, whose unwavering support and encouragement allowed me to pursue this thesis with serenity and determination. I also want to thank from the bottom of my heart my dear daughter **Aya**, who brought me so much happiness and joy, adding a new dimension and a special flavor to my life. Their presence by my side has been an invaluable source of motivation and comfort.

To all those who have supported me, I offer my thanks, my respect, and my gratitude.

Dédicace

A la mémoire de mes parents

A mon mari

A ma chère fille Aya

A mes Frères Atef et Alla Eddine

A mes Sœurs Achwak, Aida, Imene et Rim

A mes neveux Islam, Oussama et Raid

A mes nièces Safa et Marwa

A toute ma famille

A tous mes Amis.

Résumé

La réutilisation de matériaux résiduels, en particulier les déchets de granit et le clinker cuit ou mal-cuit, dans la formulation du béton de sable est le sujet de ce travail, dans le but de conserver les ressources naturelles et de protéger l'environnement dans le cadre du développement durable. Cependant, dans le cadre de l'exécution de ce travail, nous avons remplacé le sable ordinaire utilisé dans le béton de sable par du sable recyclé. De manière distincte, nous avons incorporé des déchets de granite et du clinker recyclé à des taux de 20% et 40%. Ensuite, nous avons réalisé une série d'évaluations sur les différentes formulations. Ces évaluations comprenaient la densité, la maniabilité et la teneur en air, ainsi que la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le scléromètre, l'ultrason, le module d'élasticité et la diffraction des rayons X. De plus, nous avons analysé des paramètres de durabilité tels que l'absorption d'eau, la variation pondérale et dimensionnelle avant et après des cycles de gel-dégel, les attaques chimiques par des acides et des bases et la pénétration du chlorure sur le béton durci. Nous avons comparé ces résultats avec des échantillons de référence et avons pris en compte les corrélations entre les différents paramètres. En conséquence, les résultats obtenus démontrent une amélioration de la maniabilité, des performances mécaniques, de la dureté et de l'homogénéité, avec une amélioration de la microstructure. De plus, les paramètres de durabilité étaient acceptables, avec une légère diminution de la vitesse ultrasonique et du module d'élasticité après des cycles de gel-dégel. Ainsi, il existe une bonne corrélation entre les différents paramètres. À la lumière de cela, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les bétons à base de SC par rapport aux bétons à base de SG.

Mots clés: Béton de sable, déchets de granite, clinker recyclé, valorisation, performance, durabilité, microstructure.

Abstract

The reuse of waste, particularly granite and improperly or under-fired clinker waste, in the formulation of sand concrete, is the focus of this work, aimed at conserving natural resources and protecting the environment within the framework of sustainable development. To conduct this study, ordinary sand used in sand concrete was replaced with recycled sand. Specifically, we incorporated granite waste (SG) and recycled clinker (SC) at rates of 20% and 40%. We then conducted a series of evaluations on the different formulations produced. These assessments included fresh-state properties (density, workability, and air content), as well as hardened-state properties such as compressive strength, flexural tensile strength, Schmidt hammer test, ultrasonic pulse velocity, elastic modulus, and X-ray diffraction (XRD). Furthermore, we analysed durability parameters, such as water absorption, weight and dimensional variations before and after freeze-thaw cycles, chemical attacks, and chloride penetration in the hardened concrete. These results were compared with reference samples, and possible correlations between the different parameters were considered. As a result, the outcomes demonstrated an improvement in workability, mechanical performance, hardness, and homogeneity, with an enhanced microstructure. Additionally, durability parameters were acceptable, with a slight reduction in ultrasonic velocity and elastic modulus after freeze-thaw cycles. Thus, there was a good correlation between the different parameters. In conclusion, the best results were obtained with SC-based concretes compared to SG-based concretes.

Keywords: Sand concrete, granite waste, recycled clinker, valorisation, performance, durability, microstructure.

ملخص

يتمحور هذا العمل حول إعادة استخدام النفايات، وخاصة بقايا الغرانيت والكلنكر غير المحترق أو المحترق بشكل غير كافٍ، في تركيب الخرسانة الرملية بهدف الحفاظ على الموارد الطبيعية وحماية البيئة في إطار التنمية المستدامة. لتنفيذ هذه الدراسة، تم استبدال الرمل العادي المستخدم في الخرسانة الرملية بالرمل المعاد تدويره. تحديداً، قمنا بإدماج بقايا الغرانيت (SG) والكلنكر المعاد تدويره (SC) بنسب 20٪ و40٪. بعد ذلك، أجرينا سلسلة من التقييمات على التركيب المختلفة المنتجة. تضمنت هذه التقييمات الخصائص في الحالة الطازجة (الكثافة، قابلية التشغيل، و الهواء المحجوز)، بالإضافة إلى الخصائص في الحالة الصلبة مثل مقاومة الضغط، مقاومة الشد بالانحناء، اختبار مطرقة شميدت، سرعة الموجات فوق الصوتية، معامل المرونة، والتحليل بواسطة الأشعة السينية. علاوة على ذلك، قمنا بتحليل معايير الديمومة، مثل امتصاص الماء، التغيرات في الوزن والأبعاد قبل وبعد دورات التجميد والذوبان، الهجمات الكيميائية، واختراق الكلوريد في الخرسانة الصلبة. تم مقارنة هذه النتائج مع العينات المرجعية، وأخذت في الاعتبار العلاقات المحتملة بين المعايير المختلفة. نتيجة لذلك، أظهرت النتائج تحسناً في قابلية التشغيل، الأداء الميكانيكي، الصلابة، والتجانس، مع تحسين في البنية الدقيقة. بالإضافة إلى ذلك، كانت معايير الديمومة مقبولة، مع انخفاض طفيف في سرعة الموجات فوق الصوتية ومعامل المرونة بعد دورات التجميد والذوبان. وهكذا، كان هناك ارتباط جيد بين المعايير المختلفة. في الختام، تم الحصول على أفضل النتائج مع الخرسانة القائمة على الكلنكر المعاد تدويره مقارنة بالخرسانة القائمة على نفايات الغرانيت.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية، بقايا الغرانيت، الكلنكر المعاد تدويره، التثمين، الأداء، الديمومة، البنية الدقيقة.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Introduction générale	1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Introduction	3
I.2. Déchets dans le domaine de génie civil	3
I.2.1. Définition des déchets	3
I.2.2. Différents types des déchets	4
I.2.3. Différentes techniques de valorisation des déchets	4
I.2.4. Enjeux de la valorisation des déchets dans le béton	5
I.3. Valorisation des déchets comme matériau de construction	6
I.3.1. Déchets de construction et de démolition	7
I.3.2. Déchets de céramiques	7
I.3.3. Déchets de marbre	8
I.3.4. Déchets de bois	9
I.3.5. Déchets de plastiques	10
I.3.6. Déchets de verres	11
I.3.7. Déchets de granite et de clinker recyclé	12
I.3.7.1. Déchets de granite	12
I.3.7.2. Clinker recyclé	15
I.4. Conclusion	17

Chapitre II : Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction	18
II.2. Matériaux utilisés	18
II.2.1. Le ciment	18
II.2.2. Sables	20
II.2.2.1 Sable ordinaire	20
II.2.2.2 Sables recyclés	21
a. Sable de déchet de granite	21
b. Sable de clinker recyclé	23
II.2.3. Fines calcaires	24
II.2.4. Adjuvant	25
II.2.5. Eau de gâchage	25
II.3. Conclusion	26

Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction	28
III.2. Programme expérimental et formulation des mélanges	28
III.2.1. Programme expérimental	28
III.2.2. Méthode de formulation	29
III.2.3. Formulation des mélanges	29
III.2.4. Fabrication des mélanges	30
III.2.4.1. Malaxage des bétons	30
III.2.4.2. Remplissage et vibration	31
III.2.4.3. Conservation des éprouvettes	31
III.2.4.4. Essais effectués	32
III.3. Méthodes d'essais	33
III.3.1. Essais effectués sur le béton frais	33
III.3.1.1. Masse volumique	33
III.3.1.2. Ouvrabilité	33
III.3.1.3. Air occlus	34
III.3.2. Essais effectués sur le béton durci	35
III.3.2.1. Essai de traction par flexion	35
III.3.2.2. Essai de compression	35
III.3.2.3. Essai d'ultrason	36
III.3.2.4. Essai au scléromètre	37
III.3.2.5. Essai de l'absorption d'eau par immersion	38
III.3.2.6. L'essai de porosité accessible à l'eau	39
III.3.2.7. Essai d'absorption capillaire et sorptivité	40
III.3.2.8. Variation pondérale (perte/gain en masse)	41
III.3.2.9. Variation dimensionnelle (retrait et gonflement)	42
III.3.2.10. Essai des attaques chimiques	43
III.3.2.11. Essai de pénétration des chlorures	44
III.3.2.12. Les essais de gel/dégel	47
III.3.2.13. Diffraction des rayons X(DRX)	47
III.4. Conclusion	48

Chapitre IV : Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable

IV.1. Introduction	50
IV.2. Effet du taux de substitution sur les propriétés du béton à l'frais	50
IV.2.1. Masse volumique	50
IV.2.2. Ouvrabilité	51
IV.2.3. Air occlus	51
IV.3. Effet du taux de substitution sur les propriétés à l'état durci	52
IV.3.1. Densité à l'état durci	52
IV.3.2. Résistance en compression	53
IV.3.3. Résistance à la traction par flexion	54

IV.3.4. Résistance en compression obtenue par scléromètre	55
IV.3.5. Vitesse ultrasonique	57
IV.3.6. Résistance en compression obtenue par la méthode combinée	58
IV.3.7. Etude structurale par DRX	58
IV.4. Conclusion	59

V. Effet du taux de substitution des sables recyclés sur les paramètres de durabilité

V.1. Introduction	61
V.2. Variations pondérales et dimensionnelles	61
V.2.1. Retrait total et perte en masse	61
V.2.2. Gonflement et gain en masse	63
V.3. Absorption par immersion	65
V.4. Porosité accessible à l'eau	65
V.5. Absorption capillaire et sorptivité	66
V.6. Pénétration des ions des chlorures	67
V.7. Attaques chimiques	69
V.7.1. Pertes en masse dans les milieux agressifs	69
V.7.1.1. Pertes en masse pour une solution de 4% d'acide acétique CH_3COOH	69
V.7.1.2. Pertes en masse pour une solution de 4% de l'acide chlorhydrique HCl	71
V.7.1.3. Pertes en masse pour une solution de 4% de l'acide sulfurique H_2SO_4	72
V.7.1.4. Pertes en masse pour une solution de 4% de L'hydroxyde de sodium NaOH	74
V.7.2. Pertes des résistances dans les milieux agressifs	75
V.7.2.1. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% CH_3COOH	75
V.7.2.2. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% HCl	76
V.7.2.3. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% H_2SO_4	77
V.7.2.4. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% NaOH	78
V.8. Comportement des différents bétons exposé au cycle de gel/dégel	79
V.8.1. Variation dimensionnelle après gel/dégel	79
V.8.2. Variation pondérale	80
V.8.3. Observation visuelle de la dégradation	80
V.8.4. Vitesse ultrasonique	81
V.8.5. Module d'élasticité	82
V.9. Conclusion	82
Conclusions générales	85
Références bibliographiques	88

Liste des figures

Figure I-1: Déchets de construction et de démolition	7
Figure I-2: Déchets de céramiques	8
Figure I-3: Déchets de marbre	9
Figure I-4: Des déchets de bois	10
Figure I-5: Déchets de plastique	11
Figure I-6: Déchets de verre	12
Figure I-7: Déchets de granites	13
Figure I-8: Poussière de four de cimenterie CKD	16
Figure I-9: Clinker mal cuit ou incuit	16
<hr/>	
Figure II-1: CEM II de Hadjar soud – Skikda	18
Figure II-2: Mesure de la densité	19
Figure II-3: Mesure de la surface spécifique de Blaine	19
Figure II-4: Sables des dunes	20
Figure II-5: Sables des déchets de granite	22
Figure II-6: Sables de clinker recyclé	23
Figure II-7: Distribution granulométrique des sables	24
Figure II-8: Fines calcaire	25
<hr/>	
Figure III-1: Malaxage	30
Figure III-2: Eprouvettes avant le démoulage	31
Figure III-3: Conservation des éprouvettes dans l'eau	31
Figure III-4: Mesure de la masse volumique du béton frais	33
Figure III-5: Affaissement au cône d'Abrams	34
Figure III-6: Aéromètre à mortier	34
Figure III-7: Essai de traction par flexion trois points	35
Figure III-8: Résistance à la compression	36
Figure III-9: Essai ultrasonique	37
Figure III-10: Essai au scléromètre	38
Figure III-11: Essai d'absorption d'eau par immersion	39
Figure III-12: Essai de porosité accessible à l'eau	40
Figure III-13: Essai d'absorption capillaire	40
Figure III-14: Essai perte en masse	42
Figure III-15: Mesure de la variation dimensionnelle (retrait et gonflement)	42
Figure III-16: Conservation des éprouvettes destiné aux retrait et gonflement	43
Figure III-17: Essai des attaques chimiques	44
Figure III-18: Essai de compression sur éprouvette soumis à l'attaque chimique	44
Figure III-19: paraffinage des éprouvettes	45
Figure III-20: Conservation des éprouvettes dans une solution de 5% des chlorures de sodium NaCl	45
Figure III-21: Eprouvette coupée en deux et versement du AgNO ₃	46
Figure III-22: Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures	46
Figure III-23: Mesure de pH	47
Figure III-24: Diffractomètre DRX (Philips, X'Pert)	48

Figure IV-1: Evolution de la densité en fonction du taux de substitution	50
Figure IV-2: Evolution de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution	51
Figure IV-3: Evolution de la teneur en air occlus en fonction du taux de substitution	52
Figure IV-4: Evolution de la densité à l'état durci en fonction du taux de substitution	52
Figure IV-5: Influence du taux de substitution et du type de sable sur la résistance en compression	53
Figure IV-6: Corrélation entre la résistance en compression et la densité	54
Figure IV-7: Influence du taux de substitution et du type de sable sur la résistance en traction par flexion	54
Figure IV-8: Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction par flexion	58
Figure IV-9: Résistance en compression obtenue par scléromètre	56
Figure IV-10: Variation de l'indice rebondissement en fonction du taux de substitution et type de sable	56
Figure IV-11: Corrélation entre la résistance en compression obtenue par essai destructif et l'indice de rebondissement	57
Figure IV-12: Variation de l'UPV en fonction du taux de substitution et type de sable	57
Figure IV-13: Résistance en compression obtenue par la méthode combinée	58
Figure IV-14: Analyse par diffraction des rayons X (XRD)	59
<hr/>	
Figure V-1: Influence du taux de substitution et type de sable sur le retrait	62
Figure V-2: Influence du taux de substitution et type de sable sur la perte en masse	62
Figure IV-3: Influence du taux de substitution et type de sable sur le gonflement	63
Figure V-4: Influence du taux de substitution et type de sable sur le gain en masse	64
Figure V-5: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution et type de sable	65
Figure V-6: Porosité accessible à l'eau en fonction du taux de substitution et type de sable	66
Figure V-7: Absorption d'eau par capillarité en fonction du temps	66
Figure V-8: Variation du coefficient de sorptivité	67
Figure V-9: Pourcentage de pénétration des chlorures.	68
Figure V-10: Profondeur de la pénétration des ions chlorure sur les échantillons de béton.	68
Figure V-11: pH des bétons exposé aux attaques par les chlorures.	69
Figure V-12: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% CH ₃ COOH	69
Figure V-13: Eprouvettes traitées par l'acide CH ₃ COOH	70
Figure V-14: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% HCl	71
Figure V-15: Eprouvettes traitées par l'acide HCl	72
Figure V-16: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% H ₂ SO ₄	73
Figure V-17: Eprouvettes traitées par l'acide H ₂ SO ₄	73
Figure V-18: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% NaOH	74
Figure V-19: Eprouvettes traitées par l'acide NaOH	75
Figure V-20: Perte de résistance en compression dans CH ₃ COOH	75

Figure V-21: Perte de résistance en compression dans HCl	76
Figure V-22: Perte de résistance en compression dans H ₂ SO ₄	77
Figure V-23: Perte de résistance en compression dans NaOH	78
Figure V-24: Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycles de gel/dégel	79
Figure V-25: Variation pondérale en fonction du nombre de cycles de gel/dégel	80
Figure V-26: Observation visuelle des éprouvettes après les cycles gel/dégel	81
Figure V-27: UPV des bétons avant et après les cycles de gel/dégel	81
Figure V-28: Modules d'élasticités des bétons avant et après les cycles de gel/dégel	82

Liste des tableaux

Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment	20
Tableau II-2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	20
Tableau II-3: Caractéristiques physiques de sable ordinaire (SD)	21
Tableau II-4: Composition chimique de sable ordinaire	21
Tableau II-5: Caractéristiques physiques de sable de déchets de granite	22
Tableau II-6: Composition chimique de sable de déchets de granite	22
Tableau II-7: Caractéristiques physiques de sable de clinker recyclé	23
Tableau II-8: Composition chimique de sable de clinker recyclé	23
Tableau II-9: Analyse chimique des fines calcaires	24
Tableau II-10: Propriétés physiques et chimiques de l'adjuvant	25
Tableau II-11: Analyse chimique de l'eau	25

Tableau III-1: Différentes compositions des mélanges pour les différentes formulations	28
Tableau III-2: Composition des mélanges	30

Introduction générale

Introduction générale

L'accroissement de la population mondiale et l'évolution des habitudes de consommation ont fait que nos ressources naturelles diminuent de jour en jour. Les changements climatiques ainsi que la décroissance rapide des ressources naturelles posent de sérieux problèmes environnementaux notamment au cours des dernières décennies. C'est pourquoi il est impératif de réduire la consommation des matériaux et d'utiliser efficacement les ressources naturelles disponibles par le recyclage des déchets.

La construction est l'un des secteurs dans lequel la matière première est la plus consommée. En effet, la surexploitation de certains granulats comme le sable dans la préparation des mortiers et bétons a conduit à sa pénurie et les rejets des déchets du secteur industriel et de construction et les chutes et débris de certains matériaux qui sont inexploités et rejetés dans la nature nuisent à cette dernière et ont des répercussions négatives sur l'environnement.

De nombreux travaux de recherche ont été menés concernant la valorisation des déchets destinés à être utilisés comme granulats dans les mortiers et divers types de béton et en particulier le béton de sable qui se développe ces dernières années surtout en Algérie. Les déchets en question comprennent du béton de démolition, des chutes de carrelage et de céramique, des briques et de parpaing, ainsi que des déchets de marbre et de granite. De plus, les déchets de l'industrie cimentaire, tels que la boue, le CKD et le clinker mal cuit ou incuit qui est dû principalement aux erreurs de pilotage de la phase de cuisson, de fluctuations de température ainsi qu'aux arrêts et redémarrage du four à cause des coupures d'électricité, de panes ou des arrêts planifiés, tous ces déchets ont été utilisés soit sous forme de granulats fins, soit sous forme de graviers. Ces déchets recyclés ont ensuite été utilisés pour remplacer partiellement ou totalement les granulats ordinaires dans les différents types de matériaux de construction pour évaluer l'impact des granulats recyclés sur les propriétés de ces matériaux à l'état frais et durci, ainsi que sur leurs paramètres de durabilité.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette recherche est de contribuer à valoriser les débris de granite issu de la construction et les déchets de l'industrie cimentaire notamment le clinker incuit ou mal cuit comme granulats fins dans la composition du béton de sable en vue de la préservation des ressources naturelles, à la diminution des déchets ainsi qu'à la réduction des émissions, qui participent à leur tour de manière capitale à la protection de l'environnement.

L'étude est basée sur le remplacement partiel du sable ordinaire d'un béton de sable par des sables de déchets de granite et clinker recyclé avec des taux de 20% et 40% et étudie l'effet de ces sables recyclés sur les propriétés du béton. La valorisation de ces déchets dans ce type de béton permet de:

- ✓ Développer des nouveaux matériaux de construction écologiques et durables,
- ✓ Conserver les ressources naturelles,
- ✓ Trouver d'autres sources de matériaux de construction,
- ✓ Eliminer les déchets par réutilisation et recyclage,
- ✓ Protéger l'environnement.

Cette thèse est structurée et divisée en cinq chapitres détaillés comme suit:

Le premier chapitre est une étude bibliographique sur la valorisation des déchets dans le domaine du génie civil, avec un focus particulier sur la valorisation des déchets de granite et de clinker recyclé. Cette section examine les recherches existantes concernant l'utilisation de ces matériaux recyclés dans la construction, en mettant en évidence leurs avantages potentiels pour améliorer les propriétés mécaniques et de durabilités du béton et réduire l'empreinte environnementale des projets de construction.

Le deuxième chapitre se consacre à la provenance et à la caractérisation des matériaux employés dans cette étude, à savoir les matériaux de base tels que le sable de dune, le ciment, les fines calcaires, l'adjuvant, ainsi que les matériaux élaborés, à savoir le sable de déchet de granite et le clinker recyclé. Ce chapitre expose les résultats des essais de caractérisation réalisés pour chaque matériau impliqué dans cette recherche.

Le programme expérimental, la formulation des différentes compositions et les méthodes de fabrication de chaque essai sont décrits dans le troisième chapitre. Ce chapitre fournit un aperçu complet des principaux tests effectués sur les différentes formulations utilisées dans cette recherche.

Le chapitre quatre présente les résultats et les discussions sur l'effet du taux de substitution et du type de granulats sur les propriétés physico-mécaniques du béton de sable. Nous exposerons les résultats concernant les propriétés physiques du béton à l'état frais (densité, ouvrabilité et air occlus), les propriétés mécaniques à l'état durci (résistances à la compression et à la traction par flexion, dureté de surface et auscultation sonore), et DRX. Cette section examine donc l'impact du taux de substitution sur les performances du béton, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Le chapitre cinq présente les résultats et les discussions concernant l'effet du taux de substitution et du type de granulats sur les paramètres de durabilité, notamment l'absorption d'eau par immersion, l'absorption d'eau par capillarité, la sorptivité, la pénétration des chlorures, la résistance au gel-dégel, et les attaques chimiques par des solutions de 4% de concentration d'acides et de bases (CH_3COOH , HCl , NaOH et H_2SO_4) ainsi que les variations pondérales (perte et gain en masse) et dimensionnelles (retrait total et gonflement).

La recherche aboutit à une conclusion exhaustive synthétisant l'ensemble des résultats, mettant en lumière particulièrement le potentiel d'incorporation de déchets de granite et de clinker recyclé dans le béton de sable. Par ailleurs, plusieurs recommandations et perspectives d'avenir sont formulées afin d'orienter des explorations plus approfondies dans ce domaine.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I. Recherche bibliographique

I.1. Introduction

La valorisation des déchets dans l'industrie de la construction est devenue une préoccupation majeure dans le contexte actuel de développement durable. L'augmentation exponentielle des déchets industriels et urbains pose des défis environnementaux significatifs, notamment en termes de gestion et de recyclage. Parmi les solutions innovantes pour réduire l'empreinte écologique de ces déchets, leur incorporation dans les matériaux de construction, et plus particulièrement dans le béton de sable, émerge comme une option prometteuse.

Le béton de sable, connu pour sa grande utilisation dans les constructions légères et les éléments non porteurs, présente une opportunité unique pour l'intégration des matériaux recyclés. En remplaçant partiellement ou totalement les composants traditionnels par des déchets recyclés, tels que les débris de construction, les cendres volantes ou encore les plastiques broyés, il est possible non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais également de diminuer la consommation de ressources naturelles vierges.

Cette démarche de valorisation des déchets dans le béton de sable s'inscrit dans une dynamique d'économie circulaire, où les résidus deviennent des ressources. Elle offre des avantages économiques, en réduisant les coûts de matière première, et environnementaux, en limitant les émissions de gaz à effet de serre associées à la production de matériaux conventionnels. De plus, elle contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des impacts négatifs liés à l'extraction et au traitement des matières premières.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer les différentes possibilités de valorisation des déchets et en particulier les déchets de granite et de clinker recyclé (incuit et mal cuit) dans le béton de sable, en évaluant les impacts sur les propriétés mécaniques et durables du matériau. Il s'agit également de déterminer les conditions optimales pour maximiser les bénéfices environnementaux tout en maintenant des standards de qualité et de performance élevés.

I.2. Déchets dans le domaine de génie civil

L'impact des déchets dans le génie civil est un sujet essentiel qui nécessite une attention particulière afin de minimiser les conséquences négatives sur l'environnement et la société. La gestion appropriée des déchets dans ce domaine est cruciale pour promouvoir le développement durable et assurer la durabilité des projets de construction (**Anastasiades et al., 2021**). Cette partie vise à explorer les différents types de déchets, les méthodes de quantification, la gestion des déchets, les technologies innovantes, ainsi que les initiatives de sensibilisation et de recherche pour améliorer la gestion globale des déchets dans le génie civil.

I.2.1. Définition des déchets

Les déchets sont des substances ou des objets dont le détenteur se défait ou a l'intention ou l'obligation de se défaire. Ils résultent de diverses activités humaines, industrielles, agricoles, ou domestiques, et peuvent se présenter sous plusieurs formes: solides, liquides, ou gazeuses. Les déchets peuvent inclure des matières premières inutilisées, des produits en fin de vie, des résidus de production, ou des matériaux excédentaires. La gestion des déchets implique leur collecte, leur transport, leur traitement, et leur élimination, ainsi que leur réutilisation ou recyclage pour minimiser leur impact sur l'environnement et favoriser le développement

durable. Les déchets utilisés comme substituant dans le béton sont des matériaux de recyclage ou des sous-produits industriels qui remplacent une partie des constituants traditionnels du béton, tels que le ciment, les granulats fins ou les granulats grossiers (**Balet, 2023**).

1.2.2. Différents types des déchets

Les déchets sont généralement classés en plusieurs catégories (**Moustafa, 2021**):

- Déchets inertes; ces déchets ne possèdent aucune propriété dangereuse pour l'environnement et ne subissent pas de transformations physiques, chimiques ou biologiques importantes dans des conditions de stockage ou d'élimination normales. Ces types de déchets sont faciles à recycler ou à réutiliser. Ils constituent environ 90% des déchets produits et incluent des matériaux tels que le béton, les briques, les tuiles, les gravats et les terres excavées. Les déchets inertes sont caractérisés par leur stabilité chimique et physique, ce qui signifie qu'ils ne subissent pas de décomposition, ne brûlent pas, ne produisent pas de réactions chimiques significatives, et ne contaminent pas l'eau ou les sols. Cette inertie les rend particulièrement adaptés à des usages où la durabilité et la neutralité environnementale sont requises.

- Déchets non inertes; cette catégorie englobe les déchets susceptibles de poser des risques pour l'environnement ou la santé humaine. Contrairement aux déchets inertes, ces déchets peuvent subir des modifications physiques, chimiques ou biologiques. Ils sont susceptibles de réagir avec d'autres substances ou de se décomposer, libérant potentiellement des substances nocives dans l'environnement. Ils représentent environ 10% du total des déchets et comprennent des matériaux tels que le bois traité, les métaux, les plastiques, les plaques de plâtre, les peintures, les vernis, les isolants, les vitrages et les matériaux composites. En raison de leur composition, les déchets non inertes peuvent contenir des substances toxiques ou dangereuses. Cela nécessite une gestion et un traitement spécifiques pour prévenir tout impact négatif sur l'écosystème et la santé publique, notamment à travers des méthodes de traitement adaptées et une réglementation stricte concernant leur collecte, leur stockage et leur élimination.

En identifiant correctement ces différentes catégories de déchets, il est possible de mettre en œuvre des stratégies de gestion des déchets plus efficaces et durables. Cela inclut le tri à la source, le recyclage, la valorisation énergétique, et le traitement approprié des déchets dangereux pour minimiser les impacts environnementaux et protéger la santé publique.

1.2.3. Différentes techniques de valorisation des déchets

La valorisation des déchets englobe un ensemble de techniques visant à transformer les déchets en ressources utiles, contribuant ainsi à une gestion plus durable des matériaux. Les principales techniques de valorisation des déchets (**Hou, 2021**):

- Recyclage; le recyclage consiste à traiter et transformer les déchets pour qu'ils puissent être réutilisés dans la production de nouveaux produits. Par exemple, les déchets plastiques peuvent être fondus et moulés en nouveaux objets, les métaux peuvent être fondus et purifiés, et les papiers et cartons peuvent être réutilisés pour fabriquer de nouveaux produits en papier.

- Compostage; le compostage est une technique biologique qui permet de transformer les déchets organiques, tels que les restes de nourriture, les feuilles, et les résidus de jardin, en compost.

- Valorisation énergétique; cette technique consiste à utiliser les déchets pour produire de l'énergie. Cela peut se faire par incinération, où les déchets sont brûlés pour produire de la chaleur et de l'électricité, ou par méthanisation, un processus biologique qui transforme les déchets organiques en biogaz, utilisé comme source d'énergie renouvelable. La valorisation énergétique permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans les déchets, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.
- Réutilisation; la réutilisation implique l'utilisation directe de produits ou de matériaux, sans transformation importante, dans leur forme d'origine ou pour une nouvelle utilisation. Cette technique prolonge la durée de vie des produits et réduit la demande de nouvelles ressources.
- Valorisation matière; cette technique se concentre sur la récupération de matériaux spécifiques à partir de déchets complexes pour les réintroduire dans le cycle de production. Par exemple, dans le secteur de la construction, les granulats recyclés provenant de la démolition de bâtiments peuvent être réutilisés dans la fabrication de nouveaux bétons.
- Éco-conception; bien qu'elle ne soit pas une technique de valorisation en soi, l'éco-conception est une approche proactive qui vise à concevoir des produits en prenant en compte leur fin de vie dès le stade de la conception. Cela inclut la facilité de démontage, la réduction des matériaux nocifs, et l'amélioration du recyclage.

Ces différentes techniques de valorisation des déchets permettent non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais aussi de préserver les ressources naturelles, de réduire les émissions de gaz à effet de serre, et de promouvoir une économie circulaire. En combinant ces approches, il est possible d'optimiser la gestion des déchets et de favoriser une utilisation plus responsable des ressources.

1.2.4. Enjeux de la valorisation des déchets dans le béton

La valorisation des déchets dans le béton représente un enjeu majeur pour l'industrie de la construction, à la fois sur le plan environnemental, économique et technique (**Balet, 2023**).

- Environnemental; l'intégration de déchets, tels que les granulats recyclés, les cendres volantes, les scories, ou encore les déchets de verre, permet de réduire l'extraction de matières premières naturelles comme le sable et le gravier, préservant ainsi les ressources naturelles. De plus, en réutilisant des matériaux issus de déchets, on diminue la quantité de déchets envoyés en décharge, réduisant l'empreinte carbone globale de la production de béton.
- Économique; l'utilisation de matériaux recyclés réduit le coût de production, car les déchets récupérés sont généralement moins chers que les matières premières vierges. De plus, elle offre des opportunités de marché aux entreprises capables d'utiliser de nouvelles technologies ou de nouveaux matériaux pour fabriquer des produits en béton. La récupération des déchets contribue également à réduire le montant consacré aux activités de gestion des déchets, car le processus transforme un sous-produit de déchet en une ressource précieuse et commercialisable.
- Technique; l'incorporation de déchets dans le béton pose des défis techniques, car il est essentiel de garantir que les matériaux recyclés ne compromettent pas les performances mécaniques, la durabilité ou la sécurité des structures en béton. Cependant, les avancées dans la recherche et le développement ont permis d'optimiser les formulations de béton contenant

des déchets, assurant ainsi des performances comparables, voire supérieures, à celles des bétons traditionnels. Cela implique également un contrôle rigoureux de la qualité des déchets utilisés et des procédés de traitement pour s'assurer qu'ils répondent aux normes nécessaires pour la construction.

En conclusion, la valorisation des déchets dans le béton s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et de développement durable, offrant des bénéfices environnementaux, économiques, et techniques. Elle permet de répondre aux défis actuels liés à la gestion des ressources et des déchets, tout en ouvrant la voie à des innovations dans le secteur de la construction.

I.3. Valorisation des déchets comme matériau de construction

Le secteur de la construction est l'un des plus gros producteurs de déchets au monde, par exemple, en France, on estime que près de 200 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition sont générés chaque année. Ces déchets, s'ils ne sont pas gérés correctement, peuvent avoir des impacts environnementaux importants comme la pollution des sols et des eaux, gaspillage de ressources naturelles, augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Face à ces enjeux, la valorisation des déchets de construction devient un enjeu majeur pour l'environnement et l'économie (**Moustafa, 2021**).

De nombreuses études ont exploré la valorisation des déchets dans le domaine de la construction, notamment dans la fabrication du béton. Ces recherches ont porté sur l'intégration de matériaux variés tels que les déchets plastiques, le verre de bouteille, les déchets radioactifs et les sédiments fins, afin d'améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité du béton tout en réduisant son empreinte environnementale. Les résultats montrent que l'incorporation de ces déchets non seulement renforce les propriétés du béton, mais contribue également de manière significative à réduire l'impact environnemental lié à la production de matériaux de construction traditionnels.

La valorisation des déchets dans le secteur de la construction est cruciale pour répondre aux préoccupations environnementales et améliorer la durabilité. Plusieurs études ont exploré l'utilisation de divers types de déchets, tels que la boue rouge, les sédiments fins, les sous-produits industriels et agroalimentaires, ainsi que les matériaux recyclés, dans la fabrication de matériaux de construction plus écologiques. Par exemple, **Putrevu et al., (2021)** ont examiné l'intégration de la boue rouge pour produire des matériaux de construction plus propres, tandis que **Allariz et al., (2019)** ont montré que les sédiments peuvent être réutilisés dans des sous-couches routières, des mortiers et des bétons, s'inscrivant ainsi dans une logique d'économie circulaire. De plus, **Sivakrishna et al., (2020)** ont étudié l'utilisation de liants activés par les alcalis et de matériaux cimentaires supplémentaires pour promouvoir le béton écologique. L'incorporation de sous-produits tels que les scories de hauts fourneaux et d'autres matériaux d'ingénierie a également été analysée pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton (**Chyliński et Kuczyński, 2020; Ede et al., 2021; Shankar Chitalkar, 2024**). Les recherches récentes de **Gao, (2023)** et les tendances des dix dernières années de **Sandanayake et al., (2020)** soulignent le potentiel de ces pratiques pour remplacer les matériaux vierges, favorisant ainsi des pratiques de construction plus durables et répondant aux défis environnementaux actuels.

I.3.1. Déchets de construction et de démolition

Les déchets de construction et de démolition (figure I-1) occupent une place importante. Ces déchets, générés lors des activités de construction, de rénovation et de démolition, comprennent une grande variété de matériaux tels que le béton, les briques, le bois, le métal, le verre, le plastique et les matériaux d'isolation. Leur réutilisation dans de nouvelles constructions représente une démarche essentielle pour promouvoir une économie circulaire et renforcer la durabilité du secteur de la construction.

Ñañez-Silva et al., (2023) indiquent que les déchets de construction et de démolition peuvent être utilisés pour produire des briques aux compositions optimales répondant aux normes de l'industrie. Les déchets de béton ont été analysés aussi par Sekkel et al., (2021) pour déterminer leur impact sur le traitement de l'argile gonflante, ce qui a montré des résultats prometteurs en termes de réduction des paramètres de gonflement. Cela démontre le potentiel de valorisation des déchets dans les pratiques de construction. Pareillement, les déchets de construction sont valorisés dans la production de ciment afin de réduire la consommation de clinker, d'améliorer la durabilité environnementale et d'améliorer les propriétés du ciment, avec des résultats optimaux observés à 10% de substitution des déchets (Debouba et al., 2019).



Figure I-1: Déchets de construction et de démolition

I.3.2. Déchets de céramiques

D'autre type de déchets sont les déchets de céramiques (figure I-2) qui proviennent principalement des industries de la céramique. Ces déchets peuvent inclure des produits en fin de vie comme la vaisselle en céramique, les sanitaires, ou autres objets cassés. L'intégration des déchets de céramiques dans des processus de valorisation contribue à une gestion plus durable des ressources et à la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie de la construction.

Ocampo et González (2023) ont étudié la valorisation des déchets de céramiques dans le béton, dans les isolants électriques, en extrayant de l'alumine et en tant que barrière géologique, la fabrication du béton étant l'option la plus rentable sur le plan économique. De plus, Meena et al., (2022) ont étudié le béton à base de déchets de céramique et ont observé que sa densité,

à l'état frais et durci, diminue avec l'augmentation de la teneur en céramique. Bien que les propriétés durcies du béton diminuent en général avec plus de céramique, la résistance à la compression, à la flexion, à la traction par fendage et le module d'élasticité restent légèrement supérieurs à ceux du béton de référence. Le béton céramique présente une plus grande absorption d'eau, une meilleure résistance au gel-dégel, à l'abrasion, à l'attaque sulfurique, ainsi qu'une diminution de la pénétration des ions chlorure. La résistivité électrique augmente également avec la teneur en céramique, améliorant ainsi les propriétés de durabilité du béton.

L'utilisation de produits céramiques dans la construction augmente, entraînant une production croissante de déchets en raison de la fragilité de ces matériaux. Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'intégration de ces déchets comme agrégats alternatifs pour la construction. Bien que des études aient été menées sur certains déchets céramiques, peu de recherches existent sur les déchets de carreaux de mur et de sol.

L'étude de **Goyal et al., (2022)** quant à elle, se concentre sur la caractérisation mécanique et la perméabilité du béton incorporant ces déchets. Les carreaux céramiques ont été utilisés en remplacement partiel des agrégats naturels à différents niveaux (0% à 25%). Les résultats montrent que ces déchets peuvent améliorer les performances du béton à certains niveaux de remplacement, les rendant utiles pour des structures en béton spécifiques.



Figure I-2: Déchets de céramiques

I.3.3. Déchets de marbre

Les déchets de marbre (figure I-3) sont des résidus générés lors de l'extraction, la découpe, et le polissage du marbre, ainsi que lors de la démolition de structures contenant du marbre. Ces déchets incluent des fragments, de la poussière, des chutes de découpe, et des morceaux irréguliers ou endommagés qui ne peuvent pas être utilisés dans leur forme actuelle.

Des études récentes ont exploré le potentiel des déchets de marbre dans la production de béton comme alternative durable. Le remplacement partiel des granulats grossiers par des déchets de marbre jusqu'à 25% peut augmenter la résistance à la compression du béton de 18.97% (**Safari et Setiawan, 2023**). Cependant, lorsqu'il est utilisé comme remplacement du ciment, la poudre de marbre réduit généralement la résistance du béton, avec une diminution de 5.7% de la

résistance à la compression pour un remplacement de 10% (**Özkılıç et al., 2023**). Néanmoins, **Prakash et al., (2023)** ont trouvé que l'incorporation de 10% de déchets de marbre peut améliorer la résistance au chlorure de 20% et renforcer la durabilité lorsqu'elle est combinée à d'autres additifs comme les fumées de silice et les cendres volantes. Dans le béton autoplaçant, une combinaison de 10% de cendres de balle de riz en remplacement du ciment et de 30% de poudre de marbre en remplacement des granulats fins a permis d'obtenir une résistance à la compression de 40MPa après 28 jours (**Arumningsih et al., 2023**). Ces résultats suggèrent que les déchets de marbre peuvent être utilisés efficacement dans la production de béton, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables. D'autres études sur les effets de l'ajout de déchets de marbre au béton fabriqué à partir de granulats de briques recyclés ont été menées par **El Maghri et al., (2022)** pour valoriser les déchets inertes et non dangereux de l'industrie des matériaux de construction. La valorisation des déchets de marbre permet non seulement de réduire l'impact environnemental de l'industrie du marbre, mais aussi de contribuer à une économie circulaire en transformant des déchets en ressources utiles.



Figure I-3: Déchets de marbre

I.3.4. Déchets de bois

Les déchets de bois (figure I-4) proviennent principalement des activités de construction, de rénovation, de démolition, ainsi que des industries du bois (menuiserie, fabrication de meubles, etc.). Ils incluent divers types de bois, allant des chutes de bois brut aux vieux meubles, en passant par les palettes en bois et les déchets de bois traités. La valorisation des déchets de bois contribue à une gestion plus durable des ressources et aide à réduire l'impact environnemental de l'industrie du bois et de la construction.

Des études récentes ont exploré la valorisation des déchets de bois dans les mélanges de béton. L'optimisation des paramètres de fabrication tels que la pression de compactage et la température de séchage peut renforcer les propriétés mécaniques des composites bois-plastique (**Amadji et al., 2021**). Bien que l'augmentation de la teneur en poudre de déchets de bois diminue l'ouvrabilité, la densité et la résistance à la compression du béton, les mélanges résultants peuvent encore convenir pour des applications non porteuses (**Bourzik et al., 2022**). La concentration des substances lixiviables dans les déchets de bois varie selon la source, et l'incorporation de particules de bois réduit significativement les performances mécaniques du

béton (Al-Kaseasbeh et Al-Qaralleh, 2023; Dias et al., 2022). Malgré ces défis, l'utilisation des déchets de bois dans les matériaux de construction offre des avantages environnementaux et contribue à la conservation des ressources naturelles. Les stratégies de gestion des déchets de bois, basées sur l'analyse de la composition chimique, offrent des voies pour la production d'énergie, la mise en pâte et d'autres applications, contribuant ainsi à la durabilité et à la création d'opportunités d'emploi dans l'industrie (Pazzaglia et Castellani, 2023).



Figure I-4: Des déchets de bois

I.3.5. Déchets de plastiques

Les déchets de plastique (figure I-5), provenant d'emballages, de produits de consommation et d'industries, posent un défi environnemental majeur. Au niveau mondial, 15% des déchets plastiques sont collectés pour être recyclés, 25% sont incinérés et 60% sont mis en décharge. Leur valorisation passe par le recyclage mécanique et chimique, le réemploi, la valorisation énergétique, et l'usage de bioplastiques. Malgré les défis liés au tri et à la pollution, ces méthodes permettent de réduire la pollution, d'économiser des ressources, et de contribuer à une économie circulaire. Une gestion efficace est essentielle pour limiter l'impact environnemental du plastique.

Des études récentes ont exploré la valorisation des déchets plastiques dans le béton comme solution durable à la pollution plastique et à l'épuisement des ressources. En 2023, les chercheurs Houcine et al., (2023) et Sau et al., (2023) ont étudié le remplacement des granulats naturels de béton vert par divers types de déchets plastiques à différents pourcentages. Bien que l'incorporation de granulats plastiques réduise généralement la résistance à la compression du béton, elle peut améliorer d'autres propriétés telles que la réduction du poids et l'isolation acoustique. Diverses technologies de valorisation, y compris des approches thermiques, biologiques et physiques, ont été passées en revue pour transformer les déchets plastiques en matériaux avancés (Mong et al., 2024). L'analyse de la viabilité économique a montré que l'utilisation de granulats en plastique recyclé peut réduire les coûts de production du béton de 0.65% à 7.58% par rapport au béton conventionnel, selon le pourcentage de remplacement et le type de plastique utilisé (Saha et al., 2023). Ces résultats suggèrent que l'incorporation de

déchets plastiques dans le béton offre des avantages environnementaux, sociaux et économiques tout en contribuant au développement durable.



Figure I-5: Déchets de plastique

I.3.6. Déchets de verres

Les déchets de verre (figure I-6), provenant principalement d'emballages et de vitrages, peuvent être recyclés presque indéfiniment sans perte de qualité. Leur valorisation passe par le recyclage pour fabriquer de nouveaux contenants ou matériaux de construction, et par le réemploi pour créer des objets décoratifs. Cela permet de réduire les déchets en décharge, d'économiser de l'énergie, et de préserver les ressources naturelles. La gestion efficace du verre soutient une économie circulaire et réduit l'impact environnemental.

Des recherches récentes ont exploré la valorisation des déchets de verre dans le béton comme alternative durable aux matériaux traditionnels. Les études de **Dadouch et al., (2024)** ont montré que les déchets de verre peuvent partiellement remplacer le sable dans les mélanges de béton, avec des taux de substitution optimaux de 10 à 20%, tout en maintenant ou même en améliorant les propriétés mécaniques. L'incorporation de déchets de verre peut améliorer l'ouvrabilité et la durabilité du béton, en particulier en ce qui concerne les propriétés de transport et la résistance aux attaques chimiques. Cependant, il est important de prendre en compte la taille et le type des particules pour atténuer les réactions alcali-silice potentielles (**Berdnyk et Vyhovskyi, 2023; Mansour et al., 2023**). Les déchets de verre peuvent être utilisés sous diverses formes, y compris la poudre de verre, les granulats et les fibres, chacune offrant des avantages uniques pour les performances du béton. Cette approche non seulement répond aux préoccupations environnementales liées à l'élimination des déchets de verre, mais contribue également à réduire l'empreinte carbone de la production de béton (**Mansour et al., 2023; Maurya et al., 2023**)



Figure I-6: Déchets de verre

I.3.7. Déchets de granite et de clinker recycle

Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur les mortiers et différents types de bétons, explorant le remplacement partiel des granulats fins naturels et des ciments par diverses formes de déchets de granite et de clinker recyclé (incuit et mal cuit) comme des poudres, du sable et des granulats. Ces études visent à évaluer les effets de ces matériaux recyclés sur l'évolution des propriétés mécaniques et de la durabilité des bétons. En intégrant différents types de déchets dans la formulation du béton, les chercheurs cherchent à déterminer comment ces substitutions influencent la résistance, la flexibilité, la porosité et la longévité des structures en béton. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les avantages et les limitations de l'utilisation de matériaux recyclés dans le secteur de la construction, et contribuent à la promotion de pratiques plus durables et respectueuses de l'environnement.

I.3.7.1. Déchets de granite

Les déchets industriels comprennent une grande quantité de déchets minéraux, dont le granite. Ces gravats étaient jusqu'à présent mis en décharge, bien que le granite, une roche magmatique dure, possède de nombreuses qualités (haute capacité de charge, étanchéité) qui permettent son utilisation dans le secteur du bâtiment (dallage, couverture, etc.).

La valorisation des déchets de granite (figure I-7) consiste à réutiliser les résidus de l'extraction et de la transformation du granite dans diverses applications, telles que la production de granulats pour le béton, la création de produits décoratifs, et l'amélioration des sols agricoles. Cette pratique permet de réduire l'impact environnemental tout en offrant de nouvelles opportunités économiques. Elle joue un rôle crucial dans la construction durable et la gestion responsable des ressources naturelles.



Figure I-7: Déchets de granites

L'utilisation de granite dans le domaine de construction permet non seulement d'améliorer les propriétés des matériaux, mais aussi de réduire les coûts de production et de minimiser l'impact environnemental lié à l'élimination des déchets et à l'extraction de nouvelles matières premières.

Beaucoup de chercheurs ont été intéressés par la réutilisation des chutes de granites comme poudre fines qui remplace partiellement un ciment ou un sable dans la formulation d'un mortier ou d'un béton. **Gupta et Vyas (2018)** ont étudié la faisabilité de remplacer les granulats fins d'un mortier par des fines de déchets de granite, ils ont trouvé une amélioration dans l'ouvrabilité, une augmentation dans les performances mécaniques (compression et traction, impulsions ultrasonores et module d'élasticité dynamique) et de durabilité et en particulier de la force adhésive, l'absorption d'eau et le retrait au séchage. Par contre **Suárez-Navarro et al., (2022)** ont montré que les mélanges contenant des fines de granite donne des résistances en compression légèrement inférieure au mortier de référence, tandis que la substitution du sable par des fines de déchets de granite n'a induit aucune différence nette de résistance à la flexion par rapport au témoin. Les effets potentiels de l'utilisation des déchets de granite sur la durabilité accrue du mortier et béton, y compris l'abrasion, les cycles gel/dégel et la résistance aux attaques de sulfate ont été montré par l'étude de **Mashaly et al., (2018)**, ils ont conclu également que les déchets de granite peuvent être utilisés efficacement dans la production de briques en béton, d'unités de pavage et de carreaux de ciment. **Ramos et al., (2013)** ont trouvé une amélioration dans la résistance des mortiers aux chlorures et aux réactions alcali-silice par l'incorporation de 10% de particule fines de déchets de granite comme remplacement du ciment.

L'influence de la substitution partielle du sable d'un béton par les déchets de granite jusqu'à un taux de 25% a été l'objet du travail de **Allam et al., (2014)**. Ils ont trouvé un affaissement de l'ordre de 10cm et une résistance en compression plus élevée par rapport au béton témoin à tous les âges. Les mêmes constatations ont été observées par **Lakhani. et al., (2014)**, une diminution de l'affaissement on fonction de l'augmentation du taux de granulats fins de déchets de granites qui est due à la taille fine des particules de ces déchets, cette diminution de l'ouvrabilité pourrait être facilement améliorée avec l'utilisation de super plastifiants (**Singh et al., 2016**).

Vijayalakshmi et al., (2013) ont constaté que la substitution du sable ordinaire d'un béton jusqu'à 15% par des déchets granite poli favorise la création d'un béton qui répond aux exigences de résistance et de durabilité nécessaires. Cependant, ils ont conseillé qu'il faut traiter chimiquement ces déchets pour améliorer leurs résistances aux sulfates en subissant un processus de blanchiment avant d'être ajoutés au mélange de béton. Les résultats du travail de **Singh et al., (2016)** sur l'effet des granulats fins des déchets de coupe de granite sur les propriétés d'un béton, ont clairement montré que le béton substitué aux déchets de granite présente une résistance accrue à la carbonatation, à la pénétration des ions chlorure, aux attaques acides et à l'exposition à des températures élevées à un remplacement optimal des déchets de granite de 25%.

Les déchets de granite ont été également valorisés dans la composition du béton autoplaçant. **Jain et al., (2022)** ont étudié la substitution partielle des granulats fins d'un BAP (Béton Autoplaçant) jusqu'à 60% par la poudre de chutes de granite, les résultats indiquent que la résistance à la compression dans tous les mélanges de béton était supérieure à celle du témoin excepté les mélanges de 50 et 60% de taux de substitution. Tous les mélanges de béton, à l'exception le mélange à base de 60% poudre de granite, ont présenté une résistance supérieure par rapport au mélange de contrôle à la carbonatation, au retrait de séchage, aux chlorures et à la corrosion. Dans le même sens **Gautam et al., (2022)** ont travaillé sur le comportement d'un BAP contenant des déchets de granite comme granulats fins, ils ont trouvé des résultats satisfaisants à l'état frais sauf pour le BAP de 40% de granulats fins de déchets de granite, les résistances maximales sont enregistrées pour les BAP à base de 30% de granulats fins de déchets de granites. Des résistances accrues contre le chlorure et la corrosion ont été observée pour l'incorporation jusqu'à 30% de granulats fins de déchets de granite.

Nayak et al., (2022) abordent l'utilisation des poussières de marbre et de granite dans le béton et les composites polymères, soulignant les avantages de ces matériaux de déchets. L'incorporation de granite à des pourcentages de 30% améliore significativement plusieurs aspects dans le béton, elles augmentent la résistance à la compression, la traction, et le module de rupture, tout en améliorant la durabilité et la résistance à l'abrasion. La réduction de l'absorption d'eau et de la porosité contribue à une meilleure résistance aux cycles de gel-dégel et aux attaques chimiques. Pour les composites polymères, le granite renforce la dureté et la résistance à l'impact, tout en réduisant l'absorption d'eau et en améliorant la résistance à l'érosion.

Ahmadi et al., (2022) traitent plusieurs études sur la faisabilité de réutiliser les déchets de granite dans la production de béton mousse. Divers mélanges de béton ont été préparés en utilisant des déchets de granite au lieu du sable fin. Des tests sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, l'absorption d'eau, la conductivité thermique et la microstructure ont été réalisés pour évaluer les performances des mélanges de béton mousse. Globalement, les études suggèrent que l'utilisation des déchets de granite dans le béton mousse peut conduire à des pratiques de construction durables et respectueuses de l'environnement.

Li et al., (2022) explorent la substitution partielle du sable naturel par des fines de granite dans le béton durable avec des pourcentages qui varient principalement entre 10% et 50%, avec des résultats optimaux souvent observés autour de 30% de substitution. Ils ont découvert que l'incorporation de fines de granite peut améliorer la résistance à la compression et à la traction du béton, améliorer la durabilité, réduire la perméabilité du béton et accroître la résistance à l'abrasion et à l'usure. Les études montrent également une réduction de la dépendance au sable naturel et diminue les impacts environnementaux liés à son extraction. Cette approche présente

des avantages économiques en réduisant les coûts des matériaux et en améliorant la durabilité des structures en béton.

Musil et al., (2022) ont montré que l'augmentation de la quantité de filler de granit (jusqu'à 10% du poids du ciment) a diminué la maniabilité et la consistance du mélange de ciment frais. Les échantillons avec 5% et 10% de substitution de ciment par un filler granitique présentaient de meilleures propriétés rhéologiques par rapport à l'échantillon de référence sans filler granitique. L'amélioration des propriétés rhéologiques avec la substitution de 5% à 10% de charges granitiques était probablement due à une amélioration de la courbe granulométrique du mortier frais.

Ngayakamo et al., (2021) traitent l'utilisation des déchets, notamment des déchets de granite, dans la production de produits céramiques tels que la porcelaine et les carreaux de céramique. Ils ont trouvé que l'utilisation de 40% de poudre de granite dans les carreaux de céramique à une température de cuisson de 1200°C a montré une amélioration significative des propriétés physiques et mécaniques, les rendant plus durables et respectueux de l'environnement.

(Rashwan et al., (2020) explorent l'utilisation de la poussière de granite comme substitut partiel de ciment dans le béton avec différents pourcentages allant de 10% à 50% et examine les effets sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Les échantillons de béton ont été préparés. Les résultats ont révélé qu'il y a une amélioration de la profondeur de pénétration de l'eau et de la résistance à l'attaque de l'acide sulfurique à tous les niveaux de remplacement par rapport au mélange témoin. Concernant les autres propriétés telles que l'absorption d'eau, la densité, les résistances et la pénétration des chlorures, on constate une diminution insignifiante jusqu'à 20% des boues de marbre et de granite par rapport aux mélanges témoins. Il est recommandé d'utiliser le marbre et le granite séparément jusqu'à 20% comme remplacement du ciment dans la fabrication du béton sans nuire à ses performances mécaniques ou à sa durabilité.

Raju et al., (2023) ont utilisé de fines de granite en remplacement des granulats fins dans le béton et ils ont trouvé que cette technique a un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques et de durabilité du béton, telles que la résistance à la compression et à la traction par fendage. Le béton a été préparé avec des fines de granit remplaçant les granulats fins dans 6 proportions différentes 0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50%. 1% de superplastifiant a été ajouté au béton de résistance ordinaire pour améliorer l'ouvrabilité.

I.3.7.2. Clinker recyclé

Les déchets de l'industrie cimentaire, tels que la boue, le CKD (figure I-8) et le clinker mal cuit ou incuit (figure I-9) qui est dû principalement aux erreurs de pilotage de la phase de cuisson, de fluctuations de température ainsi qu'aux arrêts et redémarrage du four à cause des coupures d'électricité, de panes ou des arrêts planifiés, ont été utilisés soit sous forme de granulats fins, soit sous forme de graviers.



Figure I-8: Poussière de four de cimenterie CKD



Figure I-9: Clinker mal cuit ou incuit

La valorisation du clinker recyclé consiste à réutiliser le clinker, un composant essentiel du ciment, provenant de déchets de démolition ou de résidus de production. Ce clinker peut être réintroduit dans la fabrication de nouveaux ciments, réduisant ainsi la nécessité de produire du clinker neuf, un processus énergivore et émetteur de CO₂. Cette approche contribue à l'économie circulaire dans l'industrie du ciment, en diminuant les déchets tout en conservant les ressources naturelles.

Les déchets de l'industrie cimentaire (CKD et clinker incuit ou mal cuit) ont été également valorisés dans plusieurs types de matériaux de construction. Le CKD a été utilisé comme ajout cimentaire (**Kherraf et al., 2019 ; Guettouch et al., 2023 ; Bondar et Coakley 2017**) et comme sable dans la composition du béton de sable (**Boughamsa et al., 2023**). Par contre, il n'existe pas beaucoup de recherche sur la valorisation du clinker incuit ou mal cuit dans les matériaux de construction. Sauf quelques études non approfondies ont été menées sur le sujet, notamment les recherches de **Chaib et al., (2019)**, qui ont examiné l'impact du clinker cuit et incuit sur la qualité du ciment, et **Kaplan et al., (2023)**, qui ont exploré l'intégration de granulats de clinker dans des coulis géo-polymères.

Dans l'étude de **Smir (2016)**, l'objectif était de récupérer le clinker incuit jeté, que la société HOLCIM avait précédemment considéré comme des pertes, et de le réutiliser dans la production de ciment et a analysé l'impact de ce clinker sur la qualité du ciment produit. Ils ont constaté que la maniabilité du béton confectionné par ce ciment est de plus en plus difficile avec l'augmentation de l'addition du clinker incuit dans le ciment. Cela était principalement dû à la teneur élevée en chaux libre du clinker incuit et à la teneur élevée en eau associée au pourcentage de clinker cuit. Ce travail permet de définir la quantité optimale du clinker incuit à ajouter au ciment sans pour autant modifier les caractéristiques du béton.

En outre, des recherches de **Tawfik et al., (2020)** ont exploré l'utilisation de déchets de clinker dans la production de ciment à faible énergie à partir de matériaux résiduels de l'industrie papetière. Cette approche innovante ouvre la voie à une utilisation plus durable des ressources et à la réduction de l'empreinte carbone de l'industrie cimentière.

I.4. Conclusion

La valorisation des déchets dans le domaine de la construction présente de nombreux avantages économiques, écologiques et techniques. Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, limitant ainsi l'impact environnemental lié à leur gestion. En intégrant des matériaux recyclés dans les nouvelles constructions, on diminue la demande en matières premières naturelles, contribuant à la préservation des ressources. De plus, ces matériaux peuvent améliorer les propriétés mécaniques des ouvrages, tels que la résistance à la compression et à la flexion, tout en offrant une meilleure durabilité face aux agressions chimiques ou aux cycles gel/dégel. Enfin, la valorisation des déchets s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, favorisant une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

L'intégration des déchets de granite et de clinker recyclé dans le béton représente une approche prometteuse pour promouvoir la durabilité et l'efficacité des matériaux de construction. Les études examinées mettent en évidence les avantages potentiels de la valorisation de ces déchets dans le domaine de la construction, offrant des solutions innovantes pour réduire les déchets, améliorer les performances des matériaux et contribuer à la transition vers une économie circulaire. Ces recherches soulignent l'importance de poursuivre les efforts pour développer des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement, en intégrant intégralement les principes de l'économie circulaire dans la conception et la mise en œuvre des infrastructures et des bâtiments.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux

II. Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des différents constituants utilisés dans la formulation et la fabrication du béton de sable. Afin d'atteindre le niveau de résistance souhaité dans ce type de béton, des mesures spécifiques doivent être prises. Cela implique une sélection et une utilisation minutieuses des constituants pour garantir l'obtention des résultats souhaités en termes de résistance mécanique.

II.2. Matériaux utilisés

Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont:

- Ciment portland composé CPJ-CEM II 42.5 (S-L) provient de la cimenterie de Hadjar Soud-Skikda.
- Sable de dune (SD) de nature siliceuse de classe 0/1 d'origine Oued Zhor -Skikda;
- Sable de déchet de granite (SG) obtenue par concassage et tamisage des chutes de granite;
- Sable de clinker (SC) obtenue par concassage et tamisage de clinker mal cuit ou incuit de la cimenterie de Hadjar Soud -Skikda.
- Fines calcaires (F), récupérées des filtres de la carrière de Ben Azzouz à l'Est de Skikda;
- Superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau Master Glinuim 26;
- Eau de gâchage du robinet (E).

Des essais physiques, chimiques, mécaniques ont été effectués sur les différents matériaux au sein des laboratoires suivants:

- Laboratoire de génie civil de l'université de Skikda;
- Laboratoire National de l'Habitats et la Construction (LNHC-Skikda);
- Laboratoire de la cimenterie de Hadjar Soud -Skikda

II.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de cette étude est le ciment CPJ-CEM II 42.5 (S-L) provenant de la cimenterie (GICA) à Hadjar Soud (figure II-1)



Figure II-1: CEM II de Hadjar Soud - Skikda

Les essais effectués sur le ciment sont:

- La masse volumique absolue est de 3.22 g/cm^3 a été déterminée à l'aide de densimètre Le Chatelier en utilisant l'acétone (figure II-2)



Figure II-2: Mesure de la densité

- La surface spécifique de Blaine est de $3025 \text{ cm}^2/\text{g}$ a été déterminée conformément à la norme EN 196-1 par la méthode de perméabilité à l'air (figure II-3) en observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment ou de fillers compactés dans la cellule du Perméabilimètre de Blaine.



Figure II-3: Mesure de la surface spécifique de Blaine

- L'analyse chimique de ciment utilisé dans cette étude se fait par diffraction par rayon «X» et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau II-1, la teneur des phases anhydres du ciment est calculée à partir de l'analyse du ciment en appliquant la méthode de Bogue.

Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment

Composants	%	Composants	%
CaO	66.46	SO ₃	0.46
Al ₂ O ₃	5.40	CaO Libre	0.50
Fe ₂ O ₃	3.92	PAF	0.30
SiO ₂	21.63	MS	2.32
MgO	1.29	C3S	62.18
Na ₂ O	0.21	C2S	15.13
K ₂ O	0.57	C3A	7.68
Cl ⁻	0.01	C4AF	11.23

Les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment sont représentées par le tableau II-2.

Tableau II-2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

Caractéristiques	Valeurs		
Temps de début de prise	184mm		
Temps de fin de prise	300mm		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance en traction par flexion (MPa)	3.50	6.08	7.61
Résistance en compression (MPa)	35.30	46.45	55.15

II.2.2. Sables

Dans cette étude, trois types de sables sont utilisés, il s'agit d'un sable ordinaire et deux sables de déchets recyclés.

II.2.2.1 Sable ordinaire

Le sable ordinaire (SD) de classe 0/1 est un sable des dunes de nature roulée provenant de la sablière d'Oued Zhor - Skikda (figure II-4).



Figure II-4: Sables des dunes

Les propriétés physiques et chimiques de ce sable sont données par le tableau II-3 et le tableau II-4 respectivement.

Tableau II-3: Caractéristiques physiques de sable ordinaire (SD)

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Masse volumique apparente	(g/cm ³)	1.412
Masse volumique absolue		2.631
Equivalent de sable		74.59
Absorption d'eau		1.02
Module de finesse	(%)	1.55
Porosité inter granulaire		46.33
Teneur en fines		6

Tableau II-4: Composition chimique de sable ordinaire

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

D'après les résultats présentés dans le tableau II-3 et II-4, le sable de dune est principalement composé de silice (SiO₂ égale à 77.86%). Ce type de sable est qualifié de sable siliceux en raison de sa forte teneur en silice, un composant essentiel qui lui confère certaines propriétés physiques et chimiques avantageuses. La silice est un matériau dur et résistant, ce qui contribue à la durabilité et à la solidité du béton lorsqu'elle est utilisée comme constituant. De plus, le sable de dune, avec sa propreté et sa faible proportion de fines argileuses, possède un module de finesse et un coefficient d'absorption faibles. Ces caractéristiques indiquent que le sable est relativement pur et ne contient pas de quantités significatives d'impuretés, ce qui est bénéfique pour la qualité globale du béton. Le faible coefficient d'absorption signifie également que le sable n'absorbe pas beaucoup d'eau, ce qui permet de mieux contrôler le rapport Eau/Ciment et d'améliorer la consistance et la maniabilité du mélange de béton. En résumé, le sable de dune, avec sa haute teneur en silice et ses caractéristiques physiques favorables, est un matériau de choix pour la formulation du béton, contribuant à la performance et à la durabilité des structures en béton.

II.2.2.2 Sables recyclés

On a utilisé dans cette étude deux types de sables recyclés, un sable de déchet de granite (SG) et un sable de clinker recyclé (SC).

a. Sable de déchet de granite

Le sable de déchet de granite (SG) est de classe 0/4 obtenu par concassage et tamisage des chutes de granite (figure II-5).



Figure II-5: Sables de déchets de granite

Les caractéristiques physiques et les propriétés chimiques de ce sable sont données par le tableau II- 5 et le tableau II-6 respectivement.

Tableau II-5: Caractéristiques physiques de sable de déchets de granite

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Masse volumique apparente	(g/cm ³)	1.650
Masse volumique absolue		3.062
Equivalent de sable		72.34
Absorption d'eau		1.67
Module de finesse	(%)	3.47
Porosité inter granulaire		46.11
Teneur en fines		8.33

Le sable de déchets de granite présente une densité absolue et teneur en fines élevées, un faible coefficient d'absorption. Les valeurs moyennes de l'équivalent de sable montrent que ce sable est propre.

Tableau II-6: Composition chimique de sable de déchets de granite

Composant	(%)	Composant	(%)
SiO ₂	41.2	SO ₃	0.31
Al ₂ O ₃	13.2	K ₂ O	0.08
Fe ₂ O ₃	9.59	Na ₂ O	2.5
CaO	9.06	Cl ⁻	0.01
MgO	4.99		

D'après les analyses chimiques, le composé dominant dans la composition du granite est le dioxyde de silicium SiO₂ de 41.2%, donc la silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés ce qui peut ralentir le processus de durcissement et permet d'obtenir des résistances élevées à moyen et à long terme et d'améliorer la durabilité du béton surtout au milieu agressif. En plus de la silice, le sable de déchet de granite contient de l'alumine Al₂O₃ (13.2%), qui contribue à la prise du béton, en revanche, elle affecte négativement la stabilité chimique et favorise l'attaque par les sulfates (Dreux et Feasta 1998)

b. Sable de clinker recyclé

Le sable de clinker (SC) est de classe 0/4 obtenu par concassage et tamisage de clinker mal cuit ou incuit de la cimenterie de Hadjar Soud -Skikda (figure II-6).



Figure II-6: Sables de clinker recyclé

Les caractéristiques physiques et les propriétés chimiques du sable (SC) sont données par le tableau II-7 et le tableau II-8 respectivement.

Tableau II-7: Caractéristiques physiques de sable de clinker recyclé

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Masse volumique apparente	(g/cm ³)	1.489
Masse volumique absolue		2.723
Equivalent de sable		70.50
Absorption d'eau		5.44
Module de finesse	(%)	3.90
Porosité inter granulaire		45.32
Teneur en fines		6.66

Le clinker recyclé présente des densités courantes, teneur en fines plus au moins élevées et un fort coefficient d'absorption. Le module de finesse indique que c'est un sable fin, ce qui traduit par une facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance et une demande en eau élevée (**Dreux et Feasta 1996**).

Tableau II-8: Composition chimique de sable de clinker recyclé

Composant	(%)	Composant	(%)
SiO ₂	22.02	SO ₃	0.07
Al ₂ O ₃	5.49	K ₂ O	0.90
Fe ₂ O ₃	3.72	Na ₂ O	0.20
CaO	65.58	Cl ⁻	0.01
MgO	1.05		

Le clinker recyclé est composé essentiellement de CaO, la présence de cet élément favorise la formation de C3S qui offre des résistances élevées à court terme et augmente la cohésion. La haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton (**Hebhoub et al., 2011**)

Les résultats des analyses granulométriques des trois types de sables sont présentés par des courbes granulométriques (figure II-7).

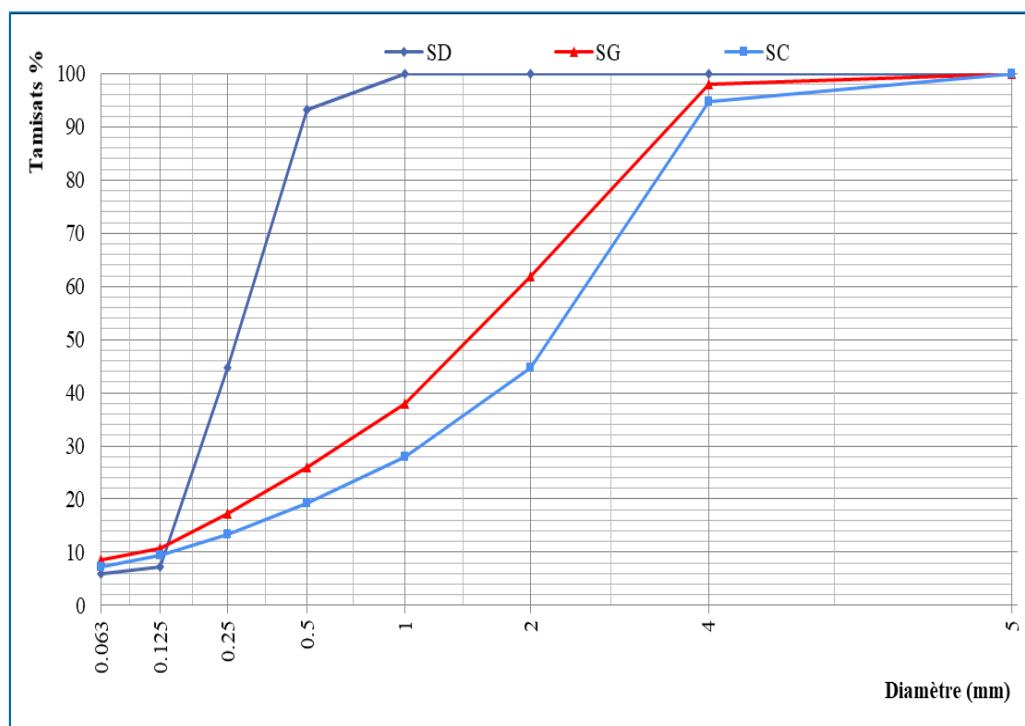


Figure II-7: Distribution granulométrique des sables

D'après la figure II-7, les sables utilisés démontrent une finesse satisfaisante, avec toutes les particules ayant une taille supérieure à 0.063mm. En termes de volume, il est observé que (7.33%, 10.67% et 9.33%) des particules ont une taille inférieure à 0.125mm, tandis que (93.33%, 26% et 19.33%) en volume sont inférieures à 0.5mm pour les échantillons de SD, SG et SC respectivement. Un pourcentage relativement faible, allant de 6 à 9%, représente des particules de taille inférieure à 0.063mm. Les courbes de distribution granulométrique des sables utilisés sont continues, et la distribution granulométrique selon les normes NF EN12620 et NF P18-545 montre que la courbe du sable de déchet de granite (SG) présente la meilleure régularité de la granularité comparée au sable de clinker recyclé (SC) et au sable de dune (SD), respectivement.

II.2.3. Fines calcaires

Les fines calcaires (F), sont des calcaires finement fragmentés, obtenus par broyage de roche calcaire, de couleur blanche, provenant de la carrière de Ben Azzouz à l'Est de Skikda (figure II-8). Le passant au tamis 80 μ m à plus de 80%. Les fines calcaires présentent une masse volumique apparente de 1.05g/cm³ et une masse volumique réelle de 2.74g/cm³. Les propriétés chimiques de ces fines sont représentées dans le tableau II-9.

Tableau II-9: Analyse chimique des fines calcaires

Composant	%	Composant	%
CaCO ₃	84.60	Fe ₂ O ₃	0.01
CaO	55.80	SiO ₂	0.14
Cl ⁻	0.21	Na ₂ O	0.01
Al ₂ O ₃	0.01	K ₂ O	0.01

Les fines calcaires sont très riches en carbonate de calcium (CaCO_3), ce qui les rend de nature calcaire. Cette composition a un impact significatif sur le processus de durcissement du béton. En effet, la présence élevée de CaCO_3 accélère l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S), l'un des principaux composants du ciment. Ce phénomène se produit par la formation de carbo-aluminate de calcium, un composé qui se forme rapidement et qui renforce la matrice du béton à un stade précoce. Cette accélération de l'hydratation augmente la performance mécanique initiale, rendant le matériau plus résistant et durable dès le début de son utilisation. En résumé, l'incorporation de fines calcaires dans le béton n'améliore pas seulement les propriétés mécaniques à jeune âge, mais elle favorise également une réaction chimique bénéfique qui renforce la structure interne du béton (Hebhoub et al., 2011).



Figure II-8: Fines calcaire

II.2.4. Adjuvant

Pour une meilleure ouvrabilité du mélange, nous avons utilisé un adjuvant super plastifiant non chloré et hautement réducteur d'eau. Cet adjuvant, appelé «Master-Glenium 26» conforme à la norme EN 934-2, est à base d'éther poly carboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton à haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises. Ces caractéristiques sont données par le tableau II-10.

Tableau II-10: Propriétés physiques et chimiques de l'adjuvant

Propriété	Valeurs
Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Densité à 25 C	$1,08 \text{ g/cm}^3 \pm 0,02$
Teneur en ions Cl	$\leq 0,01\%$
pH	7 ± 1
Taux des alcalins	$\leq 2 \%$

II.2.5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude, garantit que les propriétés finales du béton ne seront pas compromises par la qualité de l'eau. Cela permet de s'assurer que les résultats obtenus lors des tests sur les mélanges de béton sont fiables et représentatifs, sans être influencés négativement par des variations ou des contaminants potentiels dans l'eau de gâchage. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II-11, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes NF P18-404.

Tableau II-11: Analyse chimique de l'eau

Cl mg/l	pH	T°	Salinité	TDS mg/l	Conductivité Us/cm	Observation
0.1	7.3	28	0.2	297	541	Turbidité: 1.44 ntu Eau de bonne qualité chimique

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté et examiné les différentes propriétés des matériaux utilisés dans l'étude. Ces matériaux étaient constitués de ciment, de sable ordinaire, de fines calcaires, de sable de déchets de granite, de clinker recyclé et d'eau de gâchage, ainsi que de l'adjuvant. De plus, nous avons commenté les résultats des tests de caractérisation menés sur ces matériaux. Sur la base des résultats obtenus, nous avons pu tirer plusieurs observations:

- Les caractéristiques physico-chimiques des différents sables (sable de dune, de déchet de granite et de clinker recyclé) et les fines calcaires indiquent qu'ils sont adaptés pour la fabrication de béton de sable,
- Le sable de déchet de granite présente une densité élevée par rapport à celle du sable de dune et du sable de clinker recyclé, affectant positivement les résistances mécaniques mais réduisant l'ouvrabilité,
- D'après les modules de finesses, le sable ordinaire est plus fin que le sable de déchets de granite et de clinker recyclé, donc l'introduction de ces derniers dans le béton affecte négativement l'ouvrabilité et augmente les résistances mécaniques,
- Le sable de déchet de granite présente une teneur en fines plus élevée par rapport au sable de dune et le sable de clinker recyclé,
- D'après l'équivalent de sable, on note que tous les sables utilisés avaient une propreté adéquate située dans l'intervalle 70% et 80%, et cela indique que ces sables sont propres à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité,
- La porosité inter granulaire montre que le sable de déchets de granite est plus poreux par rapport aux autres types de sable,
- Les courbes des analyses granulométriques des sables utilisés sont continués et la distribution granulométrique montre que la courbe du sable de déchets de granite (SG) présente la meilleure régularité de la granularité par rapport au sable de clinker recyclé (SC) et au sable de dune (SD) respectivement,
- Les compositions chimiques des sables influencent la durabilité et les résistances du béton, notamment grâce à la présence de silice et d'alumine dans le sable de déchet de granite et de CaO dans le clinker recyclé,
- Le sable de dune SD et les sables SG et SC, contiennent un pourcentage de dioxyde de silicium (SiO_2) de (77.86%, 41.2% et 22.02%) respectivement. Le SiO_2 est le composé dominant dans la composition du granite, donc la silice réagit avec la chaux durant

l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés ce qui peut ralentir le processus de durcissement et permet d'obtenir des résistances élevées à moyen et à long terme et d'améliorer la durabilité du béton surtout au milieu agressif,

- En plus de la silice, le sable de déchet de granite contient de l'alumine Al_2O_3 (13.2%), qui contribue à la prise du béton, en revanche, elle affecte négativement la stabilité chimique et favorise l'attaque par les sulfates,
- Le sable de clinker est composé essentiellement de CaO , la présence de cet élément favorise la formation de C3S qui offre des résistances élevées à court terme et augmente la cohésion. La haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.

L'étude conclut que les matériaux utilisés, en particulier les sables recyclés et les fines calcaires, sont appropriés pour améliorer les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton de sable. Ces matériaux permettent non seulement d'optimiser la résistance et la solidité du béton, mais aussi d'augmenter sa longévité en réduisant la porosité et en améliorant la cohésion interne.

Les sables recyclés contribuent à une gestion plus durable des ressources, tandis que les fines calcaires accélèrent les réactions d'hydratation et renforcent la structure dès les premiers jours. En somme, l'intégration de ces matériaux dans la formulation du béton de sable offre des avantages significatifs en termes de performance et de durabilité.

Chapitre III

Programme expérimental et méthodologie d'essais

III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le programme expérimental, la méthode de formulation, une description détaillée des essais expérimentaux, la préparation des mélanges ainsi que la définition des paramètres fixes et variables de l'étude. Afin de mettre en évidence l'impact de l'incorporation des sables recyclés dans le béton de sable, une série complète d'essais a été réalisée. L'objectif était d'examiner les effets sur les propriétés physiques et mécaniques du béton, ainsi que ses performances dans des milieux agressifs tels que l'exposition aux acides, aux bases et aux chlorures. De plus, la résistance vis-à-vis du gel/dégel a été évaluée, les variations dimensionnelles ont été surveillées, ainsi qu'une étude microstructurale par DRX a été effectuée.

III.2. Programme expérimental et formulation des mélanges

III.2.1. Programme expérimental

Dans le programme expérimental nous avons partiellement substitué un sable ordinaire SD dans un béton de sable par des sables recyclés (sable de déchets de granite (SG) et de clinker recyclé (SC)) et étudié l'effet apporté par l'introduction de ces sables sur les propriétés à l'état frais et durci ainsi que les paramètres de durabilité et la microstructure. Pour se faire, deux formulations ont été effectuées:

- Une formulation (BSG) nous avons substitué partiellement un sable ordinaire SD par le sable de déchets de granite SG avec des taux de substitution de 20% et 40%.
- Une formulation (BSC) nous avons remplacé partiellement le sable ordinaire SD par un sable de clinker recyclé SC avec des taux de substitution de 20% et 40%.

Les différentes compositions des mélanges des bétons étudiés, les paramètres fixes et variables sont donnés dans le tableau III-1.

Tableau III-1: Différentes compositions des mélanges pour les différentes formulations

Formulations	Notation	Type de béton
BS0	BS0	Béton de sable avec 100% de sable SD.
BSG	BSG20	Béton de sable à base de 80% de sable de dune (SD) et 20% de sable de déchets de granite (SG).
	BSG40	Béton de sable à base de 60% de sable de dune (SD) et 40% de sable de déchets de granite (SG).
BSC	BSC20	Béton de sable à base de 80% de sable de dune (SD) et 20% de sable de clinker recyclé (SC).
	BSC40	Béton de sable à base de 60% de sable de dune (SD) et 40% de sable de clinker recyclé (SC).
Paramètres constants	Dosage en ciment 400Kg/m ³ ; E/C= 0.68 ; Teneur en adjuvant; Teneur en fines calcaire.	
Paramètres variables	Taux de substitution de sable de déchets de granite et de clinker recyclé	

III.2.2. Méthode de formulation

La méthode SABLOCRETE (**Sablocrete 1994**) est une technique de formulation de béton de sable largement utilisée dans le secteur de la construction. La méthode repose sur un dosage précis des différents composants du mélange pour obtenir des propriétés mécaniques et une durabilité optimale. Cette méthode est appréciée pour sa simplicité et son efficacité dans la formulation du béton de sable, fréquemment utilisé dans des applications telles que les revêtements de sols, les dalles et les éléments préfabriqués.

Dans ses travaux, SABLOCRETE propose une approche théorique, qui fournit une base solide aux formulations de bétons de sable. Cette approche commence par l'estimation du dosage en fines qui s'inspire principalement de la formule (III.1) de Caquot:

$$[\text{Fines}] = 0.38(0.063/D)^{1/5} \quad (\text{III.1})$$

D'après Caquot et en fonction de la porosité minimale théorique du béton, on estime le dosage en eau (E) par les formules (III.2 et III.3).

$$[E+V]_{\min} = 0.8 [d/D]^{1/5} \quad (\text{III.2})$$

$$[V] = k [E] \quad (l/m^3) \quad (\text{III.3})$$

d/D: l'étendue granulaire y compris les fines (borne supérieure et inférieure)

k: compris entre 2 et 2.5.

L'estimation de la valeur d (borne inférieure) est délicate et ne peut se calculer que dans le cas d'un mélange totalement défloculé, elle est assimilée à une sphère et donnée par la formule (III.4)

$$d = 60 / f \cdot \rho \quad (mm) \quad (\text{III.4})$$

Avec:

f: Finesse Blaine en (m²/g)

ρ: Masse volumique en (g/m³)

Ensuite, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides (V), formule (III.5).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{Fines}] - [\text{Eau}] - [V] \quad (\text{III.5})$$

Enfin le dosage en fines peut être estimé en termes de compacité (formule III.6) et donc imposé vis-à-vis de la résistance.

Ces fines regroupent principalement le ciment, l'addition et la fraction du sable inférieure à 80μm souvent mineur pour les sables traditionnels. Ainsi, l'optimum de résistance serait atteint pour des dosages en ciment et en addition:

$$\text{Ciment} + \text{Addition} = [\text{Fines}] \quad (\text{III.6})$$

III.2.3. Formulation des mélanges

La formulation de référence BS0 a été établie selon la méthode expérimentale du projet SABLOCRETE (**Sablocrete 1994**) avec les paramètres fixes sont le rapport Eau/Ciment (E/C)

est de 0.68, le dosage en ciment, le dosage en fines calcaire et la teneur en superplastifiant (1%). Les formulations retenues (formulation à base de sable de déchets de granite (BSG) et formulation à base de clinker recyclé (BSC)) sont obtenues par la même méthode avec la substitution du sable ordinaire par rapport au volume par les sables recyclés. Les différentes compositions des mélanges sont reportées sur le tableau III-2.

Tableau III-2: Composition des mélanges

Type de Béton	CEMII (Kg/m ³)	SD (Kg/m ³)	SG (Kg/m ³)	SC (Kg/m ³)	F (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	E (Kg/m ³)
BS0	400	1160.40	-	-	252	4.32	272
BSG20	400	928.32	271.968	-	252	4.32	272
BSG40	400	652.72	543.936	-	252	4.32	272
BSC20	400	928.32	-	253.837	252	4.32	272
BSC40	400	652.72	-	507.674	252	4.32	272

III.2.4. Fabrication des mélanges

Afin de garantir un mélange homogène et, par conséquent, un béton de haute qualité, assurant ainsi des résultats fiables et facilitant l'étude du comportement et des caractéristiques de ce matériau, la méthode de préparation des différents types de béton étudiés se déroule en plusieurs étapes:

III.2.4.1. Malaxage des bétons

Nous entamons d'abord le processus en sélectionnant du sable ordinaire en fonction de ses caractéristiques granulométriques et de sa propreté. Ensuite, nous procédons au mélange du sable avec le ciment et les fines de calcaire à l'état sec, pour une durée de deux minutes complètes. Une fois le mélange homogène obtenu, nous ajoutons progressivement l'eau et l'adjuvant, sans interrompre le processus de mélange, pendant une période de trois minutes, jusqu'à obtenir un mélange de béton uniforme. Conformément à la norme NF P 18-404, le malaxage sec dure 60 secondes, tandis que le malaxage humide s'étend sur 120 secondes. Cette opération est réalisée dans une bétonnière de type B132, dont la cuve a un volume de 134 litres et une vitesse de rotation de 24 tr/min (figure III-1).



Figure III-1: Malaxage

III.2.4.2. Remplissage et vibration

Avant de remplir les moules, nous appliquons un lubrifiant sur leurs parois pour éviter toute adhérence du mélange frais. Le remplissage se fait en deux couches, et nous appliquons sur chaque couche 25 coups, afin d'assurer l'homogénéité du mélange et éliminer les bulles d'air dans le béton. Ensuite, le béton est mis en place dans les moules par vibration ou par piquage, selon sa maniabilité. Enfin, nous procédons à l'arasement à l'aide d'une règle métallique.

III.2.4.3. Conservation des éprouvettes

Avant le démoulage (figure III-2) les éprouvettes sont conservées dans un local pendant 48 ± 1 h à une température de 20°C , humidité relative $60\% \pm 5$.



Figure III-2: Éprouvettes avant le démoulage

Ensuite les éprouvettes sont démoulées (figure III-3) et conservées selon les conditions de chaque essai.



Figure III-3: Conservation des éprouvettes dans l'eau

III.2.4.4. Essais effectués

◆ Essais à l'état frais

- Essais à l'état frais: densité conforme à la norme NF EN12350-6, ouvrabilité mesuré par l'affaissement au cône d'Abrams selon les prescriptions de la norme NF EN12350-2 et la teneur en air occlus mesurée par un aéromètre à béton selon la norme NF EN12350-7.

◆ Essais à l'état durci

- Résistances mécaniques sur éprouvettes prismatiques de dimension $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ conservées 28 jours dans l'eau jusqu'à le jour de l'essai (7, 28 et 90 jours), rompu en traction par flexion 3 points et en suite en compression conforme aux normes NF EN12390-5 et NF EN12390-3 respectivement.
- Des éprouvettes de dimensions $(15 \times 15 \times 15)$ cm³ conservées dans l'eau pendant 28 jours sont soumis à l'essai scléromètre (NF EN 12504-2) et ultrason (NF EN 12504-4).
- Retrait et gonflement, mesuré sur des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ équipé de plots. Les éprouvettes de retrait sont conservées à l'air tandis que les éprouvettes destinées au gonflement sont conservées à l'eau conforme à la norme NF P 18-427.
- Absorption d'eau par immersion, selon **Neville (2011)**, les éprouvettes de dimension $(5 \times 5 \times 5)$ cm³ sont conservées à l'eau pendant 28 jours et ensuite soumis à l'essai.
- Porosité accessible à l'eau mesurée sur éprouvettes de dimension $(5 \times 5 \times 5)$ cm³ conservés précédemment 28 jours dans l'eau selon les critères de la norme NF P 18-459.
- Absorption d'eau par capillarité et sportivité conforme à la norme NF EN 480-5 a été réalisé sur des éprouvettes de dimension $(7 \times 7 \times 28)$ cm³ plongés 28 jours dans l'eau avant essai. Les surfaces inférieurs des éprouvettes sont soumises à une absorption d'eau dans une seule direction jusqu'à l'achèvement de l'essai.
- Gel-dégel, sur des éprouvettes de dimension $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ équipés de plots sont soumis à 300 cycles de gel-dégel conforme à la norme NF P 18-425. Des mesures de variation dimensionnelle et masse sont relevées chaque 30 cyclés. Un test ultrasonique a été fait à la fin de l'essai.
- Pénétration de chlorures sur des éprouvettes de dimension $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ conservées dans l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours ensuite dans une solution de NaCl de 5% de concentration selon la norme NT BUILD 492-1.
- Attaque chimique par les bases et les acides sur éprouvettes de dimension $(5 \times 5 \times 5)$ cm³ conservée 28 jours dans l'eau et ensuite dans des solutions de concentration de 4% d'acide chlorhydrique (HCl), 4% d'acide acétique (4% CH₃COOH), 4% d'acide sulfurique (H₂SO₄) et 4% d'hydroxyde de sodium (NaOH). Les conditions de cet essai sont décrites dans la norme ASTM C-267-97.

III.3. Méthodes d'essais

III.3.1. Essais effectués sur le béton frais

III.3.1.1. Masse volumique

La masse volumique du béton frais (figure III-4) est déterminée sur les éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³ selon la formule (III.7) conforme à la norme NF EN 12350-6.

$$\rho = \frac{m_t - m}{V} \quad (\text{III. 7})$$

Avec:

ρ : La masse volumique du béton (g/cm³);

m : La masse du moule vide (g);

m_t : La masse totale du moule rempli (g);

V : Le volume du moule (cm³).



Figure III-4: Mesure de la masse volumique du béton frais

III.3.1.2. Ouvrabilité

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure III-5) est largement utilisé pour évaluer la consistance du béton. Conformément à la norme NF P18-451, cet essai est effectué en plaçant le moule tronconique légèrement huilé sur une plaque d'appui. Le moule est rempli en trois couches d'égales hauteurs, chaque couche étant mise en place par piquage avec 25 coups par couche à l'aide de la tige de piquage de diamètre 16mm. Une fois le bord supérieur du moule arasé, il est soulevé avec précaution. La mesure, exprimée en centimètres, est effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute suivant le démoulage.



Figure III-5: Affaissement au cône d'Abrams

III.3.1.3. Air occlus

L'air occlus dans le béton se réfère à l'air qui est piégé à l'intérieur de la masse de béton pendant le processus de mélange et de coulée. Cet air est emprisonné entre les particules de ciment, d'agrégats et d'eau, et n'est pas en contact direct avec l'atmosphère extérieure. L'air occlus peut affecter les propriétés du béton, notamment sa densité, sa résistance et sa durabilité, en fonction de la quantité présente dans le mélange.

La mesure de la teneur en air occlus est réalisée à l'aide d'un aéromètre à mortier d'un litre de volume (figure III-6), conformément à la norme NF EN 12350-7. L'appareil de mesure se compose de deux chambres, le béton est placé à l'intérieur de la chambre inférieure de la même manière qu'il est placé dans le cône d'Abrams. Après le remplissage du béton, la chambre supérieure est soigneusement positionnée et fixée, puis une pression est appliquée à l'aide de la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. À ce stade, la valve séparant les deux chambres de l'appareil de mesure est ouverte, le béton est correctement comprimé et le manomètre intégré à l'aéromètre affiche directement le pourcentage d'air occlus dans le béton.



Figure III-6: Aéromètre à mortier

III.3.2. Essais effectués sur le béton durci

III.3.2.1. Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion, est une méthode utilisée pour évaluer la résistance et la ductilité des matériaux. Il fournit des informations précieuses sur la capacité d'un matériau à résister à des charges appliquées dans des directions non axiales et est essentiel pour la conception et l'analyse des structures.

La résistance à la traction par flexion (figure III-7) est déterminée sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³, consiste à réaliser à l'aide d'une machine de flexion à 3 points de 100 KN de charge, afin de créer les forces de traction dans l'éprouvette conformément à la norme NF EN 12390-5. Pour une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, celle-ci est bien placée au sein de l'appareil, puis la mise en charge est lancée, augmentant automatiquement avec une vitesse constante jusqu'au moment de la rupture. Trois échantillons pour chaque composition sont testés afin d'obtenir la moyenne de trois données de mesure.

La résistance à la traction par flexion est mesurée suivant la formule (III.8).

$$R_t = \frac{3}{2} \times \frac{P l}{a^3} \quad (\text{III. 8})$$

Avec:

R_t : Résistance en traction par flexion (MPa);

P : Charge appliquée (N);

l : Distance entre les appuis (mm);

a : Coté de l'éprouvette (mm).



Figure III-7: Essai de traction par flexion trois points

III.3.2.2. Essai de compression

Cet essai implique la compression des demis prismes rompu en traction par flexion après une période de cure dans l'eau, en appliquant progressivement une force axiale jusqu'à l'apparition de fissures. Cela permet de déterminer la résistance à la compression du béton selon la norme NF EN 12390-3 (figure III-8). Six échantillons ont été testés pour chaque composition étudiée afin d'obtenir une moyenne des trois mesures.

La contrainte maximale (résistance à la compression) est donnée par la formule (III.9).

$$R_c = P/S \quad (\text{III.9})$$

Avec:

R_c [MPa]: Résistance à la compression;

P [N]: Charge de rupture;

S [mm²]: Surface d'éprouvette.



Figure III-8: Résistance à la compression

III.3.2.3. Essai d'ultrason

L'essai d'ultrason est une méthode de contrôle non destructif largement utilisée dans divers domaines, y compris le génie civil. Cette technique utilise des ondes sonores à haute fréquence pour détecter les imperfections ou les discontinuités dans les matériaux, tels que les défauts de structure ou les vides, sans endommager l'échantillon testé. Dans le génie civil, l'essai par ultrason est souvent utilisé pour évaluer l'intégrité des structures en béton en déterminant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Pour ce faire, il consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface des éprouvettes (15×15×15) cm³ (figure III-9). La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières (mesure en transparence, mesure en surface, mesure semi-directe). Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de mesure en transparence (directe) conforme à la norme NF EN 12504-4. En connaissant la longueur du parcours entre deux points, la vitesse d'impulsion peut être déterminée par la formule (III.10).

$$V_p = \frac{L}{T} \quad (\text{III.10})$$

Avec:

V_p : La vitesse de propagation du son (Km/s);

L : La longueur de parcours (mm);

T : Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (μs).



Figure III-9: Essai ultrasonique

Le module d'élasticité est évalué à l'âge de 28 jours en utilisant l'équation (III.11) de Neville (Neville 2011).

$$E_d = \frac{\rho' \cdot V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{III. 11})$$

Avec:

E_d : Le module dynamique d'élasticité (GPa);

ρ' : La densité à l'état sec (Kg/m^3);

V_p : La vitesse ultrasonique (Km/s);

ν : Coefficient de Poisson

III.3.2.4. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est une méthode de contrôle non destructif utilisée pour évaluer la résistance du béton à la compression sur site selon la norme NF EN 12504-2. Cette technique implique l'utilisation d'un appareil appelé scléromètre, qui mesure la dureté de la surface du béton en le frappant avec un marteau équipé d'un embout en acier. L'énergie de rebondissement du marteau est mesurée et convertie en une valeur de dureté, également appelée indice de rebondissement. Plus la valeur de l'indice de rebondissement est élevée, plus la surface du béton est dure, ce qui est généralement corrélé à une résistance accrue du béton à la compression. L'essai au scléromètre est rapide, facile à réaliser sur le terrain et fournit une estimation indirecte de la résistance du béton, ce qui en fait un outil précieux pour l'évaluation de la qualité du béton dans les structures existantes ou nouvellement construites. Les essais de scléromètre (figure III-10) sont effectués sur des éprouvettes cubiques ($15 \times 15 \times 15$) cm^3 après 28 jours de cure.



Figure III-10: Essai au scléromètre

En faisant la moyenne des indices de rebondissement (I_s), La résistance due au scléromètre peut être déterminée en utilisant la formule (III.12) (Dupain et Arroman 2009).

$$R_{sc} = \frac{I_s^2}{32} \quad (\text{III. 12})$$

Pour calculer la résistance à la compression combinée on utilise l'équation (III.13).

$$R_{cc} = \frac{I_s^2}{[(3,64 + 0,023 \times I_s) - (0,56 \times V_p)]^2} \quad (\text{III. 13})$$

Avec:

R_{sc} : La résistance due au scléromètre (MPa);

R_{cc} : La résistance à la compression combinée (MPa);

I_s : Indice de rebondissement;

V_p : Vitesse de propagation du son (Km/s).

III.3.2.5. Essai de l'absorption d'eau par immersion

L'essai d'absorption d'eau par immersion est une méthode utilisée pour évaluer la porosité et la capacité d'absorption d'eau des matériaux poreux. Cet essai est important dans le domaine du génie civil car il fournit des informations sur la durabilité et la résistance aux intempéries des matériaux de construction, ce qui est essentiel pour garantir la qualité et la performance des structures dans des conditions réelles d'utilisation (Malhotra et Carino 2004 ; Mindess et al., 2003).

Selon Neville (Neville 2011), cette technique implique d'immerger des éprouvettes ($5 \times 5 \times 5$) cm^3 dans l'eau pendant 28 jours. Après cette période de cure, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse humide (M_h), puis elles sont placées dans l'étuve pendant 72 heures à une température de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, et elles sont pesées pour déterminer la masse sèche (M_s) (figure III-11). La différence de poids est utilisée pour calculer le taux d'absorption d'eau, exprimé en pourcentage, ce qui permet d'évaluer la capacité du matériau à absorber l'eau et sa porosité selon la formule (III.14).

$$A_b = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (\text{III. 14})$$

Avec:

Ab : Le coefficient d'absorption par immersion (%);

M_h : La masse de l'éprouvette humide après l'immersion (Kg);

M_s : La masse de l'éprouvette sèche après le séchage dans l'étuve (Kg).



Figure III-11: Essai d'absorption d'eau par immersion

III.3.2.6. L'essai de porosité accessible à l'eau

L'essai de porosité accessible à l'eau est une méthode permettant de mesurer le volume de pores d'un matériau pouvant être infiltrés par l'eau. Il consiste à immerger des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{cm}^3$ dans l'eau pendant 28 jours. Les éprouvettes sont ensuite pesées pour déterminer leur masse humide (M_h). Elles sont également pesées dans l'air et sous l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique pour mesurer la masse hydrostatique (M_{hydro}). Après cette étape, les éprouvettes sont placées dans une étuve à $105 \pm 3^\circ\text{C}$ pendant 72 heures, puis pesées de nouveau pour déterminer leur masse sèche (M_s) (figure III-12). La différence de poids est utilisée pour calculer le taux d'absorption d'eau, exprimé en pourcentage, permettant d'évaluer la capacité du matériau à absorber l'eau et sa porosité selon la formule (III.15). Cet essai est essentiel pour évaluer la durabilité des matériaux, notamment leur résistance aux agressions extérieures.

$$P = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h - M_{hydro}} \right) \times 100 \quad (\text{III. 15})$$

Avec:

P : Le taux d'absorption d'eau (%);

M_h : La masse de l'éprouvette humide après l'immersion (Kg);

M_s : La masse de l'éprouvette sèche après le séchage dans l'étuve (Kg);

M_{hydro} : la masse hydrostatique.

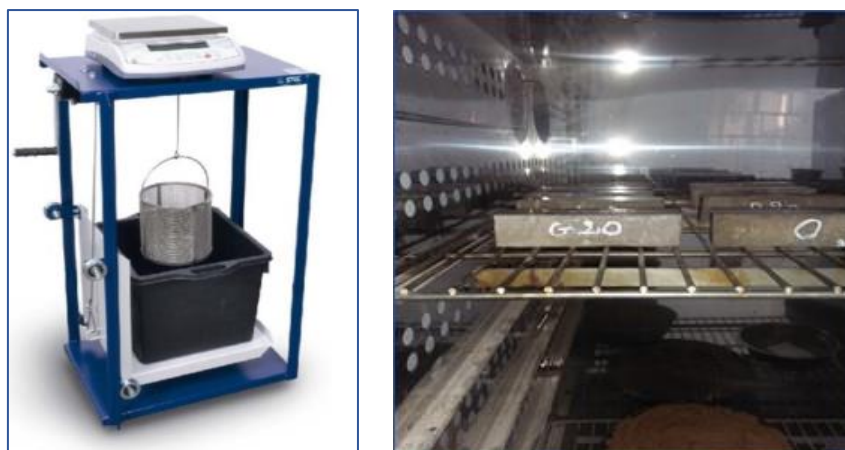


Figure III-12: Essai de porosité accessible à l'eau

III.3.2.7. Essai d'absorption capillaire et sorptivité

L'essai d'absorption capillaire [NF EN 480-5] est une méthode utilisée pour évaluer la capacité d'un matériau poreux à absorber l'eau par action capillaire. Ce test mesure la capacité d'absorption d'eau du matériau en fonction de sa porosité et de sa structure poreuse.

Pendant l'essai, des éprouvettes ($7 \times 7 \times 28$) cm³ sont préalablement séchées à l'étuve pendant 72 heures pour obtenir leur masse sèche constante (M_0), en enveloppant les parois latérales des éprouvettes par un papier film et puis on les met en contact avec une épaisseur d'eau de 3 mm sur l'une de leurs faces (figure III-13). Les mesures de la variation de masse (M_i) et la hauteur de pénétration d'eau sont prises aux intervalles 15, 30, 60, 120, 240, 360, 480, 720, 1080 et 1440 min.



Figure III-13: Essai d'absorption capillaire

La hauteur à laquelle l'eau monte par capillarité dans le matériau est mesurée et utilisée pour calculer le taux d'absorption capillaire, ce qui permet d'évaluer la capacité du matériau à résister à l'humidité et à l'eau. L'essai d'absorption capillaire est couramment utilisé pour évaluer la qualité et les performances des matériaux de construction, tels que le béton, la brique et les matériaux de maçonnerie.

L'eau absorbée par unité de surface est exprimée par la formule (III.16).

$$Ab = \frac{(M_0 - M_i)}{A} \quad (\text{III. 16})$$

Avec:

Ab : Le coefficient d'absorption par capillarité (g/cm^2);

M_0 : La masse de l'éprouvette initial avant l'immersion dans la nappe d'eau (g);

M_i : La masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau à l'échéance donnée (g);

A : La surface en contact avec l'eau (cm^2).

La sorptivité est une mesure de la capacité d'un matériau poreux à absorber l'eau ou d'autres liquides. La sorptivité dépend des propriétés du matériau telles que sa porosité, sa perméabilité et sa structure poreuse. Plus un matériau est poreux et perméable, plus sa sorptivité est élevée. La mesure de la sorptivité est importante pour évaluer la résistance à l'humidité des matériaux de construction et leur durabilité dans des environnements humides. Elle est souvent utilisée pour caractériser les matériaux de construction comme le béton, la brique, le bois et les revêtements (Hall et Hoff 2021).

Philip (1969) a montré que la sorptivité peut être déterminée à partir d'une infiltration horizontale où le débit d'eau est principalement contrôlé par l'absorption capillaire (formule III.17).

$$S = \frac{(M_0 - M_i)}{A \times \sqrt{t}} \times 100 \quad (\text{III.17})$$

Avec:

S : La sorptivité ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$);

M_0 : La masse de l'éprouvette initial avant l'immersion dans la nappe d'eau (g);

M_i : La masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau à l'échéance donnée (g);

A : La surface en contact avec l'eau (cm^2);

t : Le temps (s).

III.3.2.8. Variation pondérale (perte/gain en masse)

La mesure de la perte/gain de masse est effectuée à l'aide d'une balance, sur les éprouvettes de dimensions ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 prévues pour la mesure du retrait et du gonflement (figure III-14). La masse M_0 de chaque éprouvette est mesurée après 24 heures, puis la masse M_i des mêmes éprouvettes est mesurée pendant les 14 premiers jours, ainsi qu'aux âges de 21, 28, 56, 60, 90, 120, 150 et 190 jours. La perte/gain de masse est calculée selon la relation (III.18).

$$\text{Perte en masse} = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \quad (\text{III. 18})$$

Avec:

M_0 : masse de l'éprouvette après 24 heures;

M_i : masse de l'éprouvette au jour i .



Figure III-14: Essai perte en masse

III.3.2.9. Variation dimensionnelle (retrait et gonflement)

Les variations de dimension (retrait ou gonflement) sont mesurées par un Déformomètre (figure III-15) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0.005 mm, une tige de 160 mm de longueur doit permettre de régler le zéro du Déformomètre. Cette tige est en invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut subir au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur. Le retrait et le gonflement sont mesurés sur des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ équipé de plots. Les éprouvettes de retrait sont conservées à l'air tandis que les éprouvettes destinées au gonflement sont conservées à l'eau conforme à la norme NF P 18-427 (figure III-16).

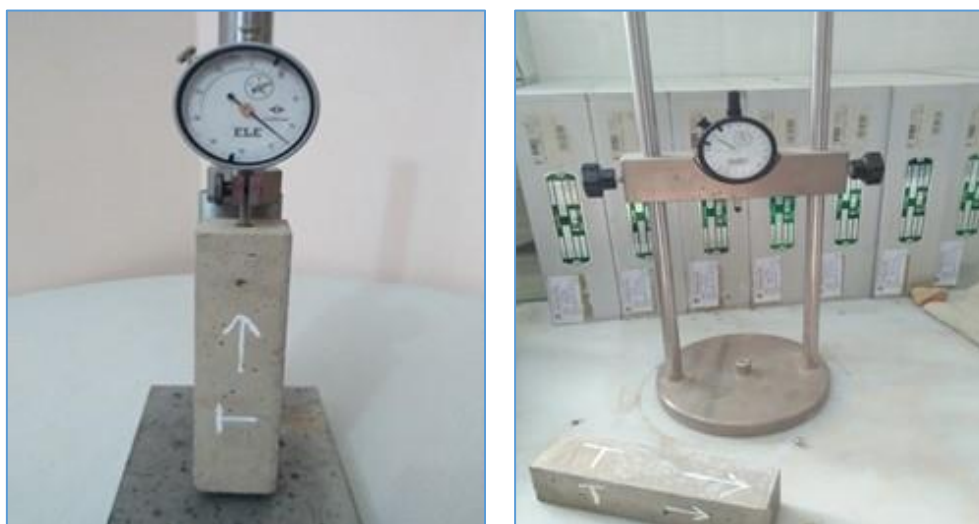


Figure III-15: Mesure de la variation dimensionnelle (retrait et gonflement)



Figure III-16: Conservation des éprouvettes destinées aux retraits et gonflements

III.3.2.10. Essai des attaques chimiques

Afin d'étudier l'impact de l'introduction de sable de déchets de granite et de clinker recyclé sur la durabilité d'un béton de sable, des éprouvettes cubiques de dimension $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$ ont été préparées. Après 24 heures de coulage, ces éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à une température de 20°C avec une humidité de 95% pendant 28 jours (figure III-17). Après cette période de cure, les éprouvettes ont été pesées pour déterminer la masse initiale M_0 , puis immergées dans différentes solutions:

- 4% d'acide chlorhydrique (HCl) acide fort;
- 4% d'acide sulfurique (H_2SO_4) acide fort;
- 4% d'acide acétique (CH_3COOH) acide faible;
- 4% d'hydroxyde de sodium (NaOH) base forte.

Cet essai, conforme à la norme ASTM C267-96, consiste à évaluer la résistance des échantillons aux agressions chimiques en mesurant la perte de masse après une période d'immersion dans les solutions mentionnées ci-dessus. Les éprouvettes sont nettoyées à l'eau douce pour éliminer les résidus de béton altéré, puis laissées sécher pendant 20 minutes avant d'être pesées à nouveau pour obtenir la masse M_i . Cette procédure est répétée à des intervalles de temps définis (1, 7, 14, 21, 28, 56, 60, 90 et 120 jours) pour évaluer l'évolution de la résistance chimique des échantillons. Les solutions sont renouvelées tous les 14 jours en fonction de la variation du pH.

La résistance chimique est évaluée en mesurant la perte de masse des éprouvettes selon la formule (III.19).

$$\text{Variation de la masse} = \left(\frac{M_0 - M_i}{M_0} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (\text{III.19})$$

Avec:

M_0 : masse de l'éprouvette avant l'immersion (g);

M_i : masse de l'éprouvette après l'immersion au jour i (g).



Figure III-17: Essai des attaques chimiques

A la fin de cet essai on réalise des essais de compression sur les éprouvettes soumis à l'attaque chimique (figure III-18).



Figure III-18: Essai de compression sur éprouvette soumise à l'attaque chimique

III.3.2.11. Essai de pénétration des chlorures

La pénétration des chlorures est l'un des paramètres cruciaux qui affectent la durabilité du béton. Les chlorures sont des agents agressifs présents dans l'environnement, tels que le sel de déneigement utilisé sur les routes ou le sel marin dans les régions côtières, et ils peuvent pénétrer dans le béton à travers les pores et les fissures. Cette pénétration peut entraîner la corrosion des armatures métalliques à l'intérieur du béton, ce qui affaiblit sa structure et compromet sa durabilité.

Pour les échantillons d'essais, on a utilisé des éprouvettes prismatiques $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées 28 jours dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Ensuite, ces éprouvettes sont latéralement paraffinées avec la paraffine (figure

III-19) et puis elles sont totalement immergées dans une solution saline préparée de chlorure de sodium (5% NaCl) dilué dans l'eau distillée pendant 120 jours (figure III-20). La solution est renouvelée chaque 28 jours. A la fin de l'essai, les éprouvettes sont coupées latéralement selon la norme NT BUILD 492-1. On a utilisé des demis prismes pour mesurer le pourcentage de pénétration de chlorure et les autres demis prismes pour mesurer le pH.



Figure III-19: Paraffinage des éprouvettes



Figure III-20: Conservation des éprouvettes dans une solution de 5% NaCl

Pour mesurer le pourcentage de pénétration de chlorure, les échantillons ont subi un processus de coupe et d'application d'une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) sur leurs surfaces en béton (figure III-21). Selon le changement de la couleur sur le béton, la zone blanche indique la profondeur de pénétration de chlorure, par contre la zone brune indique qu'il n'y a aucune pénétration (figure III-22).



Figure III-21: Eprouvette coupée en deux et versement du AgNO_3



Figure III-22: Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures

Pour mesurer le pH, Les demi-prismes de béton sont d'abord soigneusement broyés jusqu'à obtenir une poudre fine. Cette étape est cruciale pour garantir que le matériau est suffisamment homogène pour une mesure précise du pH. La poudre obtenue est ensuite mélangée avec de l'eau distillée dans un rapport approprié pour créer une suspension. L'eau distillée est utilisée pour éviter toute contamination qui pourrait altérer les résultats du pH. Le mélange est agité vigoureusement pour assurer une distribution uniforme des particules de béton dans l'eau. Cette étape est essentielle pour garantir que le pH mesuré représente bien l'ensemble de l'échantillon. Une fois le mélange homogène, le pH est mesuré à l'aide d'un appareil de mesure calibré (figure III-23). Le pH-mètre est plongé dans la suspension, et la lecture est prise une fois que le pH-mètre indique une valeur stable.

Cette méthode permet de déterminer le pH des échantillons de béton de manière précise, fournissant des informations importantes sur l'état chimique du béton. La mesure du pH est

cruciale pour évaluer la durabilité et la stabilité chimique du béton, en particulier en ce qui concerne la résistance à la corrosion des armatures et la réactivité aux milieux agressifs.



Figure III-23: Mesure de pH

III.3.2.12. Les essais de gel/dégel

Les essais de gel-dégel sont des tests effectués pour évaluer la résistance des matériaux aux cycles de gel/dégel. Ces essais sont importants dans divers domaines tels que la construction, l'ingénierie des matériaux. Ils simulent les conditions climatiques changeantes auxquelles les matériaux peuvent être exposés, en particulier dans les régions où les températures fluctuent régulièrement autour du point de congélation.

Les essais de gel-dégel permettent de déterminer la résistance d'un matériau aux dommages causés par l'expansion de la glace à l'intérieur de ses pores. Les matériaux qui ne sont pas suffisamment résistants au gel-dégel peuvent se fissurer, se déformer ou perdre leur intégrité structurelle, ce qui peut entraîner des problèmes de durabilité et de performance à long terme. En conséquence, ces essais sont essentiels pour garantir la qualité et la durabilité des matériaux utilisés dans diverses applications.

Pendant ces essais et après 28 jours de cure, les échantillons de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ équipé de plots sont soumis à des cycles de gel/dégel répétés. Le processus consiste généralement à placer les échantillons dans un environnement où la température descend en dessous de zéro C° provoquant le gel de l'eau contenue dans les pores du matériau. Ensuite, les échantillons sont exposés à des températures modérées, permettant à la glace de fondre. Ce cycle de gel/dégel est répété 300 fois pour imiter les conditions réelles auxquelles les matériaux peuvent être confrontés. Des mesures de poids et de la variation de longueur ont été effectués sur les éprouvettes exposées sur ces cycles de gel/dégel.

III.3.2.13. Diffraction des rayons X(DRX)

La diffraction des rayons X (XRD) est une méthode d'analyse polyvalente et non destructive utilisée pour examiner les caractéristiques physiques des échantillons, qu'ils soient sous forme de poudre, solide ou liquide. Cette technique permet de déterminer la composition des phases, la structure cristalline et l'orientation des échantillons, offrant ainsi une gamme d'applications diverses et variées.

Dans notre cas, les rayons X sont dirigés sur les échantillons en poudre, qui diffracte les rayons dans différentes directions en fonction de sa structure cristalline. En mesurant l'angle de diffraction des rayons X, on peut déterminer la disposition des atomes dans l'échantillon et ainsi obtenir des informations sur sa structure cristalline. La détermination des phases amorphes et cristallines par diffraction des rayons X a été réalisée par un diffractomètre XRD (Philips, X'Pert), utilisant un rayonnement $\text{Cu K}\alpha$ (rayonnement caractéristique du cuivre) en appliquant une tension de 40 Kv et un courant de 35 mA (figure III-24). Lorsque les rayons X rencontrent l'échantillon, ils sont diffractés dans différentes directions. La nature et l'intensité de cette diffraction dépendent de la structure atomique de l'échantillon. Le diffractomètre mesure les angles et les intensités des rayons X diffractés. Ces mesures sont prises avec une largeur de pas de 0.02° , couvrant une plage angulaire de 10° à 80° .

Les données obtenues sont comparées aux cartes ICDD, qui contiennent des informations standardisées sur les positions et les intensités des pics de diffraction pour diverses substances. Cela permet d'identifier les phases présentes dans l'échantillon, qu'elles soient amorphes ou cristallines. En utilisant les données de diffraction et les cartes ICDD, on peut déterminer la composition des phases, la structure cristalline et l'orientation des cristaux dans l'échantillon. Cette information est cruciale pour comprendre les propriétés physiques et chimiques du matériau analysé.



Figure III-24: Diffractomètre DRX (Philips, X'Pert)

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté:

- Le plan expérimental conçu pour évaluer les propriétés et la performance des différents mélanges de béton de sable. Cela inclut les objectifs spécifiques de l'expérimentation, les variables contrôlées et mesurées, ainsi que les conditions sous lesquelles les essais ont été menés;
- La formulation des différents mélanges de béton de sable, nous avons décrit les diverses compositions des mélanges de béton de sable, en précisant les proportions de chaque composant, tels que le ciment, le sable de dune, le sable de déchets de granite, le clinker recyclé, et les additifs éventuels. De plus, nous avons expliqué les critères de sélection des matériaux utilisés et les raisons de ces choix pour chaque formulation. Nous avons également couvert le

mode de fabrication, en détaillant les étapes de mélange, de malaxage, et de coulage, ainsi que les procédures de conservation des éprouvettes, qui sont essentielles pour garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats;

- Les différentes catégories de tests effectués sur les bétons de sable, en distinguant les essais réalisés à l'état frais et à l'état durci. Les méthodes d'essais sont détaillées comme suit:

- A l'état frais:
 - La masse volumique;
 - Ouvrabilité;
 - L'air occlus.

- A l'état durci:
 - Essai de compression et en traction par flexion;
 - Essai ultrasonique pour évaluer l'homogénéité du béton durci;
 - Dureté de surface au scléromètre;
 - Essai de retrait et perte en masse;
 - Essai de gonflement et gain de masse;
 - Essai d'absorption par immersion;
 - Essai d'absorption capillaire et sorptivité;
 - Essai d'attaque chimique par les acides et les bases;
 - Essai d'attaque par les chlorures;
 - Mesures de la variation dimensionnelle et pondérale après des cycles de gel/dégel.

Les résultats des essais effectués et les discussions seront présentés dans les chapitres suivants. Ces résultats fourniront des informations détaillées sur la performance des différents mélanges de béton de sable, permettant d'identifier les formulations optimales pour diverses applications. Les discussions incluront des analyses comparatives, des interprétations des données obtenues, et des recommandations pour l'utilisation pratique de ces bétons.

Chapitre IV

**Influence du taux de substitution
des sables recyclés sur les
propriétés du béton de sable**

IV. Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les résultats relatifs aux propriétés physiques du béton frais, incluant la densité, l'ouvrabilité et l'air occlus. Ces caractéristiques sont essentielles pour comprendre le comportement du béton avant sa prise et son durcissement, influençant ainsi sa mise en œuvre et sa performance à long terme. Nous avons également examiné les propriétés mécaniques du béton à l'état durci, telles que la résistance à la compression et à la traction par flexion, la dureté de surface, l'auscultation sonore et une étude structurale par DRX. Ces propriétés mécaniques sont cruciales pour évaluer la capacité du béton à supporter des charges et à résister aux forces extérieures. Par l'analyse de ces différentes propriétés, nous pouvons mieux comprendre les performances globales du béton et optimiser sa formulation pour des applications spécifiques.

IV.2. Effet du taux de substitution sur les propriétés du béton à l'état frais

IV.2.1. Masse volumique

La figure IV-1 montre que les densités à l'état frais des bétons confectionnés augmentent en augmentant les taux de substitution en sables recyclés. La densité la plus élevée est obtenue pour le béton à base de 40% de sable de déchet de granite (BSG40). Elle dépasse la valeur illustrée par le béton témoin de 9.16% et celle du béton contenant 40% de sable de déchet de clinker (BSC40) de 4.38%. Cette augmentation de densité est attendue du fait que les sables recyclés possèdent des masses volumiques absolues, des quantités de fines qui remplissent les vides disponibles entre les constituants du béton et des coefficients d'absorption d'eau supérieures à celle du sable ordinaire. Par conséquent, ces résultats sont compatibles avec ceux trouvés par **Abukersh & Fairfield (2011)** et **Kherraf et al., (2022)** et contraires à ceux obtenus par **Asadi Shamsabadi et al., (2018)**.

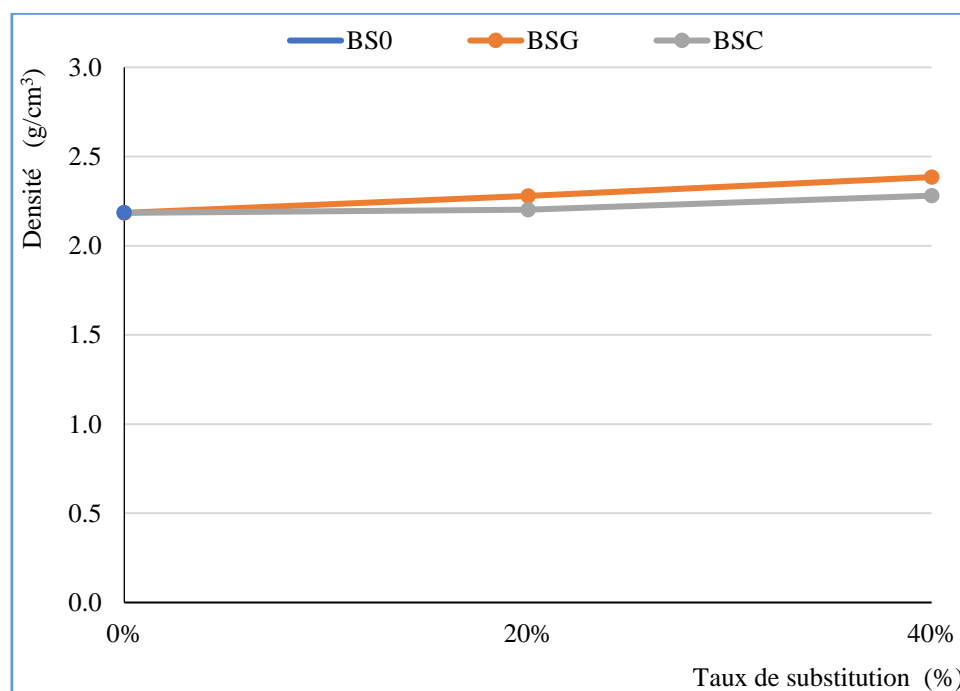


Figure IV-1: Evolution de la densité en fonction du taux de substitution

IV.2.2. Ouvrabilité

Le remplacement partiel du sable ordinaire par les sables recyclés SG et SC entraîne une augmentation de l'ouvrabilité (figure IV-2), avec la valeur maximale atteinte par le béton BSG40, dépassant celle du béton BSC40 de 17% et celle du béton témoin de 27%. De plus, cette amélioration peut être attribuée à la meilleure distribution granulométrique de SG d'une part. D'autre part, la taille de particule plus fine, qui a contribué à réduire le frottement inter-articulaire au sein de la matrice cimentaire en raison des caractéristiques morphologiques rugueuses et angulaires du granite, ce qui peut améliorer l'emboîtement entre les particules et renforcer la cohésion au sein du mélange de béton. Ce meilleur compactage des particules peut conduire à une réduction des vides et améliorer la compacité globale du béton, augmentant ainsi son ouvrabilité (Li et al., 2016; Sharma et al., 2017). Ces résultats contredisent ceux trouvés par Zhang et al., (2020).

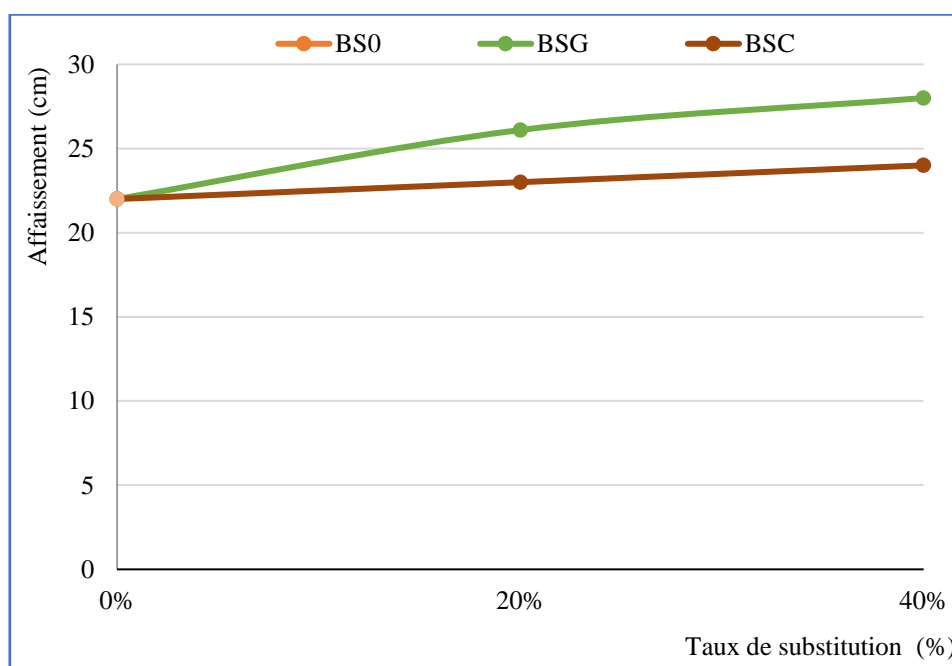


Figure IV-2: Evolution de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution

IV.2.3. Air occlus

Les volumes d'air contenu dans les bétons à base de sable de clinker sont légèrement plus élevés que ceux des bétons contenant du sable de déchet de granite BSG (figure IV-3). À cet égard, les augmentations enregistrées du volume d'air occlus par rapport au béton témoin sont de 19.61% pour les bétons BSG40 et de 27.45% pour les bétons BSC40. De plus, cette augmentation du volume d'air occlus dans les bétons à base de sables recyclés est certainement liée à la morphologie de ces grains, qui emprisonne les bulles d'air dans la matrice cimentaire des bétons (Boughamsa et al., 2023; Kherraf et al., 2023).

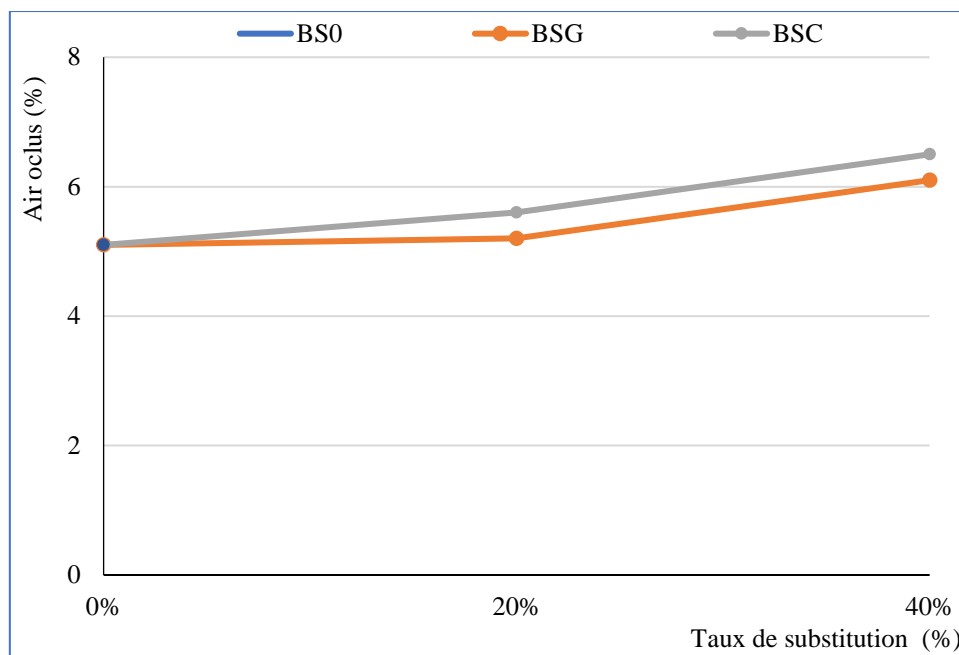


Figure IV-3: Evolution de la teneur en air occlus en fonction du taux de substitution

IV.3. Effet du taux de substitution sur les propriétés à l'état durci

IV.3.1. Densité à l'état durci

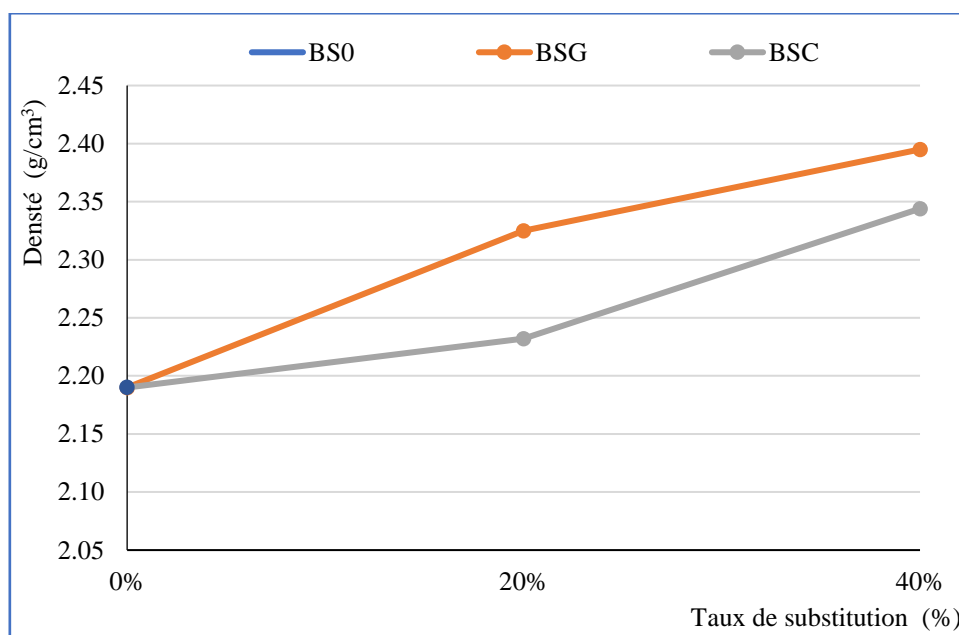


Figure IV-4: Evolution de la densité à l'état durci en fonction du taux de substitution

Les densités à l'état durci des bétons à base de déchet de granite et de clinker recyclé sont totalement croissantes (figure IV-4). Le béton à base de 40% de SG atteint une valeur maximale valant 2.395g/cm^3 , cette valeur dépasse la valeur affichée par le témoin de 9.3% et celle du béton BSC40 de 2.1%. Ceci confirme que les caractéristiques intrinsèques du matériau et le volume d'eau non liée dans la matrice sont les principaux facteurs qui influent la densité des bétons. Ces résultats sont contredits avec **Ahmadi et al., (2022)** et **Singh et al., (2016)** qui ont trouvé une diminution de la densité lors de l'utilisation de granite.

IV.3.2. Résistance en compression

Les résultats ont démontré une augmentation de la résistance avec l'utilisation de SG et SC comme substitution partielle du sable par rapport au béton de référence (figure IV-5). La résistance maximale a été observée pour le mélange BSC40 à toutes les périodes de durcissement. L'augmentation de la résistance des mélanges après l'inclusion de 20% et 40% de SG a été observée. Néanmoins, cette augmentation de résistance pourrait être attribuée à la taille plus fine de SG, le meilleur effet de remplissage des particules réduit également les vides interconnectés et améliore la densité de la matrice du béton, ce qui améliore la résistance à la compression du béton jusqu'à un pourcentage optimal de déchets de granite (**Jain et al., 2020**).

De plus, la rugosité et la forme irrégulière des particules de granit augmentent la résistance, car ces particules offrent une meilleure adhésion, ce qui entraîne un meilleur développement du lien entre la pâte de ciment et les granulats (**Gautam et al., 2022; Pérez et Zamora, 2023**). En outre, une tendance similaire de gain de résistance a également été observée par plusieurs chercheurs, notamment **Singh et al., (2016)** et **Ghannam et al., (2016)**, qui ont utilisé le granit comme remplacement des fins agrégats dans une plage optimale de 10% à 30% dans le béton. Des augmentations des résistances des mélanges BSC en fonction de l'augmentation du taux de substitution. Cette augmentation est expliquée par le pouvoir hydraulique des fines particules du SC d'une part. D'autre part cette augmentation des résistances est la conséquence de l'augmentation de la compacité à cause d'une réaction pouzzolanique qui s'est développée par les fines réactives contenues dans le SC (**Alnahhal et al., 2018; Liu et al., 2021**). Par conséquent, nos résultats contredisent ceux obtenus par **Prošek et al., (2020)**.

A 28 et 90 jours, les bétons à base de sable de clinker recyclé donnent les meilleures résistances à la compression par rapport aux bétons à base de sable de déchet de granite. Néanmoins, cela est dû, d'une part, au module de finesse du sable SC et, d'autre part, à la présence de CaO, qui fournit beaucoup de C3S, un élément responsable de la résistance et de la cohésion (**Hebhoub et al., 2011; Rihia et al., 2019**).

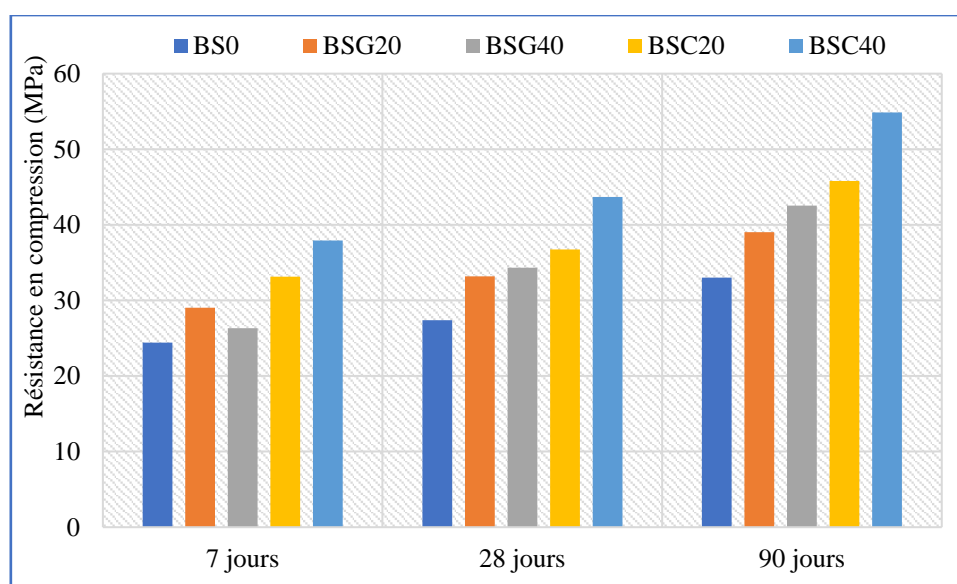


Figure IV-5: Influence du taux de substitution et du type de sable sur la résistance en compression

Une ligne de corrélation de tendance linéaire entre la densité à l'état durci pour tous les bétons étudiés et la résistance à la compression s'incline vers le haut, avec des valeurs du coefficient de corrélation de 0.8867 et 0.964 pour BSG et BSC respectivement, comme le montre la figure IV-6. Cela indique une bonne corrélation entre les points de données et la courbe de régression, ce qui dénote la précision des résultats. Des tendances similaires des propriétés mécaniques ont été observées dans l'études de **Zafar et al., (2020)**.

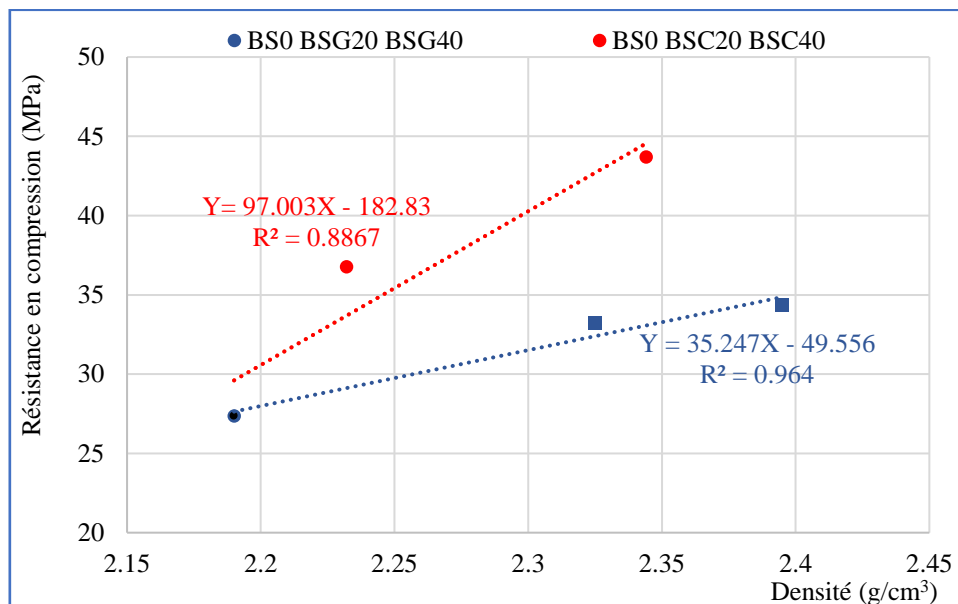


Figure IV-6: Corrélation entre la résistance en compression et la densité

IV.3.3. Résistance à la traction par flexion

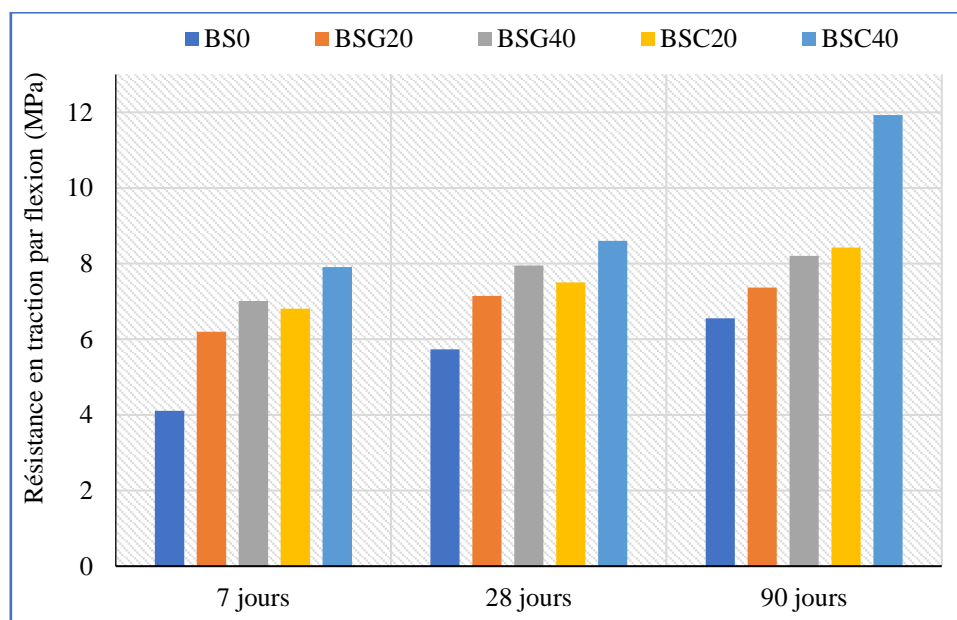


Figure IV-7: Influence du taux de substitution et du type de sable sur la résistance en traction par flexion

Aux trois échéanciers 7, 28 et 90 jours (figure IV-7), les résistances en traction par flexion des bétons à base de sable recyclé étaient meilleures que celles du béton témoin. De plus, le BSC40 a montré la résistance la plus élevée, avec une augmentation de 82% par rapport au

béton de référence. À cet égard, ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que le SC est caractérisé par des grains plus acérés et plus poreux, qui forment des liaisons plus fortes avec la pâte de ciment dans le mélange (Prošek et al., 2020). Lorsqu'ils réagissent avec les minéraux du ciment et l'eau, les composants anhydres du clinker créent des hydrates qui diminuent la porosité du béton et augmentent la cohésion (Hebhoub et al., 2011). Ces composants remplissent les vides entre les particules, conduisant à des matrices plus denses et à une résistance en flexion accrue. En vertu de quoi, ces résultats se sont avérés cohérents avec ceux trouvés par Mebarkia et al., (2022).

Une augmentation des résistances en traction par flexion a été observée dans les bétons à base de SG par rapport au béton de référence. Cette amélioration est due à la texture rugueuse du sable de granite, qui pourrait avoir amélioré l'adhérence des granulats à la pâte de ciment (Sadek et al., 2016; Singh et al., 2017). La figure IV-8 présente une corrélation linéaire précise entre la résistance à la compression et la résistance en traction par flexion pour tous les bétons étudiés, avec un coefficient de corrélation de 0.9557 et 0.9978 pour BSG et BSC respectivement, ce qui indique la précision des résultats.

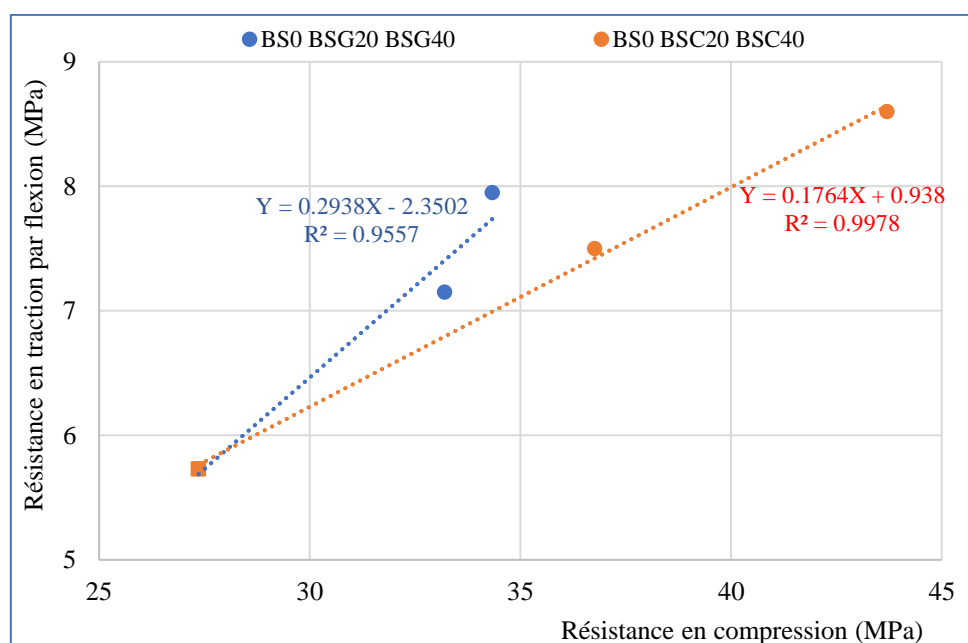


Figure IV-8: Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction par flexion

IV.3.4. Résistance en compression obtenue par scléromètre

La figure IV-9 montre que l'introduction de sable recyclés dans le béton de sable a augmenté la résistance à la surface par rapport au béton témoin. Cependant, l'ajout de sable de déchets de granite influe positivement sur la dureté à la surface. La résistance en compression augmente en fonction de l'augmentation du taux de substitution du SG pour atteindre une valeur maximale de 31.4MPa dans le béton BSG40, ceci est expliqué que le sable de déchets de granite contient beaucoup de silice (41.2%) ce qui confère des résistances élevées à moyen et long terme.

L'ajout de sable de clinker recyclé avec un taux de 40% donne la résistance maximale obtenue par scléromètre, ceci est expliqué par la présence du CaO dans le sable de clinker qui donne un bon collage de la matrice granulats (Hebhoub et al., 2011). Les résistances à base

de sable de clinker recyclé sont plus élevées en comparaison avec les bétons à base de sable de déchets granite, qui peut être du a la composition chimique du clinker qui est proche à la composition chimique du ciment.

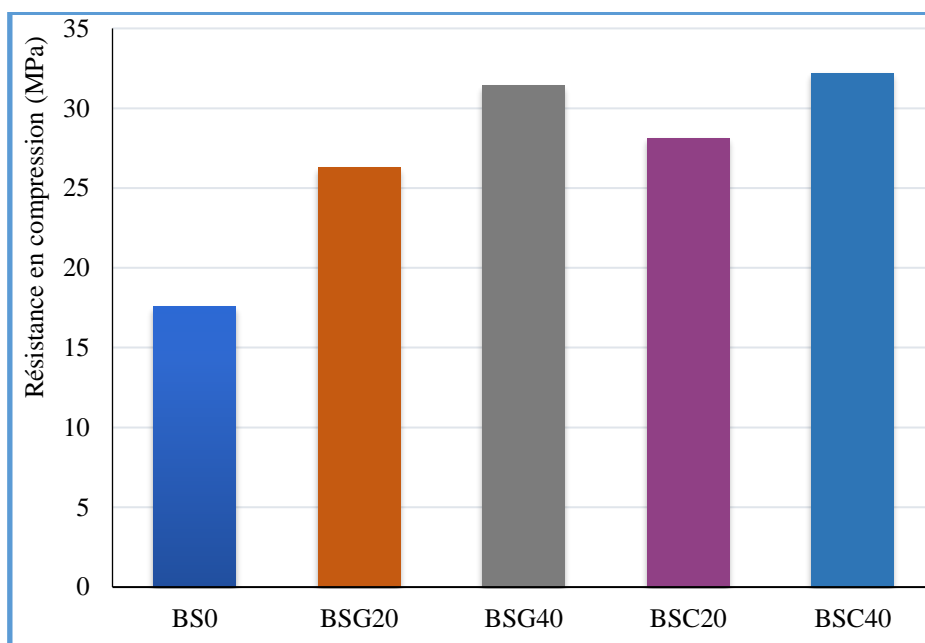


Figure IV-9: Résistance en compression obtenue par scléromètre

La figure IV-10 montre la variation de l'indice de rebondissement des mélanges en fonction de type de béton. Elle présente une corrélation linéaire précise entre les deux facteurs avec un coefficient de corrélation de (0.966 et 0.923) pour BSG et BSC respectivement. Il est évident que l'indice de rebondissement des bétons à base des déchets recyclés est supérieur à celle du béton témoin, il augmente en augmentant le taux de substitution pour les deux types de bétons BSG et BSC. La valeur maximale de l'indice de rebondissement est donnée par BSC40.

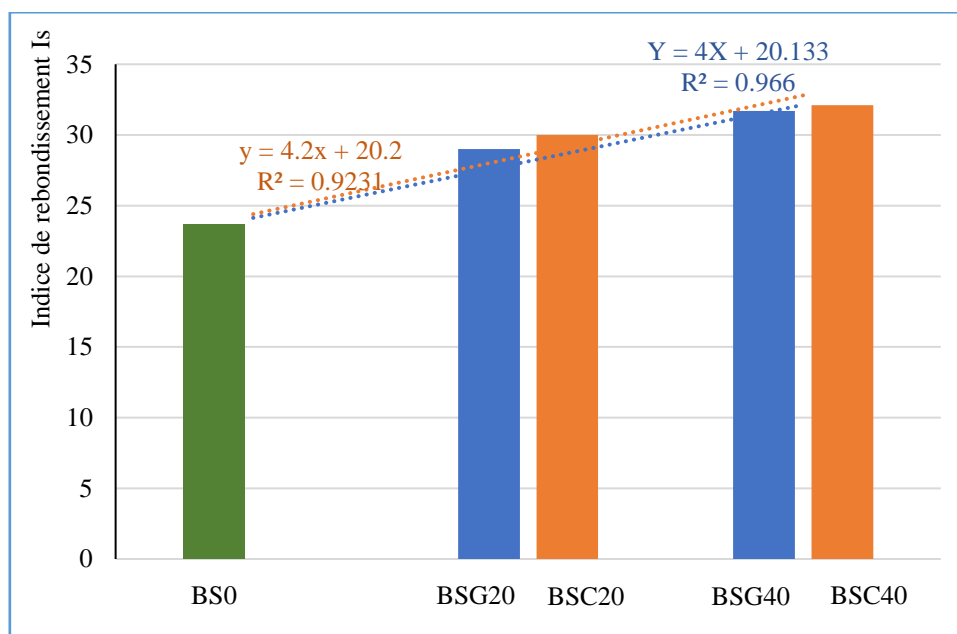


Figure IV-10: Variation de l'indice rebondissement en fonction du taux de substitution et type de sable

La corrélation entre les indices de rebondissement et les mesures de résistance en compression obtenus par des essais destructifs est illustré sur la figure IV-11, cette corrélation est établie par une relation linéaire, avec un coefficient de (0.9656 et 0.9627) pour BSG et BSC respectivement. Les valeurs de l'indice de rebondissement données par le béton à base de clinker recyclé sont meilleures que celles obtenues par le béton témoin et le béton à base des déchets de granite, ce qui donne les meilleures résistances. Ces résultats confirment encore une fois que les deux mélanges BSC20 et BSC40 sont les plus résistants.

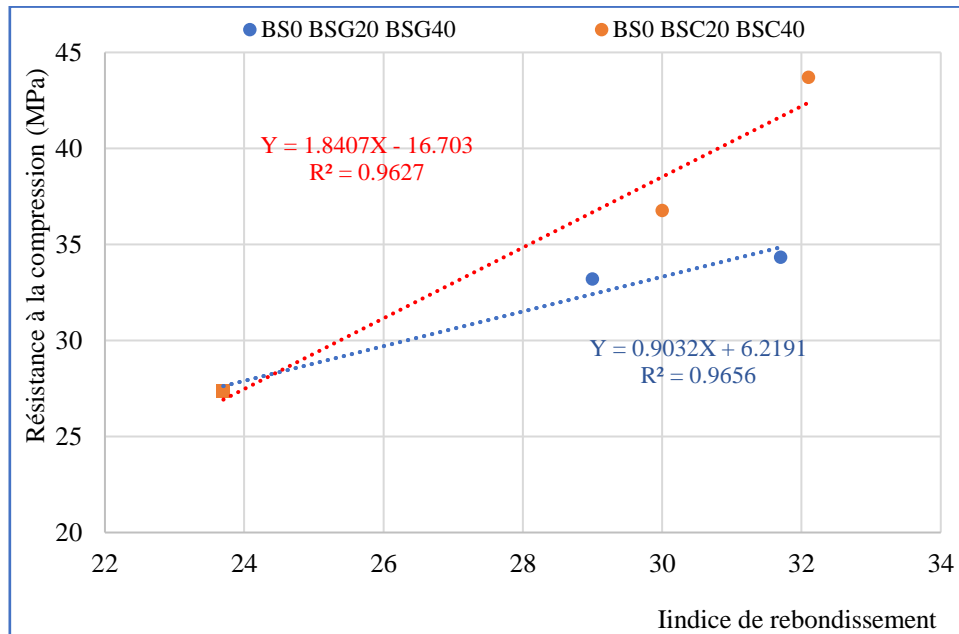


Figure IV-11: Corrélation entre la résistance en compression obtenue par essai destructif et l'indice de rebondissement

IV.3.5. Vitesse ultrasonique

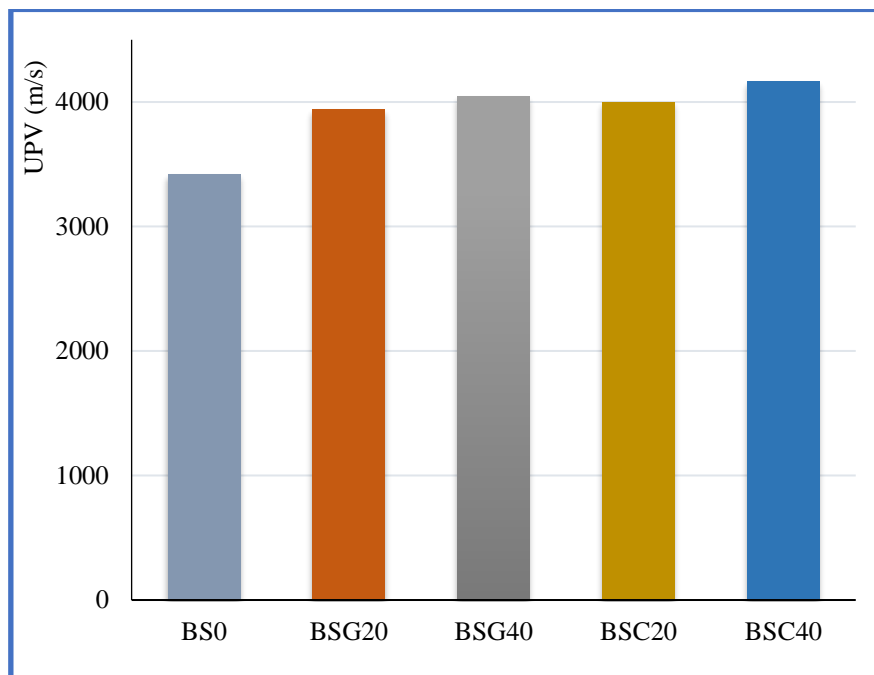


Figure IV-12: Variation de l'UPV en fonction du taux de substitution et type de sable

En effet, l'introduction de sable recyclé en tant que remplacement partiel du sable ordinaire entraîne une augmentation des vitesses ultrasoniques des mélanges, quel que soit le taux et le type de sable (figure IV-12). Les bétons à base de sable de clinker ont montré les vitesses les plus élevées par rapport aux bétons à base de SG, ces résultats sont expliqués par la structure plus dense des bétons à base de SC par rapport aux bétons à base de SG (**Smarzewski et Błaszczyk, 2024**). Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par **Abbaszadeh et Modarres (2017)** et **Sharma et al., (2022)**.

IV.3.6. Résistance en compression obtenue par la méthode combinée

La résistance des mélanges à base des sables recyclés obtenues par la combinaison entre scléromètre et ultrason (figure IV-13) croît avec l'augmentation de la teneur en sables recyclés et les mélanges à base de SC donnent des résistances élevées en comparaison avec les mélanges à base de SG. Les résistances obtenues par la méthode combinée sont compatibles avec les résistances obtenues par l'essai destructif et par UPV et scléromètre.

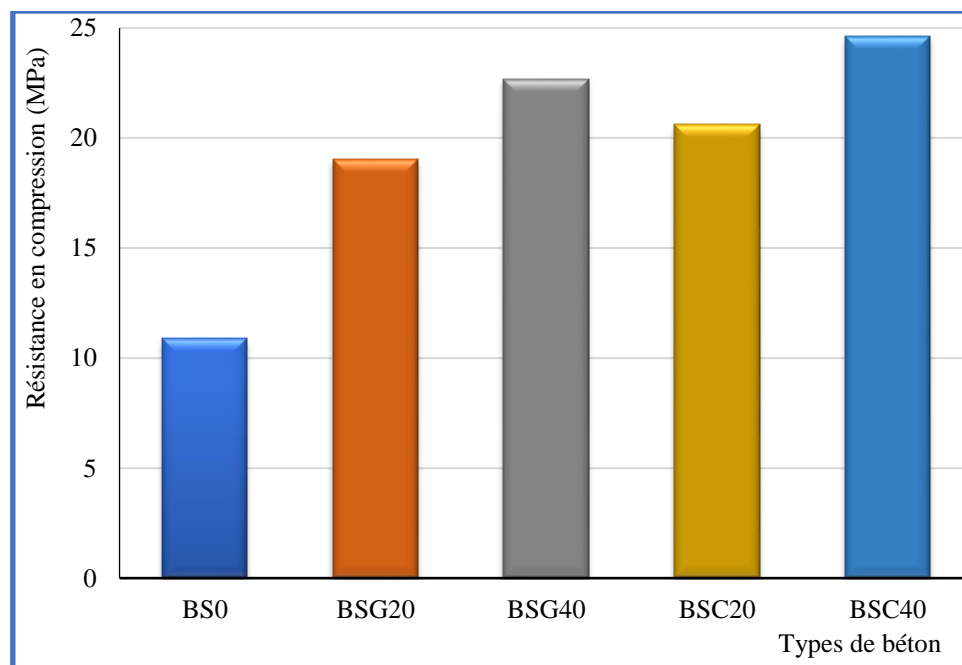


Figure IV-13: Résistance en compression obtenue par la méthode combinée

IV.3.7. Etude structurale par DRX

En fait, l'analyse par diffraction des rayons X (XRD) a été réalisée sur des échantillons de béton sélectionnés, comme le montre la figure IV-14, afin d'obtenir des intensités comparatives des composés produits dans les échantillons de béton sablé. A cet égard, des mesures ont été prises entre l'intensité et les valeurs 2 θ des échantillons de béton pour les pics de calcite (CaCO_3), quartz (SiO_2), portlandite (Ca(OH)_2) et silicate de calcium (Ca_2SiO_4).

Le graphique illustre la présence de quartz et de calcite, avec des pics d'intensité maximale pour le mélange SCC40 par rapport aux autres mélanges. De plus, des pics légèrement plus élevés de quartz et de calcite ont été observés pour les mélanges SCG20 et SCG40 par rapport au béton témoin. De même, le quartz et la calcite agissent comme des charges inertes dans la matrice du béton, résultant en une microstructure dense (**Jain et al., 2020**). Par

conséquent, la présence de portlandite en quantité optimale réduit les pores et contribue également à l'augmentation de la résistance (Siddique et al., 2018).

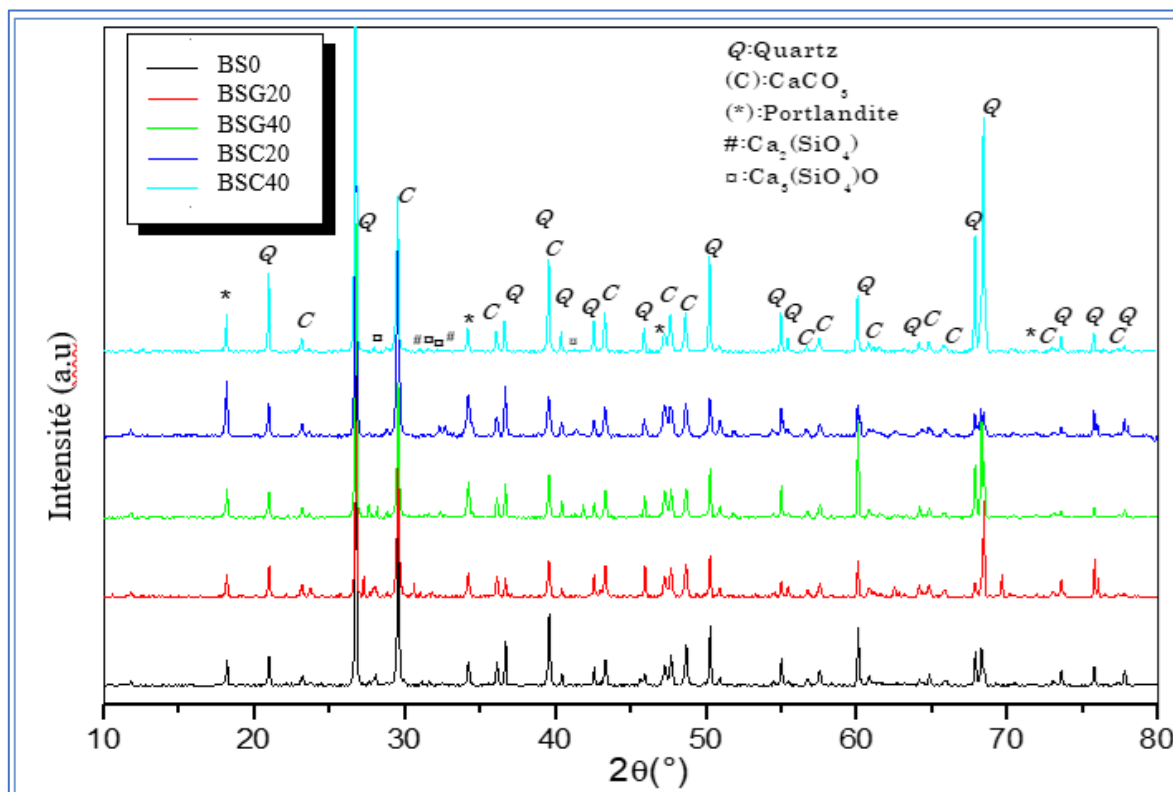


Figure IV-14: Analyse par diffraction des rayons X (XRD)

En détaillant ces observations, nous constatons que le quartz (SiO_2) et la calcite (CaCO_3), en tant que composants inertes, sont essentiels pour la densification de la matrice de béton. Leur présence favorise une distribution homogène des charges et améliore la stabilité dimensionnelle du béton. La portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), un produit de l'hydratation du ciment, contribue non seulement à la résistance mécanique mais aussi à la réduction de la porosité, ce qui est crucial pour la durabilité du béton en milieu agressif.

Le silicate de calcium (Ca_2SiO_4), identifié par ses pics caractéristiques, est également un composant clé, renforçant la structure globale du béton. Les résultats de l'analyse DRX confirment l'importance de ces composés dans la formulation des mélanges de béton, offrant des indications précieuses pour l'optimisation des propriétés mécaniques et de durabilité.

En résumé, l'analyse DRX permet de comprendre la composition minéralogique des bétons de sable et de corrélérer la présence de certains composés avec des propriétés spécifiques telles que la densité, la résistance et la durabilité. Les observations tirées de la figure IV-14 mettent en lumière l'importance de sélectionner des formulations optimales pour améliorer la performance des bétons de sable dans divers environnements d'application.

IV.4. Conclusion

Ce chapitre étudie l'impact de la substitution partielle du sable ordinaire par des sables recyclés (sable de déchet de granite et de clinker recyclé) sur les propriétés mécaniques du

béton de sable. Les analyses se concentrent sur plusieurs aspects du béton, tant à l'état frais qu'à l'état durci:

- Le remplacement partiel du sable ordinaire par des sables recyclés de déchets de granite et clinker recyclé dans la formulation d'un béton de sable rend ce dernier plus lourd, plus ouvrable et contient plus d'air occlus.
- La densité des bétons durcis augmente avec le taux de substitution, BSG40 ayant une densité supérieure par rapport aux autres bétons.
- La substitution partielle du sable de dune par des sables recyclés entraîne une amélioration dans les résistances en compression en fonction de l'augmentation du taux de substitution et l'âge. Les bétons contenant le sable de clinker recyclé sont plus résistants en compression en comparaison avec le sable de déchets de granite.
- Le comportement en traction par flexion est le même qu'en compression, les résistances maximales sont données par le béton contenant 40% de clinker recyclés aux âges 7, 28 et 90 jours.
- L'introduction des sables recyclés comme remplacement partiel du sable ordinaire dans la formulation d'un béton de sable augmente la dureté à la surface et l'homogénéité du béton de référence en fonction de l'augmentation du taux de substitution. Les vitesses ultrasoniques et les résistances en compression obtenues par scléromètre dans les bétons à base de sable de clinker recyclé sont plus élevées par rapport aux bétons à base de sable de déchets de granite.
- Les résistances obtenues par la combinaison de méthodes non destructives (scléromètre et ultrasons) sont cohérentes avec celles des essais destructifs.
- Dans l'étude microstructural par DRX, les échantillons de béton montrent la présence de quartz et de calcite, contribuant à une microstructure dense et à une meilleure résistance mécanique surtout dans le béton à base de 40% de sable de clinker recyclé.
- Une bonne corrélation entre les différents paramètres étudiés ont été montrés par cette étude.

De cette étude, on peut dire que l'utilisation de sables recyclés, en particulier le sable de déchet de granite et de clinker recyclé, améliore les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable, rendant ces matériaux prometteurs pour des applications de construction durables.

Chapitre V

Effet du taux de substitution

des sables recyclés

sur les paramètres de durabilité

V. Effet du taux de substitution des sables recyclés sur les paramètres de durabilité

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tous les résultats des paramètres de durabilité des différents bétons de sable. Nous avons étudié la variation pondérale, c'est-à-dire les pertes et gains en masse du béton, ainsi que la variation dimensionnelle, comprenant le retrait et le gonflement. Nous avons également examiné l'absorption d'eau par immersion, la capillarité et la sorptivité, la pénétration des chlorures, et la vulnérabilité des mélanges vis-à-vis des milieux agressifs tels que l'acide acétique (CH_3COOH), l'acide chlorhydrique (HCl), l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'acide sulfurique (H_2SO_4), ainsi que le cycle gel/dégel.

Ces paramètres de durabilité sont cruciaux pour évaluer la résistance du béton face aux conditions environnementales variées et agressives. La variation pondérale et dimensionnelle nous informe sur la stabilité physique du béton au fil du temps. L'absorption d'eau, la capillarité et la sorptivité permettent de mesurer la capacité du béton à résister à l'infiltration d'eau, ce qui est essentiel pour prévenir les dommages causés par le gel/dégel et la pénétration des substances chimiques nocives.

La pénétration des chlorures est particulièrement importante dans les environnements marins ou industriels où les structures en béton sont exposées aux sels de déneigement et autres sources de chlorures, ce qui peut entraîner une corrosion des armatures et compromettre l'intégrité structurelle. De plus, la résistance aux milieux agressifs chimiques est une mesure de la durabilité chimique du béton, essentielle pour les infrastructures exposées à des substances corrosives. Le cycle gel/dégel est un autre aspect crucial, car il teste la capacité du béton à résister aux fluctuations de température qui provoquent des expansions et des contractions répétées, pouvant mener à la fissuration et à l'endommagement de la structure.

L'analyse de ces variations et de ces paramètres nous fournit une compréhension approfondie de la durabilité et de la stabilité dimensionnelle du béton, influençant sa longévité et son comportement face aux conditions environnementales. En optimisant ces propriétés, nous pouvons améliorer la performance et la résilience des bétons de sable pour diverses applications.

V.2. Variations pondérales et dimensionnelles

V.2.1. Retrait total et perte en masse

La figure V-1 montre clairement que l'incorporation de sable recyclé provenant de déchets de clinker et de granite a un impact considérable sur le retrait des bétons. Après 120 jours de conservation, les valeurs moyennes de retrait de tous les bétons recyclés BSG et BSC, sont supérieures à celles enregistrées pour le béton de référence. Par conséquent, le résultat illustré par le béton témoin peut être attribué à la capacité de remplissage plus régulière du sable de dune. Ce qui contredit les résultats obtenus par **Kim et al., (2023)** qui ont contribué à une réduction du retrait et à une amélioration de la qualité des mélanges.

La substitution de déchets de granite a eu un effet important sur le retrait. Les taux de retrait du béton BSG20 est relativement plus élevés comparés à ceux du béton BSG40. Cependant, il convient de noter qu'une teneur élevée de déchets de granite créerait des pores qui augmenteraient significativement le retrait (**Huang et al., 2024**).

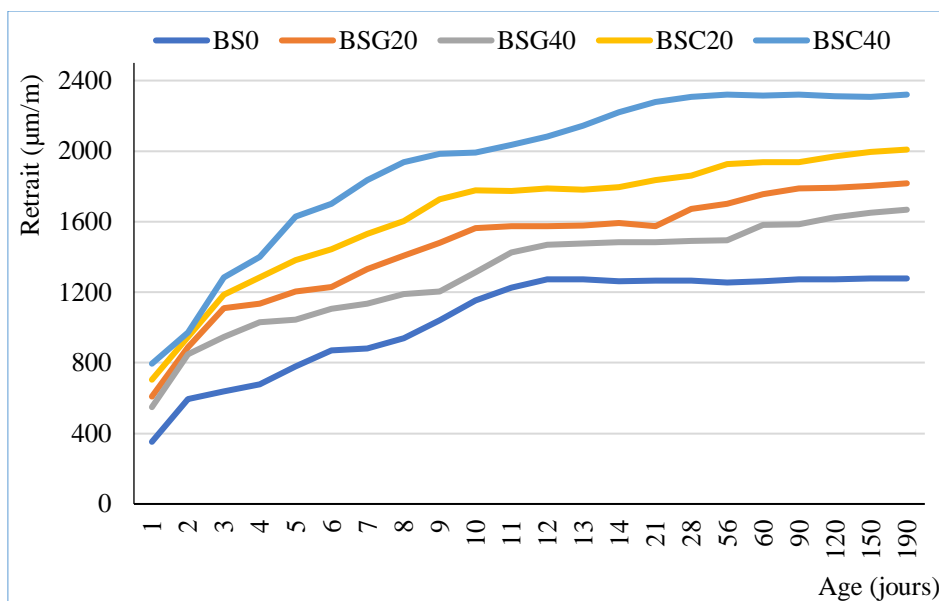


Figure V-1: Influence du taux de substitution et type de sable sur le retrait

De même, il peut également être remarqué que le retrait du béton contenant du sable de clinker recyclé est plus élevé que celui des autres types de béton. En fait, la valeur maximale est obtenue par le béton BSC40. Cependant, cela est dû à l'évaporation de l'eau piégée dans les grains de sable, qui ont une microstructure poreuse. De plus, ce sable contient des particules fines réactives qui participent à la réaction d'hydratation, entraînant une augmentation du volume de la pâte et, par conséquent, une augmentation du nombre de micropores remplis d'eau libre, qui se disperse lors du séchage à l'air libre.

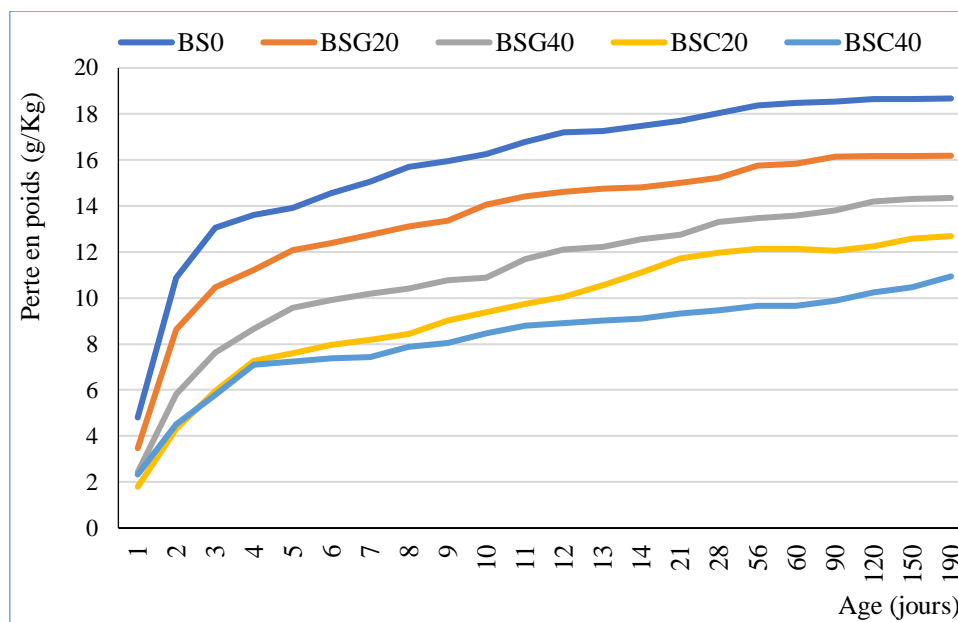


Figure V-2: Influence du taux de substitution et type de sable sur la perte en masse

Selon la figure V-2, le béton BS0 montre une perte de poids continue et relativement rapide au début, qui ralentit avec le temps. En revanche, les bétons BSG et BSC montrent une perte de poids initiale moins rapide que celle de BS0. La perte de poids est plus modérée et progresse de manière plus linéaire. La perte de poids rapide initiale de BS0 pourrait être due à l'évaporation de l'eau libre et à la contraction de la pâte de ciment.

Les bétons BSG20 et BSG40 montrent une meilleure performance en termes de réduction de la perte de poids par rapport au béton témoin. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le granite est un matériau dense et que ses particules peuvent combler les vides dans le béton, réduisant ainsi la porosité globale (Huang et al., 2024). Moins de porosité signifie une moindre capacité à retenir l'eau, ce qui réduit la perte de masse par évaporation. Les particules de granite ont une faible absorption d'eau par rapport au sable ordinaire, ce qui diminue la quantité d'eau libre dans le mélange susceptible de s'évaporer avec le temps. De plus, le granite est chimiquement stable et ne réagit pas de manière significative avec les composants du béton, ce qui réduit les phénomènes de lixiviation ou de dissolution de certains composants.

Les bétons BSC20 et BSC40 présentent également une meilleure résistance à la perte de poids initiale, avec une performance légèrement meilleure que celle des BSG. Cela peut s'expliquer par le fait que le clinker recyclé contient des composés comme le silicate de calcium qui réagissent avec l'eau pour former des produits d'hydratation supplémentaires, comblant les vides, augmentant la densité du béton et réduisant la porosité par rapport au granite. De plus, le clinker recyclé peut avoir une activité pouzzolanique, c'est-à-dire qu'il réagit avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former des composés cimentaires supplémentaires, augmentant ainsi la densité et la durabilité du béton (Murali et al., 2024)

V.2.2. Gonflement et gain en masse

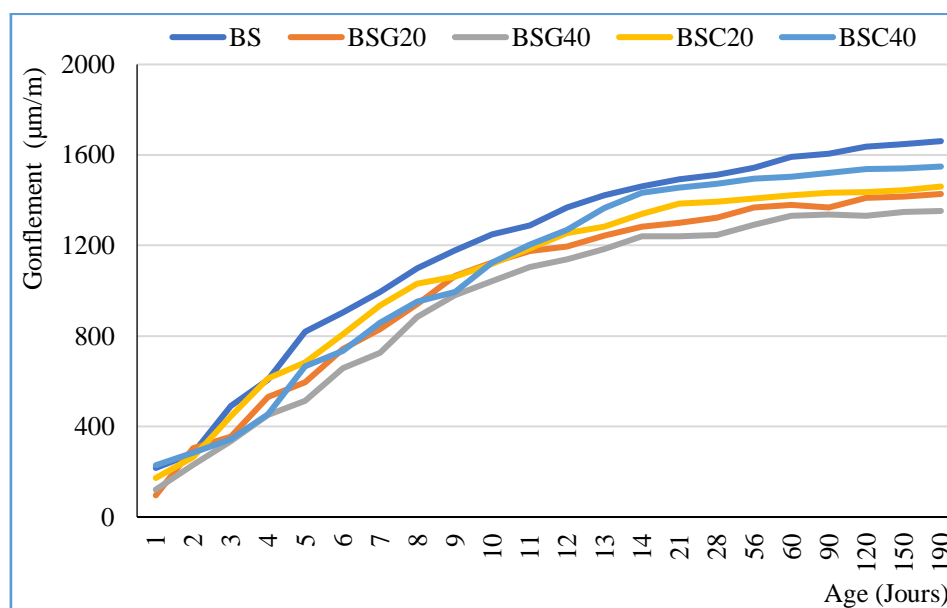


Figure V-3: Influence du taux de substitution et type de sable sur le gonflement

L'analyse des résultats obtenus selon la figure V-3, montre que les bétons à base de sable de déchet de granite et de clinker recyclé présentent des gonflements plus faibles que les bétons de référence. En effet, l'introduction de sable de granite dans les mélanges produit les valeurs de gonflement les plus faibles par rapport au BS0 et BSC. Cette réduction du gonflement peut s'expliquer par plusieurs facteurs, les sables de déchet de granite contiennent une quantité élevée de fines. Ces fines agissent comme un remplissage, réduisant la porosité globale du mélange de béton. En comblant les interstices entre les particules plus grosses, elles diminuent la quantité d'espace vide susceptible de retenir l'eau et de se dilater sous l'effet de l'humidité. Aussi la présence des fines contribue à une microstructure plus dense du béton ce

qui signifie moins de voies pour la migration de l'eau, ce qui réduit les possibilités de gonflement dû à l'absorption d'eau. Les fines de granite peuvent également participer à des réactions pouzzolaniques avec le ciment, formant des composés supplémentaires qui densifient davantage la matrice de béton et réduisent la porosité (**Danish et al., 2021**). Le sable de déchets de granite et le clinker recyclé peuvent avoir une compatibilité chimique et physique améliorée avec la matrice cimentaire, ce qui améliore la cohésion interne et réduit la tendance au gonflement.

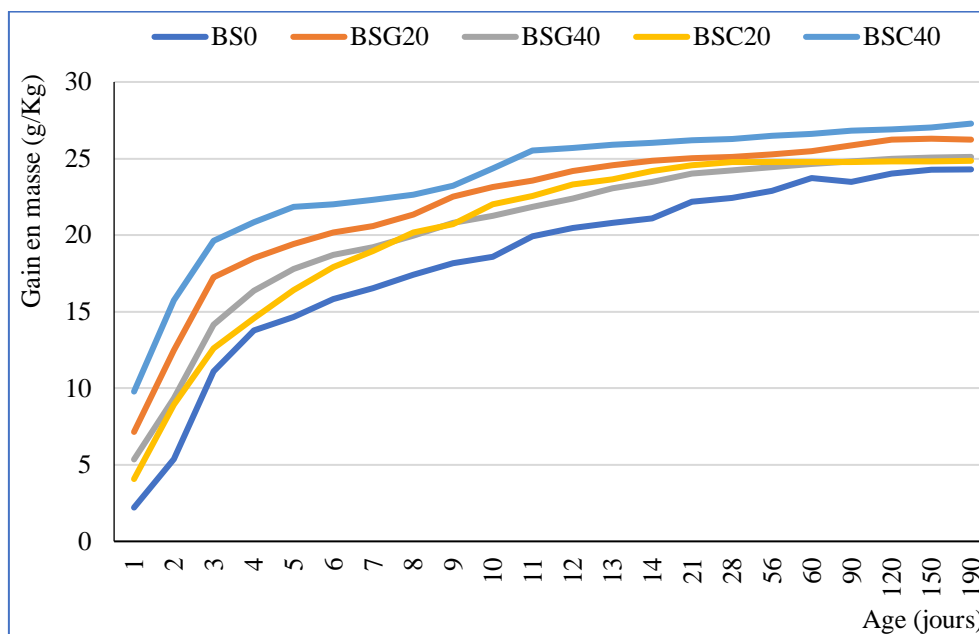


Figure V-4: Influence du taux de substitution et type de sable sur le gain en masse

L'analyse des résultats obtenus selon la figure IV-4, montre que les bétons de sable à base de sable de déchet de granite et de clinker recyclé présentent des gains en masse plus faibles que les bétons de référence. Tous les mélanges présentent une augmentation rapide pour les trois premiers jours, atteignant à 190 jours (26.22%, 25.10%, 24.84 % et 27.28%) pour BSG20, BSG40, BSC20 et BSC40 respectivement.

Pour les BSG, les résultats montrent une amélioration par rapport à BSO, mais le taux de gain en masse de BSG40 est légèrement inférieur à BSG20. Cela peut être expliqué que les déchets de granite, étant un matériau dense et dur, augmentent la densité et la masse du béton. Une substitution de 20% de SG semble offrir un équilibre optimal, où les particules de granite sont suffisantes pour améliorer la masse sans trop perturber la matrice de sable.

Pour les BSC, les résultats montrent que le BSC20 augmente la masse du béton par rapport à BSO, bien que légèrement moins que BSG40. Le BSC40 donne le taux de gain en masse le plus élevé parmi tous les types testés. Cela est expliqué que le clinker recyclé est un matériau résiduel de haute densité utilisé dans la fabrication du ciment, augmentant significativement la masse du béton. A 40%, le clinker recyclé contribue à un gain en masse considérable en raison de sa composition chimique et de sa capacité à se lier efficacement avec le liant, améliorant ainsi la densité du béton. Le clinker recyclé a probablement une plus grande réactivité chimique que le granite, permettant une meilleure intégration dans la matrice du béton.

V.3. Absorption par immersion

D'une manière générale, les bétons à base de sable recyclé présentent une absorption inférieure à celle du béton témoin (figure V-5), ce qui peut être expliqué par leurs coefficients d'absorption, qui sont plus bas que ceux du sable ordinaire. Néanmoins, la substitution du sable ordinaire par 40 % de sable de déchet de granite et de clinker recyclé a entraîné une réduction de l'absorption de 3.9% et 10% respectivement.

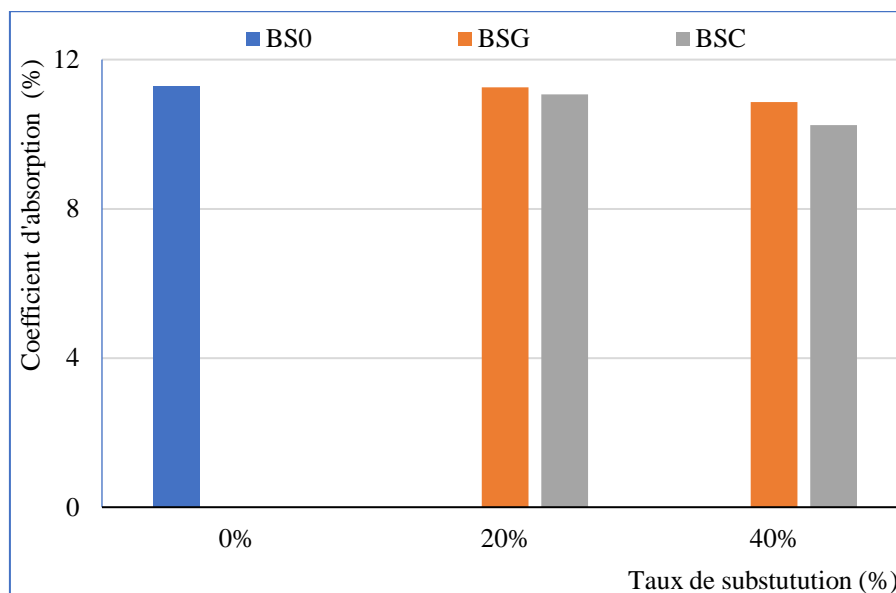


Figure V-5: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution et type de sable

De plus, le béton à base de sable de déchet de granite absorbe plus d'eau que le béton à base de sable de clinker recyclé. Cela est dû aux produits hydratés formés par l'ajout de SC, en particulier l'enchevêtrement du gel C-S-H, qui confère de la résistance au BSC et se développe sur la surface des grains non hydratés, remplissant progressivement les vides capillaires entre les grains et entraînant la densification de la matrice. Cela explique l'absorption d'eau plus faible du BSC par rapport au BSG (Kherraf et al., 2022). En conséquence, ces résultats se sont avérés cohérents avec ceux trouvés par Ahmadi et al., (2022) et Ghorbani et al., (2019).

V.4. Porosité accessible à l'eau

Les valeurs de la porosité accessible à l'eau après 28 jours de cure sont illustrées dans la figure V-6. Par conséquent, les résultats montrent une augmentation de la porosité lors de l'incorporation du sable de déchet de granite, soit une augmentation de 5% par rapport au béton témoin à un taux de substitution de 40%. Cette augmentation de la porosité est due à la présence de fines dans le granite et à une porosité supplémentaire dans la zone de transition interfaciale (ZTI) entre les faces lisses des grains de granite et la matrice cimentaire (Shilar et al., 2022).

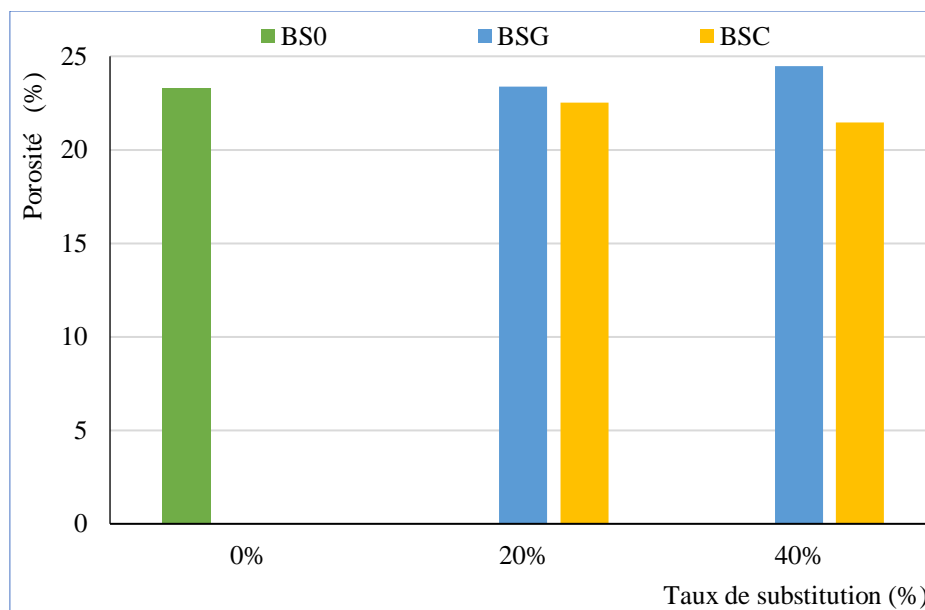


Figure V-6: Porosité accessible à l’eau en fonction du taux de substitution et type de sable

En revanche, il y a eu une diminution de la porosité lorsque le sable ordinaire a été remplacé par du sable de clinker recyclé. Néanmoins, cette réduction est de l'ordre de 8.5% à un taux de remplacement de 40%. En fait, l'utilisation de fines réactives a permis de densifier la matrice cimentaire, donnant naissance à de nouveaux produits d'hydratation et à une plus grande compacité, en conséquence.

V.5. Absorption capillaire et sorptivité

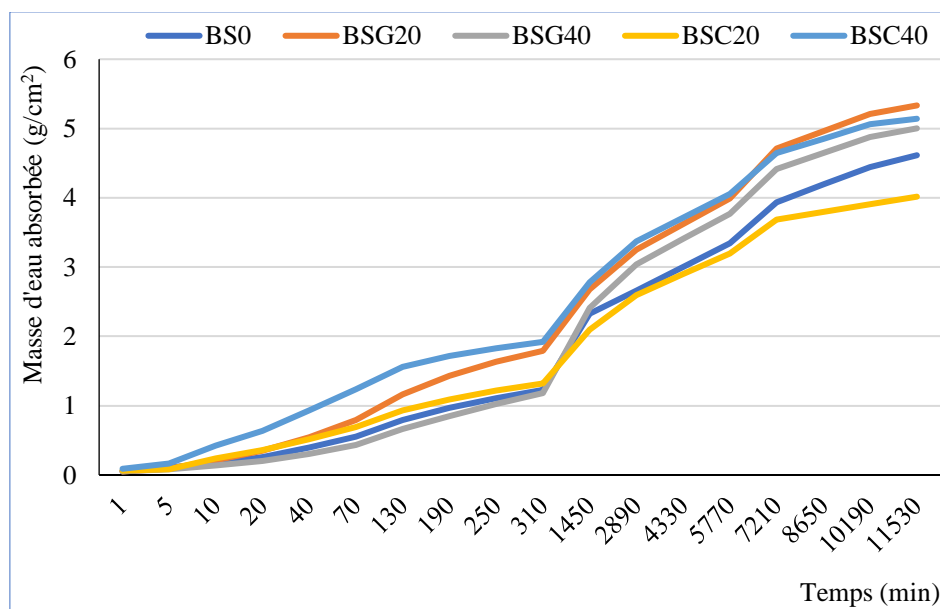


Figure V-7: Absorption d’eau par capillarité en fonction du temps

Selon les courbes de la figure V-7, trois phases peuvent être observées. La première phase est linéaire, s’étendant uniquement sur les cinq premières heures, et correspond au remplissage des capillaires les plus larges que l’eau pénètre en premier. Une deuxième phase linéaire mais avec une pente plus raide s’étend sur environ 8 jours après la première phase, correspondant à

la saturation des capillaires plus étroits qui nécessitent plus de temps pour se remplir. Enfin, tous les capillaires tendent vers la saturation (**Rabehi et al., 2013**). En effet, le béton contenant 20% de sable de clinker recyclé offre les meilleures performances, avec une masse d'eau absorbée inférieure de 14.89% à celle du témoin.

Par ailleurs, les bétons incorporant 20% et 40% de sable de déchet de granite montrent une plus grande capillarité, leurs coefficients d'absorption capillaire dépassant celui du témoin de 8.36% et 15.5% respectivement. Néanmoins, cela indique que les pores dans les matrices de béton de sable de déchet de granite sont grands et interconnectés par rapport à ceux du béton témoin et du béton de sable de clinker recyclé. En conséquence, ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par **Cheah et al., (2019)**.

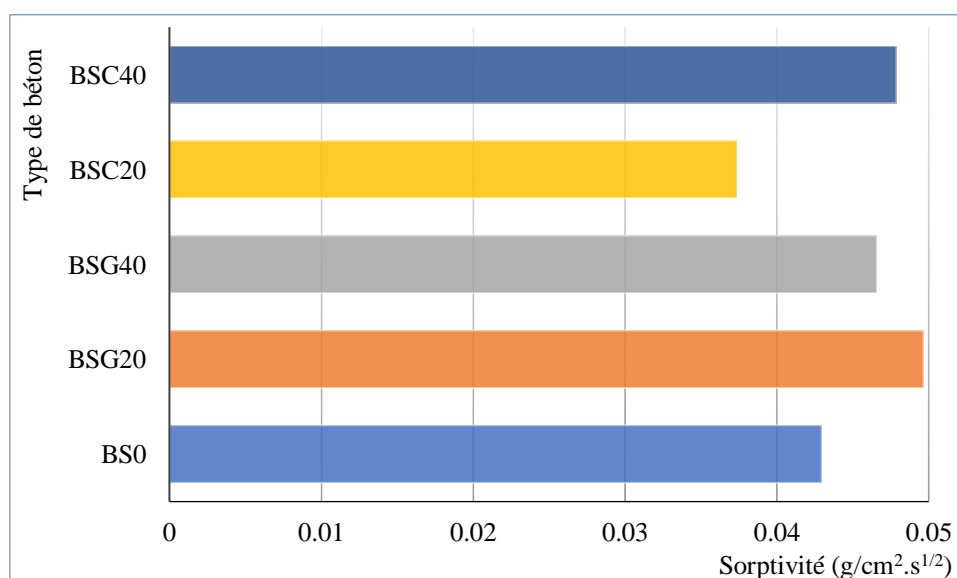


Figure V-8: Variation du coefficient de sorptivité

Le coefficient de sorptivité est un paramètre étroitement lié à l'absorption d'eau par capillarité, ainsi qu'à la porosité et à l'interconnexion des pores. La figure V-8 présente le coefficient de sorptivité pour les mélanges de béton examinés. Le coefficient de sorptivité s'est avéré directement proportionnel à l'absorption capillaire d'eau de chaque mélange de béton. Les mélanges de béton basés sur 20% de clinker recyclé (BSC20) ont montré les meilleures performances par rapport aux autres mélanges. On peut en déduire que le coefficient de sorptivité des bétons à base de déchets de granite diminue à mesure que le taux de substitution augmente. **Singh et al., (2016)** ont montré que l'absorption d'eau et la sorptivité du béton diminuent avec l'augmentation de la proportion de granite, ce qui contredit les résultats de **Pereira et al., (2022)**.

V.6. Pénétration des ions des chlorures

Le remplacement partiel du sable ordinaire par du sable recyclé (figure V-9) entraîne une réduction du pourcentage de pénétration des ions de chlorure par rapport au béton de référence, quel que soit le type de sable, et cette réduction augmente avec le taux de substitution. De plus, l'angularité et la rugosité des particules de sable de granite améliorent la microstructure (**Jain et al., 2022**) et développent des chemins capillaires tortueux dans le béton, ce qui pourrait être une cause de la prévention de la pénétration des ions de chlorure (**Cheah et al., 2019**).

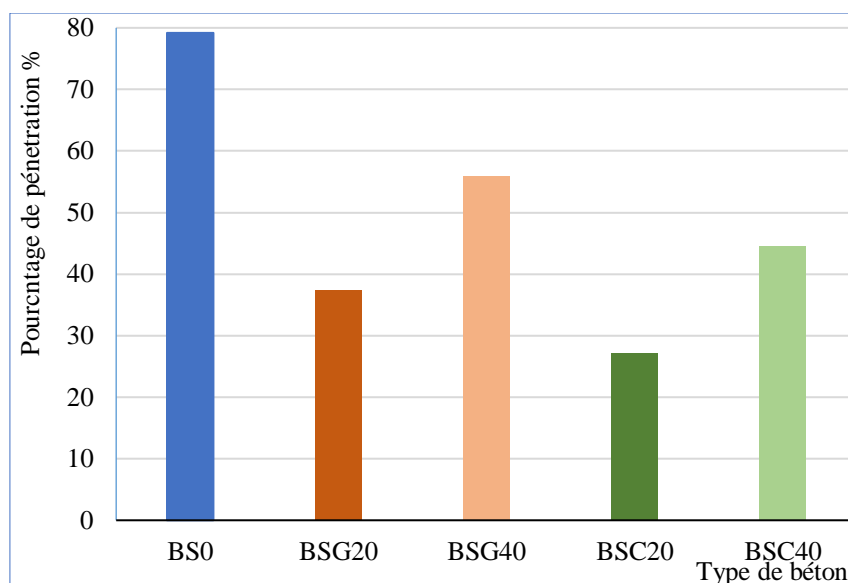


Figure V-9: Pourcentage de pénétration des chlorures.

Les bétons contenant du sable de clinker recyclé sont plus denses et de bonne consolidation de la matrice cimentaire par rapport aux bétons à base de SG (figure V-10), ce qui explique les pourcentages de pénétration plus faibles dans les bétons à base de SC par rapport aux bétons à base de SG.

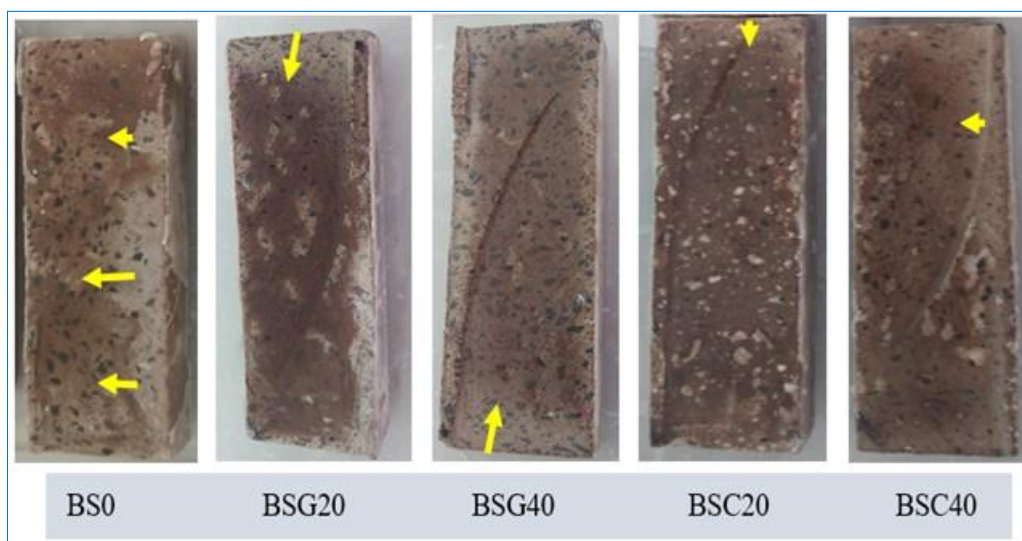


Figure V-10: Profondeur de la pénétration des ions chlorure sur les échantillons de béton.

L'introduction de sable recyclé à la place du sable ordinaire dans le béton de sable (figure V-11) entraîne une légère augmentation du pH; cependant, elle reste insignifiante. De plus, la variation du pH est de l'ordre de 1.35% pour le béton à 40% de SC, qui atteint la valeur maximale (11.08) par rapport au béton de référence. Ce résultat peut s'expliquer par la présence d'une grande quantité de CaO dans le SC, qui réagit fortement au contact de l'eau et forme de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , lequel se dissout en libérant des ions OH^- , stabilisant ainsi le pH de la solution (Gautam et al., 2022). Par conséquent, cette valeur reste dans la plage (9 à 13) pour le béton non carbonaté.

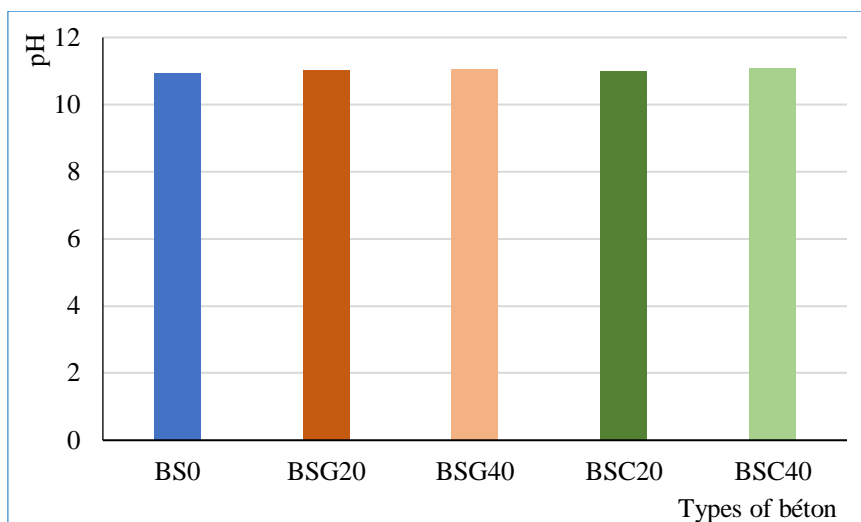


Figure V-11: pH des bétons exposé aux attaques par les chlorures.

V.7. Attaques chimiques

Les pertes de résistance mécanique et la perte en masse des différentes formulations de béton ont été rigoureusement mesurées lorsqu'elles sont exposées à divers agents agressifs, notamment CH_3COOH , HCl , NaOH et H_2SO_4 . Ces mesures nous permettent de comparer l'efficacité des différentes formulations et d'identifier celles qui présentent la meilleure résistance aux conditions chimiques extrêmes.

V.7.1. Pertes en masse dans les milieux agressifs

V.7.1.1. Pertes en masse pour une solution de 4% d'acide acétique CH_3COOH

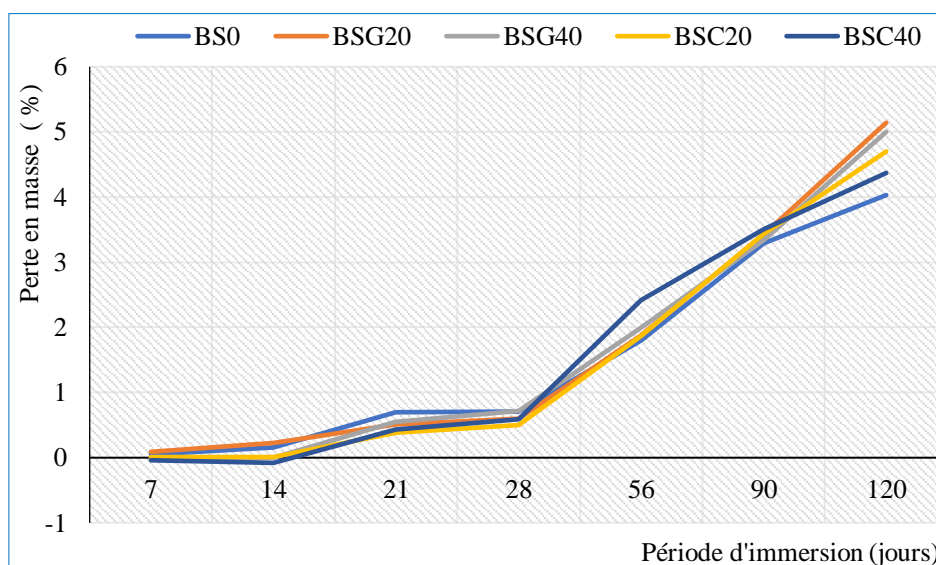
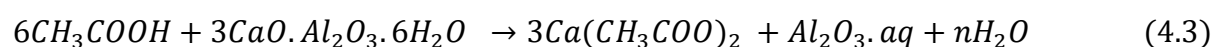
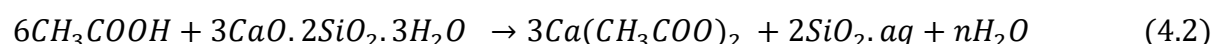
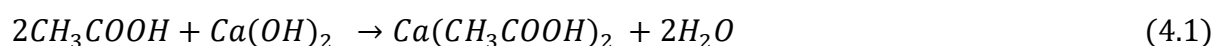


Figure V-12: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% CH_3COOH

La conservation des éprouvettes de béton pendant quatre mois dans la solution chimique de 4% de CH_3COOH a engendré des pertes en masse continues au fil du temps et qui se divergent d'une manière dissemblable de la valeur obtenue par le béton témoin (figure V-12). Les bétons BSG20, BSG40 et BSC20 subissent des pertes en masse quasi-semblables à celle

du témoin durant la période de 90 jours, au-delà, la tendance change et leurs dégradations se rapprochent et deviennent plus importantes. Les pertes acquises s'élèvent à 5.14%, 5% et 4.7% respectivement contre 4.03% pour le béton de référence. La perte en masse de BSC40 évolue d'une manière irrégulière, elle est visiblement supérieure à celle du témoin pendant la période d'exposition à l'attaque de l'acide acétique allant de 28 à 120 jours. Néanmoins, il peut être qualifié à long terme comme le plus performant dans la série des bétons à base de sables recyclés du fait que sa perte de masse est la plus faible valant 4.37%. Ces pertes de masse enregistrées peuvent être expliqués par le fait que l'acide acétique en contact avec les échantillons de béton peut réagir avec les différents composés hydratés et anhydres de la pâte de ciment (hydroxyde de calcium, C-S-H, aluminates hydratés, C3S, C2S) en trois réactions (Equations 4.1, 4.2 et 4.3) (Al-Swaidani et al., 2015).



Il est aussi à noter que les pertes en masse à l'attaque par l'acide acétique des bétons contenant le sable de clinker recyclé est meilleure que celle des bétons à base de sable de granite, la présence toujours des fines particules réactives dans le sable de déchet de clinker recyclé améliore la microstructure interne de la matrice cimentaire ce qui bloque la mobilité des ions de l'acide pour interagir avec les composés du ciment. La figure V-13 montre l'état des éprouvettes après attaque.



Figure V-13: Éprouvettes traitées par l'acide CH_3COOH

V.7.1.2. Pertes en masse pour une solution de 4% de l'acide chlorhydrique HCl

La figure V-14 montre que les pertes en masse du béton témoin sont inférieures que celles des bétons renfermant des sables de recyclage de déchet de granite et de clinker recyclé.

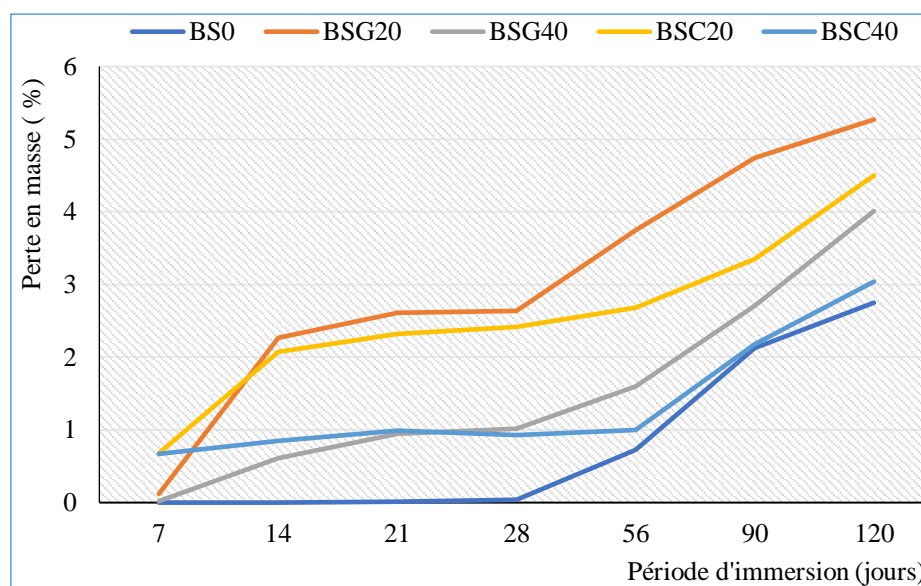


Figure V-14: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% HCl

En fait, durant les premières quatre semaines d'immersion dans la solution acide chlorhydrique, on observe que les courbes des pertes en masse des deux bétons BSG40 et BSC40 sont croissantes et se divergent relativement. Elles illustrent au terme de cet échéancier une perte de l'ordre de 0.93%. Cette remarque est aussi valable pour les deux autres bétons BSG20 et BSC20, toutefois les pertes en masse sont plus significatives, la valeur maximale atteinte par BSG20 est de 2.64%. En revanche celle illustrée par BSC20 vaut 2.49%.

A partir de l'âge de 28 jours de conservation, l'effet de l'acide chlorhydrique s'accroît et les pertes en masse deviennent plus importantes. Au final et au bout des 120 jours, le béton BSG20, subit la perte de masse la plus élevée. Il perd 5.27% de sa masse et dépasse celle obtenue par le béton témoin valant 2.75% et celle du béton BSC20 (4.5%). Il y a aussi lieu de noter que les bétons BSG40 et BSC40, résistent mieux à l'attaque de cet acide par rapport à ceux incorporant 20% de sables recyclés. En effet, ils perdent 4.01% et 3.04% de leur masse à 120 jours d'immersion. Cette dernière valeur est la plus proche de celle du témoin, donc ce béton est le plus performant dans la série des bétons à base de sable de recyclage.

Le taux d'attaque enregistré dépend de la composition et de la perméabilité du béton étudié, de la mobilité des ions de chlorures et également de la solubilité du sel résultant suite aux réactions (équation 4.4) développées aux seins des échantillons (Al-Swaidani et al., 2015).



En effet, l'incorporation des taux croissants de sable de clinker recyclé et de déchets de granite n'a pas impacté positivement la résistance chimique du béton de référence vis à vis l'attaque par l'acide chlorhydrique, toutefois, les pertes en masse des bétons à base de sable de granite sont plus élevées que celles obtenues par les bétons contenant le sable de clinker

recyclé. Ceci est dû au fait que les fines particules du sable de clinker recyclé sont relativement réactives ce qui engendre un effet pouzzolanique faible et les hydrates ainsi formés ont rempli quelques interstices capillaires entre les grains (Aarthi, 2018). L'état des éprouvettes après immersion est donné par la figure V-15.



Figure V-15: Éprouvettes traitées par l'acide HCl

V.7.1.3. Pertes en masse pour une solution de 4% de l'acide sulfurique H_2SO_4

Dans la figure V-16, on constate que le béton témoin accuse des gains en poids continues et quasi constantes durant les premiers 28 jours d'immersion. Ensuite, cette tendance change et le béton illustre des pertes en masse valant de 3.83%, 7.04% et 10.23% aux échéances de 56, 90 et 120 jours respectivement.

Les bétons contenant les sables de déchet de granite et de clinker recyclé excepté le béton BSC40, affichent des gains de poids variables durant les premiers 21 jours d'immersion, le gain de masse par rapport au béton témoin est de (-1.99%, 0.33% et -0.78%) pour les bétons BSG20, BSG40 et BSC20 respectivement. Ces constatations sont dues au fait que la mobilisation des ions sulfates dans l'échantillon forme une ettringite différée qui est susceptible de générer des gonflements dans le béton (Rashwan et al., 2020). A partir de 28 jours, les bétons accusent des pertes en poids, généralement supérieures à celles du témoin, les deux bétons BSG20 et BSG40 montrent des pertes en masses comparables et qui se divergent de 1.59% et 1.49% de celles du témoin à 120 jours. Par ailleurs, les bétons BSC20 et BSC40 illustrent les pertes en masses les plus élevées, elles atteignent 39.82% et 35.25% à la fin de la période d'immersion.

L'utilisation de sable de granite n'a pas induit une réaction pouzzolanique fixant la chaux, ce qui n'a pas permis de réduire les pores capillaires, bloquant ainsi l'absorption de la solution acide (Sellaf, 2020), d'où une augmentation de la perte en masse pour les deux bétons BSG20, BSG40 par rapport au béton de référence. En revanche, la perte en masse observée pour les bétons contenant le sable de clinker recyclé est dû à la présence d'une quantité élevée de chaux libre dans le clinker, ce qui engendre la formation d'une quantité élevée de gypse précipitée est facilement lixiviée dont le résultat est une perte en masse considérable.

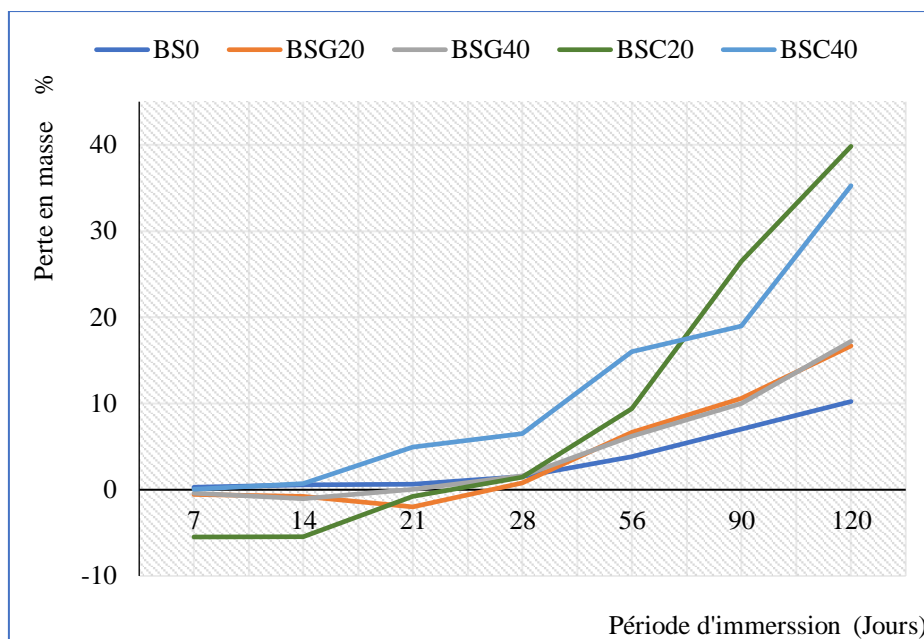


Figure V-16: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% H₂SO₄

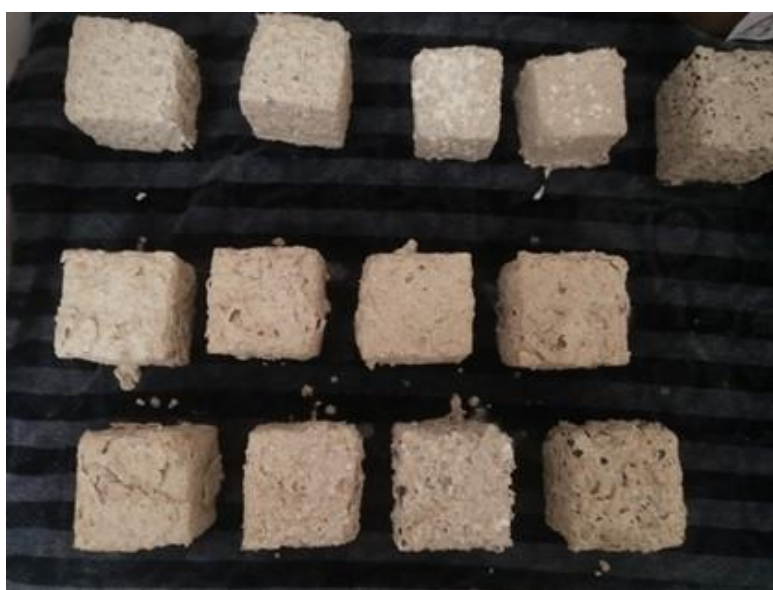


Figure V-17: Echantillons traités par l'acide H₂SO₄

V.7.1.4. Pertes en masse pour une solution de 4% de L'hydroxyde de sodium NaOH

L'évolution de la perte de masse des échantillons des bétons immergés dans 4% de NaOH pendant 120 jours est illustré sur la figure V-18.

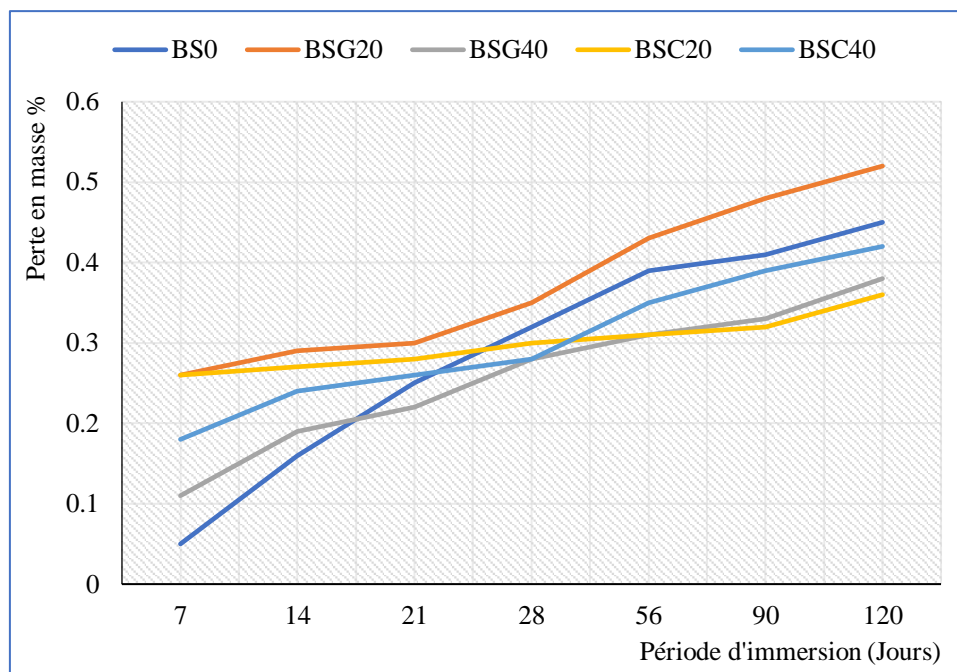


Figure V-18: Perte des masses des bétons en fonction de la période d'immersion dans 4% NaOH

Après une immersion de 120 jours des échantillons des bétons dans la solution basique, on a constaté que le béton témoin a développé des gains de masse croissantes (figure V-18). Le gonflement obtenu à l'âge de 14 jours est le plus faible par rapport à ceux manifestés par les bétons à base de sable de déchets. Au-delà, la tendance change et ils dévient à partir du 28^{ème} jours le plus élevé comparativement à ceux illustrés par BSC20, BSC40 et BSG40.

Le béton à base de 20% de SG subit dès le 7^{ème} jour les gains de masses les plus élevés, et qui augmentent progressivement en fonction de l'âge.

En effet, Les grains et les particules des sables de déchets dans les bétons BSC20, BSC40 et BSG40 ont contribué à freiner la pénétration des ions Na^{++} qui augmentent le pH ce qui contribue à augmenter le risque de solubilisation de certains constituants à base d'alumine, et qui réagissent avec le sulfate de calcium pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) (Benalia & Zeghichi, 2021), d'où la production des éléments expansifs plus importantes que ceux développés dans la matrice du béton témoin.

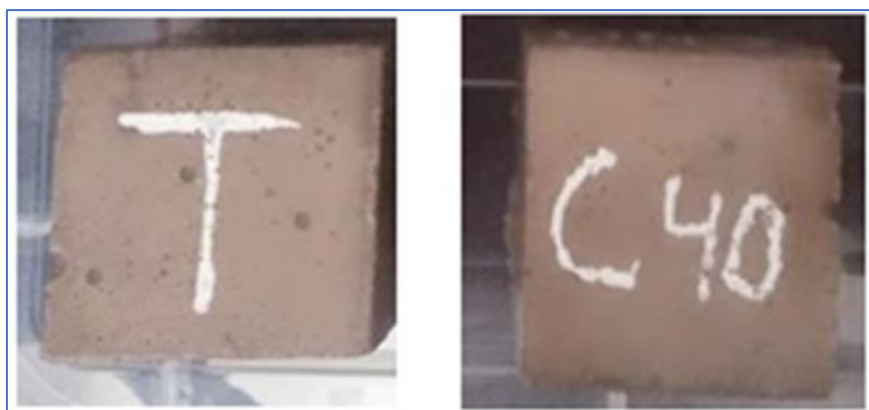


Figure V-19: Epreuves traitées par l'acide NaOH

V.7.2. Pertes des résistances dans les milieux agressifs

V.7.2.1 Perte de résistance en compression pour une solution de 4% CH₃COOH

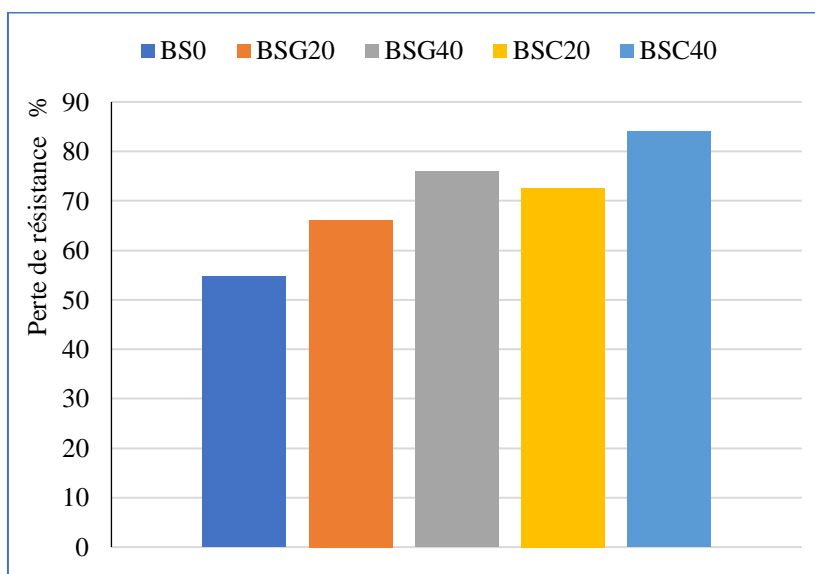


Figure V-20: Perte de résistance en compression dans CH₃COOH

Selon la figure V-20, le béton témoin BS0 montre une perte de résistance modérée (54.66%) comparée aux autres mélanges, le béton ordinaire subit une dégradation significative lorsqu'il est exposé à l'acide acétique. Cela peut être attribué à la dissolution des composants cimentaires et à la lixiviation du calcium.

Le BSG20 et BSG40 ont une perte de résistance de (66.18% et 75.82%) respectivement. Bien que l'ajout de déchets de granite augmente initialement la résistance à la compression, il semble que le granite ne protège pas efficacement le béton contre l'attaque acide. Cela peut être dû à la faible réactivité chimique du granite, qui ne contribue pas à neutraliser l'acide. A des taux de substitution plus élevés (40%), la perte de résistance est encore plus marquée, ce qui pourrait indiquer une moindre intégrité de la matrice cimentaire en présence de quantités importantes de granite.

Le BSC20 présente une perte de résistance de 72.58%, tandis que le BSC40 montre la perte la plus élevée de 83.95% par rapport aux d'autres bétons. Bien que le clinker recyclé améliore significativement la résistance initiale à la compression, il semble être très vulnérable à l'attaque acide. La réactivité chimique élevée du clinker recyclé, qui est bénéfique pour les propriétés mécaniques initiales, pourrait aussi le rendre plus susceptible à la dissolution en milieu acide, entraînant une perte de résistance plus importante.

V.7.2.2. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% HCl

La figure VI-21 présente la perte de résistance en compression de différents types de bétons après une exposition à l'acide chlorhydrique (HCl). Selon la figure, le BS0 présente une perte de résistance de 40.36%, indiquant que ce béton est assez vulnérable à l'attaque par HCl. L'acide chlorhydrique attaque les composés de calcium dans le ciment, entraînant une dégradation importante de la structure.

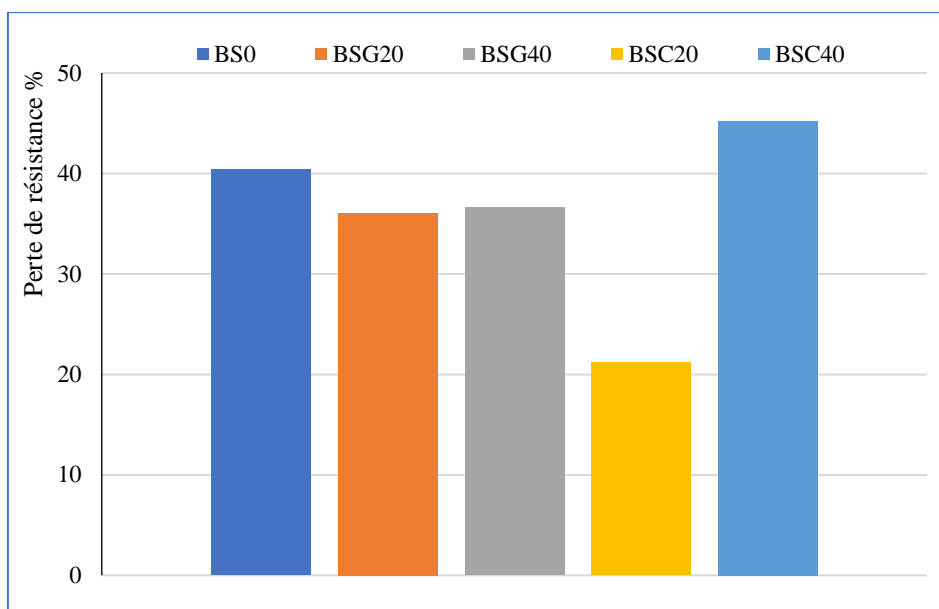


Figure V-21: Perte de résistance en compression dans HCl

Les bétons BSG20 et BSG40 présentent une perte de résistance de 36.06% et 36.60% respectivement, ce qui indique que l'ajout de déchets de granite réduit légèrement la vulnérabilité à HCl par rapport au BS0. Le granite, étant inerte, n'interagit pas avec l'acide

mais ne contribue pas non plus à la résistance chimique (Zafar et al., 2020)

Une perte de résistance de 21.16% pour le BSC20 montre que le clinker recyclé à 20% améliore considérablement la résistance du béton à HCl. Cela pourrait être dû à une meilleure résistance chimique du clinker recyclé dans cet environnement acide. En revanche, le BSC40 présente une perte de résistance de 45.24%, la plus élevée parmi tous les mélanges testés, ce qui suggère qu'à cette concentration, le clinker recyclé rend le béton plus vulnérable à l'attaque acide. Cela peut être dû à une surcharge de clinker qui entraîne une réactivité excessive avec l'acide.

V.7.2.3. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% H₂SO₄

La figure V-22, montre la perte de résistance à la compression de tous les mélanges de béton observée après 120 jours d'exposition à la solution de H₂SO₄.

Les pertes de résistance des bétons à base des déchets recyclés sont supérieures à celle de béton témoin, une perte de résistance de 60.36% montre que le béton de sable BS0 est vulnérable à l'attaque acide. L'acide sulfurique réagit avec les composés de calcium dans le ciment, provoquant une lixiviation et une perte de masse (Rashwan et al., 2020).

Les bétons BSG40 ont montré une faible résistance par rapport au BSG20 après exposition à la solution H₂SO₄. Cela peut être attribué et à la capacité de liaison améliorée des particules de granite très fines qui ont entraîné l'amélioration de la microstructure de la matrice de béton (Jain et al., 2020). La teneur excessive en granite en remplacement du sable diminue la résistance à la compression (Aarthi et Arunachalam 2018) Cela peut également être attribué à la microstructure plus pauvre du béton avec des remplacements de granite plus élevés (Singh et al., 2016).

Une perte de résistance de 75.38% montre que la substitution de clinker recyclé à 20% augmente la vulnérabilité à l'acide sulfurique, bien que cette perte soit légèrement moindre que celle observée avec BSG20. Avec 40% de substitution de clinker recyclé, la perte de résistance atteint 85.56%, la plus élevée parmi tous les mélanges. Le clinker, étant très réactif, réagit fortement avec l'acide sulfurique, provoquant une dégradation chimique rapide.

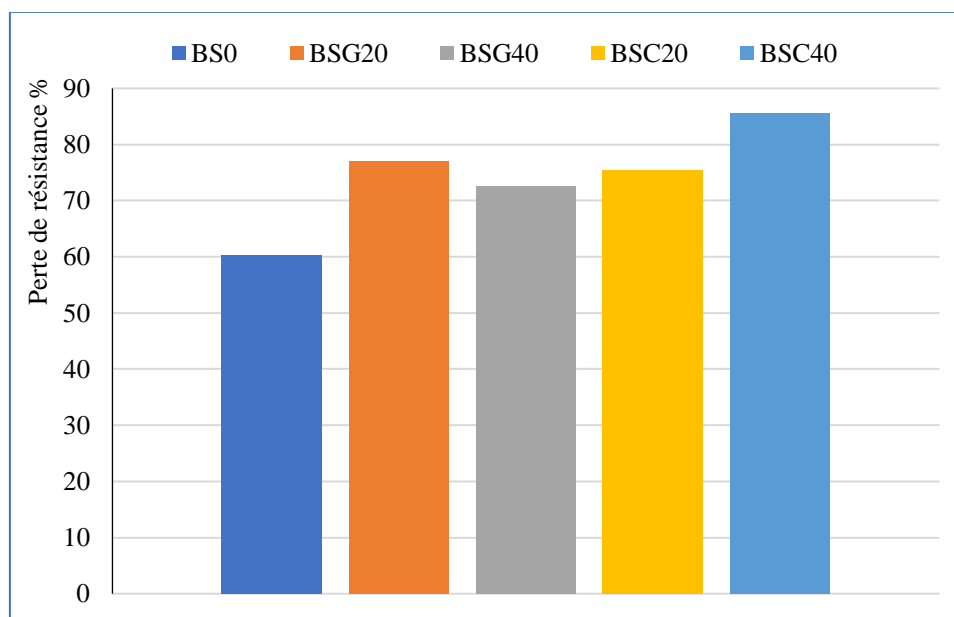


Figure V-22: Perte de résistance en compression dans H₂SO₄

V.7.2.4. Perte de résistance en compression pour une solution de 4% NaOH

La figure V-23 présente la perte de résistance en compression de différents types de bétons après une exposition à l'hydroxyde de sodium (NaOH).

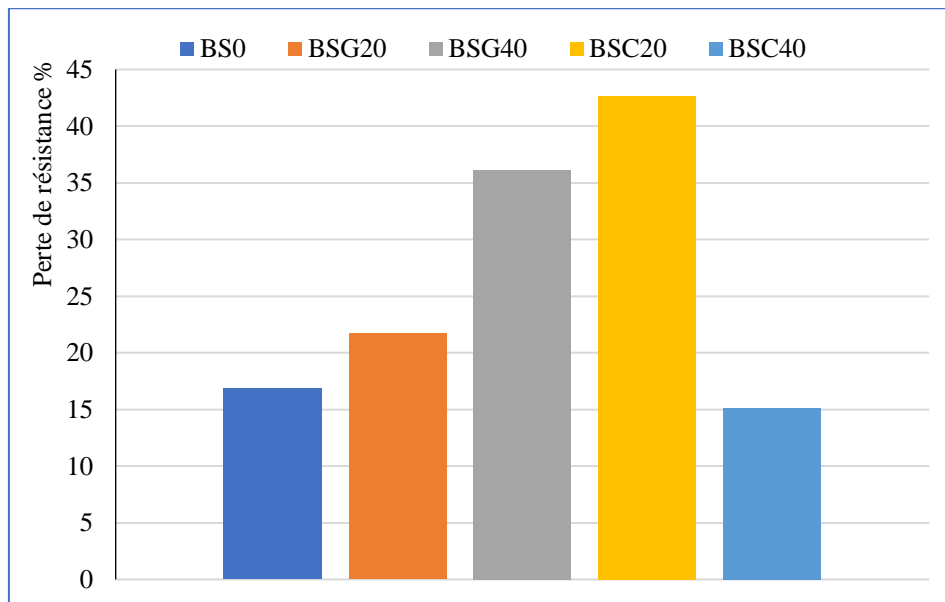


Figure V-23: Perte de résistance en compression dans NaOH

Selon la figure, le BS0 présente une perte de résistance relativement faible (16.84%), indiquant une bonne performance contre NaOH.

Le BSG20 présente une perte de résistance de 21.72%, ce qui indique que l'ajout de 20% de déchets de granite augmente légèrement la vulnérabilité à NaOH par rapport au BS0, mais reste dans une fourchette modérée. Le granite, étant inerte, n'apporte pas de protection supplémentaire. Le BSG40 présente une perte de résistance plus élevée par rapport au BSG20 (36.13%). Une plus grande proportion de granite pourrait entraîner une réduction de l'intégrité globale du béton sous attaque alcaline (**Venyite et al., 2022**).

Le BSC20 présente la perte de résistance la plus élevée par rapport aux mélanges (42.64%), ce qui montre que le clinker recyclé à 20% rend le béton plus vulnérable à NaOH. Le clinker réagit fortement avec NaOH, provoquant une dégradation accrue. Le BSC40 présente une perte de résistance de 15.12%, la plus faible parmi tous les mélanges testés, ce qui suggère qu'à cette concentration, le clinker recyclé offre une certaine résistance à l'attaque alcaline. Cela pourrait être dû à une meilleure interaction entre le clinker et NaOH, créant une matrice plus stable.

V.8. Comportement des différents bétons exposé au cycle de gel/dégel

V.8.1. Variation dimensionnelle après gel/dégel

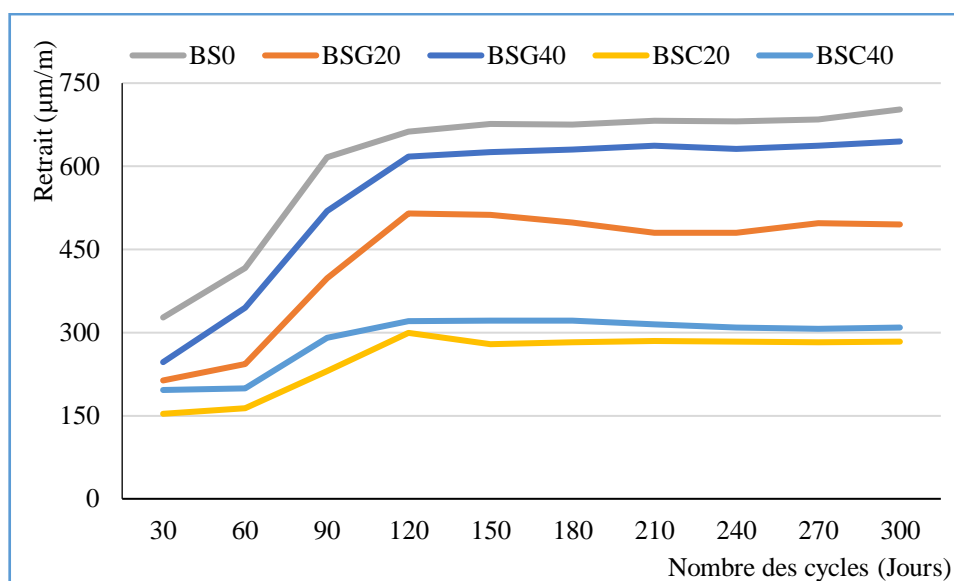


Figure V.24: Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycles de gel/dégel

Il est évident que le retrait des bétons de sable à base de sables recyclés est inférieur à celui du béton de référence (figure V-24), cela peut être attribué à la nature des fines présentes dans les sables recyclés, qui comblent les interstices et réduisent la porosité globale du mélange. Tous les mélanges ont subi un raccourcissement au cours des cycles initiaux, mais après avoir atteint 120 cycles, il n'y a plus eu de changement de longueur ce qui suggère que les bétons atteignent un état d'équilibre où ils deviennent résistants aux changements de longueur supplémentaires.

La norme ASTM C 666 est un indicateur important de la qualité du béton en termes de résistance au gel/dégel. Une variation dimensionnelle inférieure à $500\mu\text{m/m}$ signifie que les bétons BSG20, BSC20 et BSC40 possèdent une excellente résistance à ces cycles thermiques, ce qui est essentiel pour les applications dans les régions sujettes à de fortes variations de température. Les résultats obtenus sont en accord avec les travaux de **Zhang et al., (2020)**, qui ont également observé une amélioration de la résistance au gel/dégel grâce à l'utilisation de matériaux recyclés dans le béton. Cette concordance renforce la validité de nos observations et suggère que l'utilisation de sables recyclés pourrait devenir une pratique standard pour améliorer la durabilité du béton.

V.8.2. Variation pondérale après gel/dégel

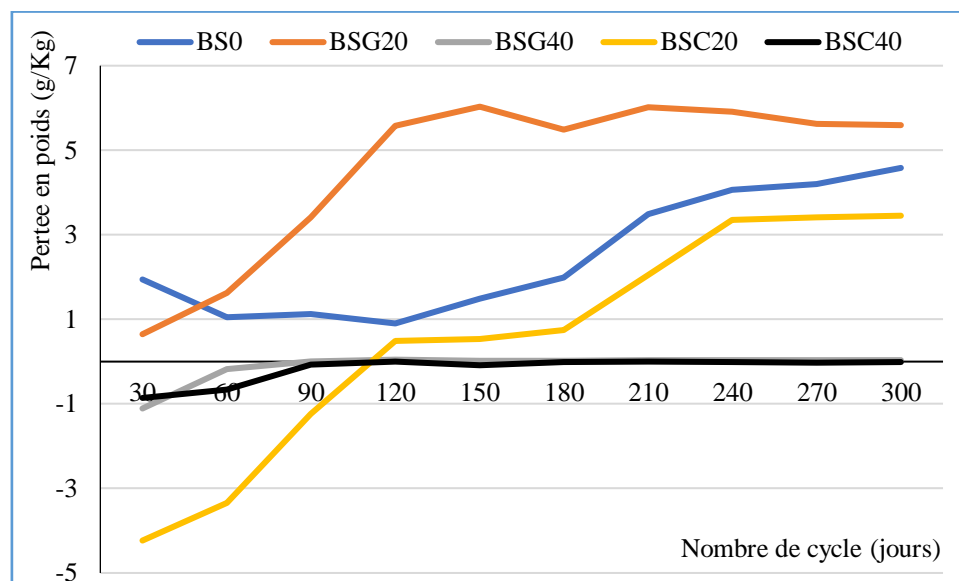


Figure V-25: Variation pondérale en fonction du nombre de cycles de gel/dégel

Sur la figure V-25, on donne la variation du poids des bétons testés après 300 cycles de gel/dégel. Il est important de noter que durant la période de 30 à 120 cycles, les bétons BSG40, ainsi que les bétons BSC20 et BSC40, ont présenté un gain en poids. En revanche, le béton BSG20 et l'échantillon témoin ont connu une perte de poids. Au-delà de 120 cycles, il n'y a pas eu de changement de masse pour les bétons BSG40 et BSC40. Tandis que le béton BSG20, BSC20 et l'échantillon témoin ont subi une perte de masse importante. La perte maximale est donnée par le béton à base de 40% de sable de déchets de granite.

V.8.3. Observation visuelle de la dégradation

Lorsque le béton subit au gel, le processus de transformation de l'eau interstitielle confinée en glace peut potentiellement créer une pression interstitielle importante. En conséquence, cela peut entraîner la fissuration, l'écaillage et la dégradation du béton. Un examen visuel a été réalisé afin d'évaluer tout signe visible de fissuration et l'effritement de la surface des échantillons suite aux cycles de gel/dégel.

D'après la figure V-26, les bétons BS0, BSG20 ont montré une bonne résistance aux cycles de gel/dégel, mais des dégradations plus au moins importantes se sont produites dans les bétons BSC20 et BSC40, tandis que le béton BSG40 présente une légère friabilité en surface. Ces dégradations sont dues à la mauvaise adhérence entre les sables de dunes et les sables recyclés (Abbaszadeh & Modarres, 2017)



Figure V-26: Observation visuelle des éprouvettes après les cycles gel/dégel

V.8.4. Vitesse ultrasonique

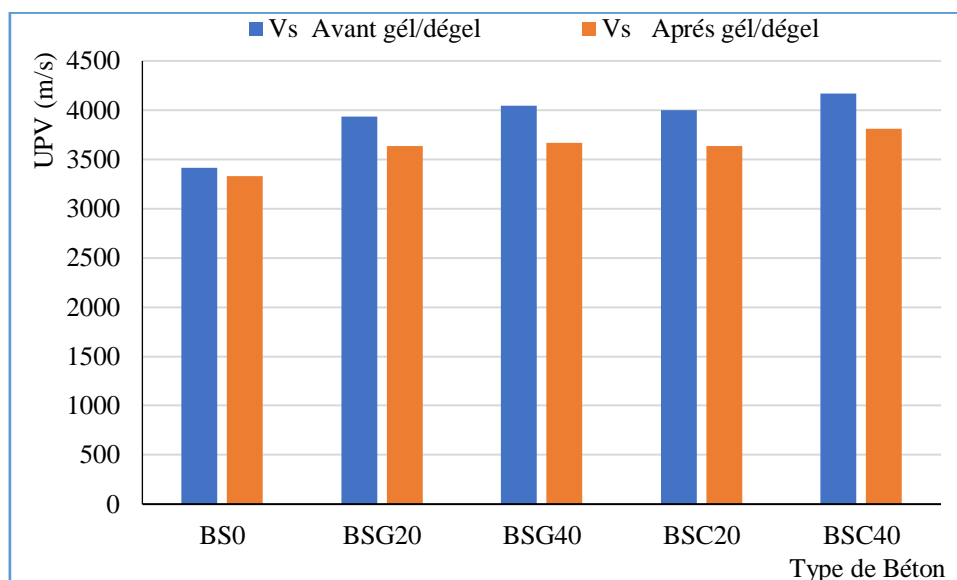


Figure V-27: UPV des bétons avant et après les cycles de gel/dégel

D'une manière générale, les vitesses ultrasoniques obtenues sur les bétons après exposition aux cycles de gel/dégel (figure V-27) sont inférieures et suivent la même allure que les vitesses ultrasoniques obtenues sur les bétons non soumis au gel/dégel. Cela signifie que, bien que les cycles de gel/dégel réduisent la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton, le comportement général reste similaire à celui des bétons non exposés.

Cette diminution des vitesses ultrasoniques après les cycles de gel/dégel peut être attribuée à la formation de microfissures et à la dégradation progressive de la matrice cimentaire due aux expansions et contractions répétées causées par les changements de température. Les microfissures augmentent la porosité et réduisent la densité du matériau, affectant ainsi la propagation des ondes ultrasoniques.

Les résultats des vitesses ultrasoniques sont des indicateurs précieux de l'intégrité structurelle et de la qualité du béton. En comparant les vitesses avant et après les cycles de gel/dégel, il est possible d'évaluer l'impact de ces cycles sur la durabilité du béton. Ces informations sont cruciales pour la conception et la maintenance des structures en béton soumises à des conditions climatiques rigoureuses.

En résumé, bien que les vitesses ultrasoniques diminuent après les cycles de gel/dégel, le profil global des vitesses reste similaire, indiquant une détérioration progressive mais systématique de la structure interne du béton. Cette observation souligne l'importance de considérer les effets des cycles de gel/dégel dans l'évaluation de la durabilité des bétons utilisés dans des environnements froids.

V.8.5. Module d'élasticité

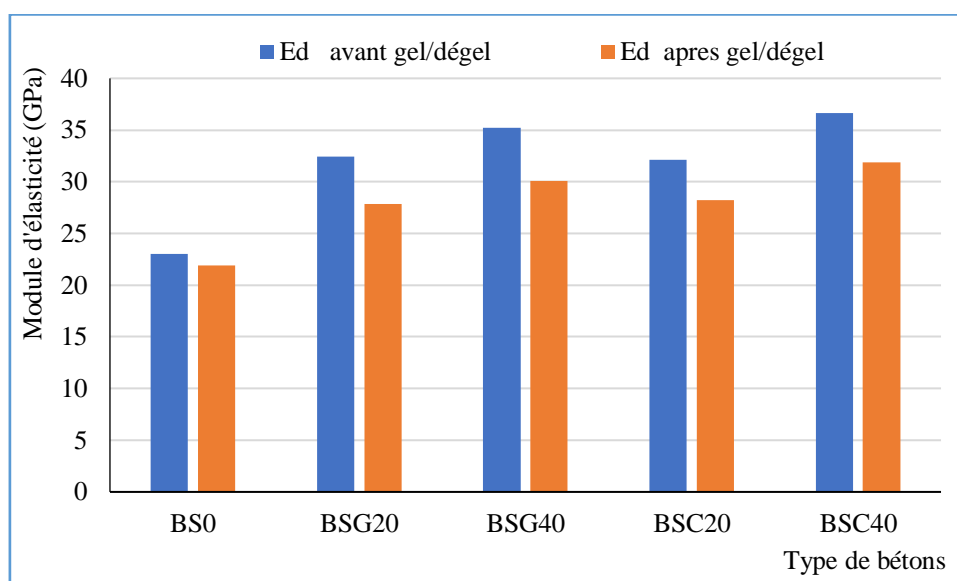


Figure V-28: Modules d'élasticités des bétons avant et après les cycles de gel/dégel

Les mélanges à base de sable recyclés avant exposition au cycle de gel/dégel ont des modules d'élasticités supérieures à celle du béton témoin (figure V-28). Le même comportement a été observé pour les bétons exposés à 300 cycles de gel/dégel.

Le module d'élasticité des BSG40 augmente avec l'augmentation du taux de SG pour atteindre une valeur de 35.236GPa, ces résultats sont cohérents avec les résultats d'une étude récente menée par **Amani et al., (2021)**. De plus, il est évident que les bétons à base de sable de clinker recyclé donnent les modules d'élasticités les plus élevés avant et après les cycles gel/dégel avec des valeurs maximales obtenues à un taux de 40% de SC.

V.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié divers paramètres de durabilité des bétons de sable. Nous avons examiné la variation pondérale et dimensionnelle (retrait et gonflement), qui renseigne sur la stabilité physique du béton au fil du temps. L'absorption d'eau, la capillarité, et la sorptivité ont été mesurées pour évaluer la résistance à l'infiltration d'eau, crucial pour prévenir les dommages dus au gel/dégel et aux substances chimiques. La pénétration des chlorures est cruciale dans les environnements marins ou industriels, susceptibles de provoquer la corrosion des armatures. La résistance aux milieux agressifs tels que l'acide

acétique, l'acide chlorhydrique, l'hydroxyde de sodium et l'acide sulfurique a également été évaluée, ainsi que la capacité du béton à résister au cycle gel/dégel, crucial pour prévenir les fissures et les dommages structurels.

Les principales conclusions tirées à partir de cette étude sont:

- Le retrait des bétons contenant les sables recyclés est plus important en comparaison avec le béton de référence, par contre les granulats recyclés affectent positivement le gonflement du béton de sable et les plus faibles valeurs sont données par le béton de 40% de sable recyclé de déchets de granite.
- Les bétons BSG et BSC montrent une perte de poids plus modérée et constante, résistant mieux à cette perte. Cependant, les bétons BSG et BSC présentent des gains en masse inférieurs aux bétons de référence. Tous les mélanges connaissent une augmentation rapide initiale, avec BSC40 présentant le gain en masse le plus élevé.
- L'absorption d'eau par immersion diminue avec l'augmentation du taux de remplacement et les bétons contenant le sable de clinker recyclé donne les plus faibles valeurs.
- Le remplacement du sable ordinaire par un taux de 40% des sables recyclés de déchets de granite et clinker recyclé diminue la porosité accessible à l'eau et rend la matrice plus compacte.
- La meilleure absorption capillaire et sportivité sont enregistrées dans le béton à base de 20% de sable de clinker recyclé.
- Les bétons contenant les sables recyclés donnent les meilleures résistances aux attaques de chlorures par rapport au béton de référence et les bétons à base de sable de clinker recyclé sont plus résistants par rapport au béton à base de sable de déchet de granite.
- La conservation des éprouvettes de béton dans une solution de 4% de CH_3COOH entraîne des pertes en masse variées. Les bétons avec du sable de clinker recyclé montrent de meilleures performances que ceux avec du sable de granite, grâce à une microstructure améliorée. Le béton BSC40 a la plus faible perte en masse à long terme, avec 4.37%.
- Le béton de référence est le plus résistant dans le milieu d'acide chlorhydrique par rapport aux bétons à base des sables recyclés. Les bétons SCC40 et SCG40 sont les plus résistants en comparaison avec les bétons SCC20 et SCG20 respectivement.
- Le béton de référence est le plus résistant dans le milieu d'acide sulfurique par rapport aux bétons à base des sables recyclés. Le sable de granite n'a pas réduit les pores capillaires, tandis que le sable de clinker recyclé a causé une perte de masse maximale due à la lixiviation du gypse formé, atteignant jusqu'à 39.82% pour BSC20.
- Après 120 jours d'immersion dans une solution basique, le béton témoin a montré des gains de masse croissants. Le béton à 20% de SG a les gains de masse les plus élevés. Les bétons de sables BSC20, BSC40 et BSG40 freinent la pénétration des ions Na^{++} , augmentant ainsi la formation d'ettringite et les gonflements comparativement au béton témoin.

- Le béton témoin BS0 subit une perte de résistance modérée de 54.66% en raison de la dissolution des composants cimentaires par l'acide acétique. Les bétons BSG20 et BSG40 montrent des pertes plus importantes (66.18% et 75.82%) à cause de la faible réactivité du granite, tandis que BSC20 et BSC40 subissent les plus fortes pertes de résistance (72.58% et 83.95%) en raison de la vulnérabilité du clinker recyclé à l'acide.

- Le béton témoin BS0 a une perte de résistance de 40.36% après exposition à l'HCl, indiquant une vulnérabilité importante à l'acide. Les bétons BSG20 et BSG40 présentent des pertes de résistance légèrement inférieures (36.06% et 36.60%) grâce à l'inertie du granite. Le BSC20 a une perte de 21.16% indiquant une meilleure résistance au HCl grâce au clinker recyclé, tandis que le BSC40, avec une perte de 45.24%, est le plus vulnérable en raison d'une surabondance de clinker.

- Tous les bétons recyclés ont une perte de résistance plus élevée que le béton témoin après 120 jours dans H_2SO_4 , avec une perte de 60.36% pour BS0. BSG40, avec une perte de résistance moindre que BSG20, montre que trop de granite diminue la résistance, tandis que BSC20 et BSC40 montrent des pertes de 75.38% et 85.56% respectivement, BSC40 étant le plus vulnérable en raison de la forte réactivité du clinker recyclé.

- Le béton témoin BS0 a une perte de résistance relativement faible de 16.84% contre NaOH. Le BSG20 et le BSG40 montrent des pertes plus importantes, respectivement 21.72% et 36,13%, en raison de l'inertie du granite et de l'augmentation de la proportion de granite. Le BSC20, avec une perte de 42.64%, est plus vulnérable à NaOH, tandis que le BSC40, avec une perte de 15.12%, montre une meilleure résistance à l'attaque alcaline grâce à une interaction favorable du clinker avec NaOH.

- Le comportement des bétons après cyclé de gel/dégel, ont montré l'effet bénéfique sur le retrait et la perte en poids. Une légère diminution de la vitesse ultrasonique et le module d'élasticité en comparaison avec les résultats obtenus sur bétons non soumis au gel/dégel et les meilleures valeurs sont données par le béton à base de 40% de sable de clinker recyclé.

De cette étude, on peut conclure que le remplacement partiel du sable ordinaire par des sables recyclés issus de déchets de granite et de clinker recyclé est à la fois bénéfique, acceptable et réalisable. Ce remplacement permet non seulement d'améliorer les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton, mais il offre également des avantages environnementaux en favorisant le recyclage des déchets industriels. L'intégration de ces matériaux alternatifs dans la formulation du béton s'avère une solution viable pour optimiser les performances des structures tout en contribuant à une approche plus durable dans le secteur de la construction.

Conclusions générales

Conclusion générale

L'étude présente une approche expérimentale mise en œuvre lors de la substitution du sable ordinaire par des sables issus de déchets de granite et de clinker recyclé à des taux de 20% et 40%, dans le but de produire un éco-matériau. Le granite et le clinker sont des matériaux qui peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement. Compte tenu des importantes ressources en déchets de granite et de clinker recyclé, il semble à la fois économiquement et écologiquement avantageux d'intégrer ces matériaux dans la production de béton.

L'objectif principal de cette démarche est d'évaluer les performances mécaniques et la durabilité de chaque formulation afin de mieux comprendre le comportement des matériaux ainsi créés. Les essais réalisés permettent non seulement de vérifier la viabilité structurelle des éco-matériaux, mais aussi d'examiner leur résistance aux environnements agressifs, tels que l'exposition aux sels, les cycles de gel-dégel et les agents chimiques corrosifs.

L'étude de faisabilité de cette utilisation se décompose en plusieurs étapes clés:

Premièrement, l'étude traite la caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication du béton de sable à base des déchets. Il décrit les différents constituants tels que le ciment, les sables (dune, déchets de granite et clinker recyclé), les fines calcaires, l'adjuvant superplastifiant, et l'eau de gâchage. Les essais physico-chimiques et mécaniques menés montrent que les sables recyclés et les fines calcaires améliorent les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Le sable de déchet de granite, riche en silice et alumine, et le clinker recyclé, riche en CaO, sont particulièrement efficaces pour renforcer la cohésion, réduire la porosité, et augmenter la longévité du béton.

Ensuite, on a décrit un programme expérimental approfondi visant à étudier l'impact de l'incorporation de sables recyclés (déchets de granite et clinker) dans le béton de sable. Deux formulations principales ont été testées; l'une avec du sable de déchets de granite (BSG) et l'autre avec du sable de clinker recyclé (BSC), chacune avec des taux de substitution de 20% et 40%. Les essais ont été réalisés pour évaluer les propriétés du béton à l'état frais, telles que la densité, l'air occlus et l'ouvrabilité, ainsi qu'à l'état durci, comme la résistance à la compression, la traction par flexion, et la dureté de surface. De plus, des tests de durabilité ont été menés, notamment sur la résistance aux cycles de gel/dégel, l'absorption d'eau par immersion et capillarité, la pénétration des chlorures, et la résistance aux attaques chimiques (acides et bases). La méthode SABLOCRETE a servi de base pour la formulation des mélanges, permettant une optimisation des dosages en ciment, eau, et fines calcaires. Les résultats obtenus de ces tests visent à identifier les formulations les plus performantes pour une utilisation durable du béton de sable dans des environnements agressifs, tout en favorisant l'usage de matériaux recyclés pour une construction plus écologique.

Les effets des sables de déchets de granite et clinker recyclé sur les propriétés mécaniques, de durabilité et microstructure du béton ont été examinés. Les principales conclusions tirées à partir de cette étude sont:

- L'ajout de sables recyclés améliore la densité et l'ouvrabilité du béton. Le béton contenant 40 % de sable de granite (BSG40) présente les meilleures performances en termes de densité et d'ouvrabilité. En revanche, la teneur en air occlus est plus élevée dans les mélanges contenant du sable de clinker."

- La densité du béton durci augmente avec les taux de substitution, avec des performances maximales pour BSG40. La résistance en compression et en traction par flexion s'améliore également, surtout avec 40% de clinker recyclé, qui montre des gains significatifs par rapport au béton de référence.
- L'introduction de sables recyclés améliore la dureté de surface et la résistance en compression, particulièrement avec le clinker recyclé à 40%, grâce à sa composition chimique proche du ciment. Le granite offre également une bonne performance en raison de sa teneur en silice.
- Les vitesses ultrasoniques augmentent avec l'ajout de sables recyclés, indiquant une structure plus dense. Les résistances mesurées par méthode combinée (ultrasons et scléromètre) confirment ces résultats, les mélanges à base de clinker recyclé se montrant les plus performants.
- L'analyse DRX révèle la présence de quartz, calcite, portlandite et silicate de calcium, qui contribuent à la densification de la matrice du béton et à l'amélioration de ses propriétés mécaniques. Les résultats montrent une meilleure performance pour les mélanges avec 40% de clinker recyclé.

L'étude des paramètres de durabilité du béton de sable avec des sables recyclés montre que:

- L'incorporation de sable recyclé augmente le retrait du béton par rapport au témoin. Le béton BSC40 présente le retrait le plus élevé. En revanche, le granite réduit la perte de masse au fil du temps, grâce à sa densité et à sa porosité réduite. Les bétons avec 40% de clinker recyclé (BSC40) montrent une meilleure résistance à la perte de poids en raison de leur composition chimique, favorisant une meilleure rétention de masse.
- Les bétons à base de sable recyclé absorbent généralement moins d'eau que le béton de référence. Le béton BSC40 montre la plus faible absorption d'eau, grâce à la formation de produits hydratés qui remplissent les vides capillaires. Cette faible absorption améliore la durabilité, notamment en milieu agressif, en empêchant les infiltrations d'eau.
- L'ajout de sable de déchets de granite dans le béton de sable augmente la porosité accessible à l'eau de 5%, tandis que le clinker recyclé la réduit de 8.5%. Les fines réactives présentes dans le clinker densifient la matrice, réduisant ainsi la porosité. À l'inverse, le granite, bien que bénéfique pour certaines propriétés, crée une plus grande porosité dans la zone de transition interfaciale, augmentant la perméabilité du béton.
- Le béton contenant 20% et 40% de sable de déchets de granite présente une absorption capillaire plus élevée, tandis que le BSC20 montre les meilleures performances en termes de réduction de la capillarité. Cela s'explique par la plus grande interconnexion des pores dans le béton à base de granite. En revanche, le BSC20 présente également la meilleure sorptivité, ce qui réduit la capacité d'absorption d'eau par capillarité dans le béton.
- L'ajout de sable recyclé réduit la pénétration des ions chlorures par rapport au béton de référence, avec une réduction accrue à mesure que le taux de substitution augmente. Les particules angulaires du granite entravent la pénétration des chlorures, tandis que le clinker améliore la densité du béton, le rendant moins perméable. Le béton à base de clinker recyclé

(BSC) montre une meilleure résistance à la pénétration des ions chlorures, ce qui est crucial dans les environnements marins ou industriels.

- Le béton contenant du sable de clinker recyclé offre une meilleure résistance aux attaques acides, notamment à l'acide acétique, où le BSC40 affiche la plus faible perte de masse (4.37%). Cependant, le béton de référence est plus performant face à l'acide chlorhydrique, surpassant les mélanges à base de sables recyclés. Face à l'acide sulfurique, les bétons recyclés montrent une perte de résistance plus élevée, particulièrement le BSC40, en raison de la forte réactivité chimique du clinker.
- Les bétons contenant des sables recyclés présentent une meilleure résistance aux cycles gel/dégel que le béton de référence. Les mélanges BSG40 et BSC40 subissent moins de rétrécissement et de perte de poids après plusieurs cycles. Le sable recyclé réduit la porosité et augmente la densité, améliorant ainsi les performances thermiques. Bien que la vitesse ultrasonique et le module d'élasticité diminuent légèrement après ces cycles, les bétons recyclés restent plus performants que ceux de référence.

La valorisation des déchets de granite et de clinker recyclé, qui autrement auraient été mis en décharge, permet de réduire l'extraction des matières premières et de limiter l'épuisement des ressources naturelles. Il est également envisagé d'étudier l'influence de différents pourcentages de substitution pour identifier la formulation optimale, à la fois en termes de performances mécaniques et de durabilité, mais aussi du point de vue économique et écologique. Cette démarche expérimentale vise ainsi à encourager l'utilisation des matériaux recyclés dans l'industrie de la construction, tout en contribuant à une économie circulaire plus durable.

Comme perspectives, on peut citer:

- Poursuivre les études sur l'effet de la substitution des sables par des déchets de granite et de clinker recyclé sur d'autres propriétés thermiques, comme la diffusivité thermique, ainsi que sur la résistance au feu du béton.
- Continuer à étudier la durabilité du béton dans d'autres milieux agressifs et dans des environnements marins.
- En plus du MEB (Microscopie Électronique à Balayage) et du FTIR (Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier), on pourrait aussi envisager l'utilisation de la thermogravimétrie (TGA) pour analyser la décomposition thermique des composants et mieux comprendre la réactivité des déchets valorisés dans la matrice cimentaire.
- Examiner l'impact environnemental des bétons valorisés en termes de réduction de l'empreinte carbone, ainsi que leur potentiel à capter du CO₂ au fil du temps (carbonatation).
- Étendre les études sur l'effet de la substitution des sables par le clinker recyclé dans d'autres types de béton tels que les bétons à haute performance (BHP) ou à ultra-hautes performances (BUHP)

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aarathi, K. (2018). Durability studies on fibre reinforced self-compacting concrete with sustainable wastes. *Journal of Cleaner Production*, 174, 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.270>
- Abbaszadeh, R., & Modarres, A. (2017). Freeze-thaw durability of non-air-entrained roller compacted concrete designed for pavement containing cement kiln dust. *Cold Regions Science and Technology*, 141, 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.007>
- Abukersh, S. A., & Fairfield, Cg. A. (2011). Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4088-4094. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.047>
- Ahmadi, S. F., Reisi, M., & Amiri, M. C. (2022). Reusing granite waste in eco-friendly foamed concrete as aggregate. *Journal of Building Engineering*, 46, 103566. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103566>
- Al-Kaseasbeh, Q., & Al-Qaralleh, M. (2023). Valorization of hydrophobic wood waste in concrete mixtures : Investigating the micro and macro relations. *Results in Engineering*, 17, 100877. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100877>
- Allam, M.E., Bakhoum, E.S., Garas, G.L. (2014). Re-use of granite sludge in producing green concrete, *ARPN: Journal of Engineering and Applied Sciences (JEAS)*. 9(12): 2731-2737. <https://www.researchgate.net/publication/287919960>
- Allariz, B. B., Levacher, D., & Müller, M. (2019). Étude du séchage naturel des sédiments du port de Dunkerque en vue de valorisations ultérieures. *Environnement Ingénierie & Développement*, N°80. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.4099>
- Alnahhal, W., Taha, R., Al-Nasseri, H., & Nishad, S. (2018). Effect of Using Cement Kiln Dust as a Nano-Material on the Strength of Cement Mortars. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1361-1368. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0010-6>
- Al-Swaidani, N. a. M., Baddoura, N. M. K., Aliyan, N. S. D., & Choeb, N. W. (2015). Acid resistance, water permeability and chloride penetrability of concrete containing crushed basalt as aggregates. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 5(8):293-312. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2015.7-8.005>
- Amadji, T. A., Jean, G., Codjo, A., Daniel, G., & Kouandété Valéry, D. (2021). Valorisation de déchets plastiques et d'industrie du bois en composite moule à froid: Effet des paramètres de fabrication sur les propriétés mécaniques. *Environnement, Ingénierie & Développement*, N° 84-EID, 7210. <https://doi.org/10.46298/eid.2021.7210>
- Amani, A., Babazadeh, A., Sabohanian, A., & Khalilianpoor, A. (2019). Mechanical properties of concrete pavements containing combinations of waste marble and granite powders. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(12), 1531–1540. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1702662>

Anastasiades, K., Goffin, J., Rinke, M., Buyle, M., Audenaert, A., & Blom, J. (2021). Standardisation: An essential enabler for the circular reuse of construction components? A trajectory for a cleaner European construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126864. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126864>

Aref M. al-Swaidani, Mohammad K. Baddoura, Samira D. Aliyan, & Walid Choeb. (2015). Acid Resistance, Water Permeability and Chloride Penetrability of Concrete Containing Crushed Basalt as Aggregates. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 5(8). <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2015.7-8.005>

Arumningsih, D., Joko Priyanto, K., & Nur Hidayah, F. (2023). Beton self-compacting concrete ramah lingkungan yang berkelanjutan dengan pemanfaatan limbah abu marmer, abu sekam padi dan abu batu: Self Compacting Concrete. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, 28(1), 36-44. <https://doi.org/10.36728/jtsa.v28i1.2195>

Balet, J.-M. (2023). Gestion des déchets: Les différents types de déchets, les modes de collecte et de gestion, les filières de traitement. Dunod, 4^{ème} édition, ISBN13:978-2100847839

Benalia, S., & Zeghichi, L. (2021). Contribution à l'étude de l'effet de l'activation sur le comportement mécanique des géopolymères. *Academic Journal of Civil Engineering*, 87-90 Pages. <https://doi.org/10.26168/AJCE.39.1.20>

Berdnyk, O., & Vyhovskyi, S. (2023). Use of waste glass in concrete: A review. *Transfer of innovative technologies*, 33-39. <https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0105>

Bondar, D., & Coakley, E. (2017). Effect of grinding on early age performance of high volume fly ash ternary blended pastes with CKD & OPC. *Construction and Building Materials*, 136, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.044>

Boughamsa, O., Abdelouahed, A., Hebhouh, H., Kherraf, L., & Boukhatem, G. (2023). Optimizing Sand Concrete Properties Through Partial Substitution of Natural Sand with Cement Kiln Dust. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 47(4), 259-264. <https://doi.org/10.18280/acsm.470408>

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*, 58, 1459-1463. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.518>

Chaib, A., Bounouala, M., Chettibi, M., Mekti, Z., Bouabdallah, S., Berdoudi, S. (2019) Etude et analyse de la qualité du ciment obtenu à partir d'un mélange de deux clinkers cuit et incuit- cimenterie de Hadjar Essoud, Algérie. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement (IJWSET)*, 4(2), 17-26. <http://jistee.org/wp-content/uploads/2020/01/Journal-ISTEE-VolumeIV-Num%C3%A9ro-2-decembre2019.pdf>

Cheah, C. B., Lim, J. S., & Ramli, M. B. (2019). The mechanical strength and durability properties of ternary blended cementitious composites containing granite quarry dust (GQD) as natural sand replacement. *Construction and Building Materials*, 197, 291-306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.194>

Chyliński, F., & Kuczyński, K. (2020). Ilmenite Mud Waste as an Additive for Frost Resistance in Sustainable Concrete. *Materials*, 13(13), 2904. <https://doi.org/10.3390/ma13132904>

Dadouch, M., Belal, T., & Ghembaza, M. S. (2024). Valorization of glass waste as partial substitution of sand in concrete – Investigation of the physical and mechanical properties for a sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 411, 134436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134436>

Danish, A., Mosaberpanah, M. A., Salim, M. U., Fediuk, R., Rashid, M. F., & Waqas, R. M. (2021). Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites : A review on sustainability benefits and critical challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102600>

Debouba, H., Laabidi, R., & Reyahi, R. (2019). Valorisation des déchets de construction dans la fabrication du ciment. SciSpace - Paper. December edition. Vol.5. No4. (2019), ISSN :2437-1114. <https://typeset.io/papers/valorisation-des-dechets-de-construction-dans-la-fabrication-12cmqo7i9x>

Dias, S., Almeida, J., Santos, B., Humbert, P., Tadeu, A., António, J., De Brito, J., & Pinhão, P. (2022). Lightweight cement composites containing end-of-life treated wood – Leaching, hydration and mechanical tests. *Construction and Building Materials*, 317, 125931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125931>

Dreux, G., Feasta, J. (1996). Nouveau Guide du Béton et de Ses Constituants, Édition Eyrolles, Paris, France, pp : 255-300, ISBN13 : 978-2-212-10231-4

Dupain, R., et Arroman, J.C.S. (2009). Granulats, sols, ciments et bétons : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Librairie Eyrolles. 4ème édition, ISBN13 : 978-2-7135-3033-3

Ede, A. N., Gideon, P. O., Akpabot, A. I., Oyebisi, S. O., Olofinnade, O. M., & Nduka, D. O. (2021). Review of the Properties of Lightweight Aggregate Concrete Produced from Recycled Plastic Waste and Periwinkle Shells. *Key Engineering Materials*, 876, 83-87. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.876.83>

El Maghri, S., Yousfi, S., Essallaki, H., & Bouamrani, M. L. (2022). Étude de l'effet de l'ajout des déchets de marbre sur les propriétés du béton à base de granulats de briques recyclés (GBR). *Matériaux & Techniques*, 110(5), 502. <https://doi.org/10.1051/mattech/2022032>

Gao, X. (2023). Review: Development Trends in the Reuse of Waste Materials in Concrete Production. *Academic Journal of Science and Technology*, 8(2), 26-30. <https://doi.org/10.54097/ajst.v8i2.14714>

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

- Gautam, L., Kalla, P., Jain, J. K., Choudhary, R., & Jain, A. (2022). Robustness of self-compacting concrete incorporating bone china ceramic waste powder along with granite cutting waste for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132969>
- Ghannam, S., Najm, H., & Vasconez, R. (2016). Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.001>
- Ghorbani, S., Taji, I., De Brito, J., Negahban, M., Ghorbani, S., Tavakkolizadeh, M., & Davoodi, A. (2019). Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. *Construction and Building Materials*, 194, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.023>
- Goyal, R. K., Agarwal, V., Gupta, R., Rathore, K., & Somani, P. (2021). Optimum utilization of ceramic tile waste for enhancing concrete properties. *Materials Today Proceedings*, 49, 1769–1775. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.011>
- Guettouche, A., Merdas, A., Berrabah, F., & Guechi, L. (2023). Valorization of Cement Kiln Dust (CKD) from the Ain-Al-Kebira Cement Plant (Algeria) in Building Materials. *Annales De Chimie Science Des Matériaux*, 47(2), 57–66. <https://doi.org/10.18280/acsm.470201>
- Gupta, L. K., & Vyas, A. K. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*, 191, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203>
- Hall, C., & Hoff, W. D. (2021). Water transport in brick, stone and concrete. CRC Press, 3rd Edition. ISBN: 9780429352744. <https://doi.org/10.1201/9780429352744>
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Hou, Y. (2021). Contribution au développement de la valorisation des déchets inertes du BTP: Étude de la carbonatation des granulats recyclés compactés. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle. <https://theses.hal.science/tel-03595042/file/2021HOU170367.pdf>
- Houcine, B., Mohamed, R., Samir, K., & Sarra, B. (2023). Valorization of plastic waste in concrete for sustainable development. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(5), 16009-01e. <https://doi.org/10.18540/jcecv19iss5pp16009-01e>
- Huang, J., Xu, G., Chen, S., Yu, D., Fu, T., Feng, C., & Wang, Y. (2024). Enhancing Mechanical Properties and Microstructures of Mass-Manufactured Sand Concrete by Incorporating Granite Powder. *Materials*, 17(10), 2234. <https://doi.org/10.3390/ma17102234>
- Jain, A., Chaudhary, S., & Gupta, R. (2022). Mechanical and microstructural characterization of fly ash blended self-compacting concrete containing granite waste. *Construction and Building Materials*, 314, 125480. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125480>

- Jain, A., Choudhary, S., Gupta, R., Chaudhary, S., & Gautam, L. (2022). Effect of granite industry waste addition on durability properties of fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 340, 127727. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127727>
- Jain, A., Choudhary, R., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2020). Abrasion resistance and sorptivity characteristics of SCC containing granite waste. *Materials Today: Proceedings*, 27, 524-528. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.318>
- Jain, K. L., Sancheti, G., & Gupta, L. K. (2020). Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119075>
- Kaplan, G., Öz, A., Bayrak, B., & Aydın, A. C. (2023). The effect of geopolymer slurries with clinker aggregates and marble waste powder on embodied energy and high-temperature resistance in prepacked concrete: ANFIS-based prediction model. *Journal of Building Engineering*, 67, 105987. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105987>
- Kherraf, L., Hebhoub, H., Belachia, M., Abdelouhed, A., Charime, R., & Bouhebila, O. (2019a). Influence of the incorporation of cement kiln dust on the properties of cement-performance and durability. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 10(3), 125. <https://doi.org/10.15866/irece.v10i3.16638>
- Kherraf, L., Kherraf, S., Hebhoub, H., & Belachia, M. (2023). Performance of Concrete Containing Partial Granite and Tiling Wastes as Fine Aggregate. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 33(2), 85-105. <https://doi.org/10.59440/ceer/172751>
- Kherraf, L., Younes, K., Abdelouahed, A., Belachia, M., & Hebhoub, H. (2022). Mechanical Properties of Self-compacting Concrete Containing Fine Aggregates from Cement Kiln Dust and Hardened Cement Waste. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 17(1), 1-15. <https://doi.org/10.2478/sspjce-2022-0012>
- Kim, J., Lee, D., Sičáková, A., & Kim, N. (2023). Utilization of Different Forms of Demolished Clay Brick and Granite Wastes for Better Performance in Cement Composites. *Buildings*, 13(1), 165. <https://doi.org/10.3390/buildings13010165>
- Lakhani, R., Kumar, R., & Tomar, P. (2014). Utilization of stone waste in the development of value-added products: A state of the art review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 7(3), 180-187. <https://doi.org/10.25103/jestr.073.29>
- Li, H., Huang, F., Cheng, G., Xie, Y., Tan, Y., Li, L., & Yi, Z. (2016). Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete. *Construction and Building Materials*, 109, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.034>
- Li, Z., Lao, J., Wang, L., Lim, N. S., Tan, K. H., & Qian, S. (2022). A review on substitution of natural sand with granite fines in sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 346, 128417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128417>

- Liu, Y., Yang, C., Wang, F., Hu, S., Zhu, M., Hu, C., Lu, L., & Liu, Z. (2021). Evaluation on recycled clinker production and properties from regeneration of completely recycle concrete. *Construction and Building Materials*, 301, 123882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123882>
- Malhotra, V., & Carino, N. J. (2003). Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. In *CRC Press eBooks*. 2nd Edition. ISBN: 9780429191213. <https://doi.org/10.1201/9781420040050>
- Mansour, M. A., Ismail, M. H. B., Imran Latif, Q. B. A., Alshalif, A. F., Milad, A., & Bargi, W. A. A. (2023). A Systematic Review of the Concrete Durability Incorporating Recycled Glass. *Sustainability*, 15(4), 3568. <https://doi.org/10.3390/su15043568>
- Mashaly, A. O., Shalaby, B. N., & Rashwan, M. A. (2018). Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 169, 800-818. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046>
- Maurya, N., Srivastav, Y., Rawat, S., Ranjan, Y., Srivastava, R., Shukla, B. K., & Varadharajan, S. (2023). Reinforcing civil infrastructure with waste glass-enhanced concrete : A comprehensive review of properties, performance and applications. *Materials Today: Proceedings*, 93, 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.177>
- Mebarkia, R., Bouzeroura, M., & Chelouah, N. (2022). Study of the effect of cement kiln dust on the mechanical, thermal and durability properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 349, 128707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128707>
- Meena, R. V., Jain, J. K., Chouhan, H. S., & Beniwal, A. S. (2022). Use of waste ceramics to produce sustainable concrete : A review. *Cleaner Materials*, 4, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100085>
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003). Concrete (2nd Edition). ISBN:0130646326, 9780130646323. Prentice Hall.
- Mong, G. R., Tan, H., Chin Vui Sheng, D. D., Kek, H. Y., Nyakuma, B. B., Woon, K. S., Othman, M. H. D., Kang, H. S., Goh, P. S., & Wong, K. Y. (2024). A review on plastic waste valorisation to advanced materials: Solutions and technologies to curb plastic waste pollution. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140180>
- Moustafa, A. (2021). Caractérisation chimique (minérale et organique) des lixiviats issus de la décharge des déchets à Tripoli-Liban. Thèse de doctorat. Université de Lille. <https://theses.hal.science/tel-03709597/document>
- Muñoz Pérez, S. P., & Atoche Zamora, J. J. (2023). Effects of incorporating granite powder in the mechanical properties of concrete. *Scientific Review Engineering and Environmental Studies (SREES)*, 32(1), 18-33. <https://doi.org/10.22630/srees.4479>

- Murali, G., Wong, L. S., Ramkumar, V. R., Abid, S. R., & Karthik, S. (2024). From waste to resource recycled lime sludge: Sustainable low clinker cementitious binder, a comprehensive study on hydration, strength of concrete. *Journal of Building Engineering*, 86, 108935. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108935>
- Musil, L., Chylik, R., & Vodicka, J. (2022). The effect of granite filler on the rheological properties of fresh mixture of cement composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2341(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2341/1/012014>
- Ñañez-Silva, M., Sánchez-Cárdenas, L., & Yactayo-Carrión, E. (2023). Valorization and reuse of construction and demolition waste for its transformation into ecological bricks. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*, 10(6), 150-157. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2023.06.018>
- Nayak, S. K., Satapathy, A., & Mantry, S. (2022). Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review. *Journal of Building Engineering*, 46, 103742. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103742>
- Neville AM. (2011). *Properties of concrete*, Fifth Edition, Pearson, Edinburgh, England: ISBN 13 9780273755807
- Ngayakamo, B., Komadja, G. C., Bello, A., & Onwualu, A. P. (2021). Valorization of granite micronized stones wastes for eco-friendly production of fired clay bricks. *SN Applied Sciences*, 3(11), 845. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04828-6>
- Ocampo, M. A. A., & González, A. F. R. (2023). Ceramic waste reuse and valorization alternatives: A review. *Revista EIA*, 20(40). <https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1680>
- Özkılıç, Y. O., Zeybek, Ö., Bahrami, A., Çelik, A. İ., Othuman Mydin, M. A., Karalar, M., Hakeem, I. Y., 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*, 25, 4799-4819. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.126>
- Pazzaglia, A., & Castellani, B. (2023). A Decision Tool for Wood Waste Valorization. *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 134. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2023.103>
- Pereira, M. M. L., Capuzzo, V. M. S., & Lameiras, R. D. M. (2022). Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 345, 128261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128261>
- Pérez, S. P. M., & Zamora, J. J. A. (2023). Effects of incorporating granite powder in the mechanical properties of concrete. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*, 32(1), 18–33. <https://doi.org/10.22630/srees.4479>
- Philip, J. R. (1957). *The theory of infiltration*. *Soil Science*, 84(3), 257–264. <https://doi.org/10.1097/00010694-195709000-00010>

- Prakash, B., Saravanan, T. J., Kabeer, K. I. S. A., & 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*, 401, 132887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132887>
- Prošek, Z., Trejbal, J., Nežerka, V., Goliáš, V., Faltus, M., & Tesárek, P. (2020). Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104640. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104640>
- Putrevu, M., Thiyagarajan, J. S., Pasla, D., Kabeer, K. I. S. A., & Bisht, K. (2021). Valorization of Red Mud Waste for Cleaner Production of Construction Materials. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 25(4), 03121002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000629](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000629)
- Rabehi, M., Mezghiche, B., & Guettala, S. (2013). Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. *Construction and Building Materials*, 45, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.074>
- Raju, S. L., Bhargav, B. S., Kumar, G. S., Reddy, M. G., Ramesh, P., Reddy, U. P., & Prasad, V. D. (2023). An Experimental Research on Partial Replacement of Fine Aggregate with Granite Powder. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(4), 1229-1232. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50332>
- Ramos, T., Matos, A. M., Schmidt, B., Rio, J., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001-1009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.098>
- Rashwan, M. A., Al - Basiony, T. M., Mashaly, A. O., & Khalil, M. M. (2020). Behaviour of fresh and hardened concrete incorporating marble and granite sludge as cement replacement. *Journal of Building Engineering*, 32, 101697. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101697>
- Rihia, C., Hebhouh, H., Kherraf, L., Djebien, R., & Abdelouahed, A. (2019). Valorization of Waste in Sand Concrete Based on Plant Fibres. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 29(4), 41-61. <https://doi.org/10.2478/ceer-2019-0043>
- Sablocrete (1994). Synthèse du Projet National de Recherche et Développement. Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation. Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées LCPC, Paris, 1994:92-199, ISBN13 978-2-85978-221-4
- Sadek, D. M., El-Attar, M. M., & Ali, H. A. (2016). Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>
- Safari, A., & Setiawan, A. A. (2023). Pemanfaatan Limbah Batu Marmer sebagai Substitusi Parsial Agregat Kasar pada Campuran Beton terhadap Kuat Tekan Beton. *Dinamika Rekayasa*, 19(2), 141. <https://doi.org/10.20884/1.dr.2023.19.2.1498>
- Saha, S., Sau, D., & Hazra, T. (2023). *Economic Viability Analysis of Recycling Waste Plastic as Aggregates in Green Sustainable Concrete*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4379755>

Sandanayake, M., Bouras, Y., Haigh, R., & Vrcelj, Z. (2020). Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete—A Decade Review. *Sustainability*, 12(22), 9622. <https://doi.org/10.3390/su12229622>

Sau, D., Shiuly, A., & Hazra, T. (2023). Study on green concrete replacing natural fine and coarse aggregate by plastic waste – An experimental and machine learning approach. *Materials Today: Proceedings*, S221478532302103X. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.207>

Sekkel, A., Mostefa Kara, E., Klouche, F., & Bireche, S. (2021). Valorization of concrete waste in swelling clay's treatment. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00373-0>

Sellaf, H., & Adda, H. M. (2020). Performance evaluation of concrete incorporating granite powder as partial substitution of cement in aggressive environments. *Revue des Matériaux et Energies Renouvelable Vol 4, N°1. ISSN : 507-554.* <https://www.researchgate.net/publication/347828282>

Shamsabadi, E. A., Ghalehnovi, M., De Brito, J., & Khodabakhshian, A. (2018). Performance of Concrete with Waste Granite Powder: The Effect of Superplasticizers. *Applied Sciences*, 8(10), 1808. <https://doi.org/10.3390/app8101808>

Shankar G. Chitalkar. (2024). Experimental Investigation of Sustainable Concrete Production using Blast Furnace as A Cement Substitute- A art of Review. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 195-209. <https://doi.org/10.48175/IJARST-17831>

Sharma, N. K., Kumar, P., Kumar, S., Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2017). Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 151, 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.081>

Sharma, S., Pandey, P., Gupta, P., Shende, A. M., & Bhandari, R. (2022). An Experimental Behavior on Green Concrete utilizing Granite Slurry Waste (GSW) as Partial Substitute of Cement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1084(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012022>

Shilar, F. A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Nisar, K. S., Abdel-Aty, A.-H., & Yahia, I. S. (2022). Evaluation of the Effect of Granite Waste Powder by Varying the Molarity of Activator on the Mechanical Properties of Ground Granulated Blast-Furnace Slag-Based Geopolymer Concrete. *Polymers*, 14(2), 306. <https://doi.org/10.3390/polym14020306>

Siddique, S., Shrivastava, S., Chaudhary, S., & Gupta, T. (2018). Strength and impact resistance properties of concrete containing fine bone china ceramic aggregate. *Construction and Building Materials*, 169, 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.213>

Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A., & Nagar, R. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*, 119, 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.008>

Singh, S., Nagar, R., & Agrawal, V. (2016). A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. *Journal of Cleaner Production*, 126, 74-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.114>

Singh, S., Nagar, R., & Agrawal, V. (2016). Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. *Journal of Cleaner Production*, 127, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.034>

Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V., Rana, A., & Tiwari, A. (2016). Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, 116, 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.110>

Singh, S., Nande, N., Bansal, P., & Nagar, R. (2017). Experimental Investigation of Sustainable Concrete Made with Granite Industry By-Product. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 04017017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001862](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001862)

Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O., & Rajesh Kumar, K. (2020). Green concrete : A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54-58. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.202>

Smarzewski, P., & Błaszczuk, K. (2024). Influence of Cement Kiln Dust on Long-Term Mechanical Behavior and Microstructure of High-Performance Concrete. *Materials*, 17(4), 833. <https://doi.org/10.3390/ma17040833>

Smir, R. (2016). Etude du comportement du clinker dans le béton, projet de fin d'étude, Licence Es-Sciences et Technique, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Morocco, 20-30. <https://memoirepfe.fst-usmba.ac.ma/download/3161/pdf/3161.pdf>

Suárez-Navarro, J. A., Alonso, M. D. M., Gascó, C., Pachón, A., Carmona-Quiroga, P. M., Argiz, C., Sanjuán, M. Á., & Puertas, F. (2022). Effect of particle size and composition of granitic sands on the radiological behaviour of mortars. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61(5), 561-573. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.05.001>

Tawfik M, Badawy A, Ali M, Amdar N & Elmahdi A (2020). Preparation of Low Energy Cement Clinker from Paper Industry Waste Materials. *Advancements in Civil Engineering & Technology*, 4(2). <https://doi.org/10.31031/ACET.2020.04.000583>

Venyite, P., Giogetti Deutou Nemaleu, J., Cyriaque Kaze, R., Bruno Tchamba, A., Kamseu, E., Chinje Melo, U., & Leonelli, C. (2022). Alkali-silica reactions in granite-based aggregates: The role of biotite and pyrite. *Construction and Building Materials*, 320, 126259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126259>

Vijayalakshmi, M., Sekar, A., & Prabhu, G. G. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, 46, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>

Zafar, M. S., Javed, U., Khushnood, R. A., Nawaz, A., & Zafar, T. (2020). Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 250, 118878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118878>

Zhang, K., Liu, F., Yue, Q., & Feng, J. (2020). Effect of granite powder on properties of concrete. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(S1), e2468. <https://doi.org/10.1002/apj.2468>