

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Génie civil et d'architecture

Département Génie civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Génie civil

Spécialité : Génie parasismique et Géo-environnement

Par

SAIAH Tahir

Thème :

Modifications des propriétés du béton apportées par la combinaison du sable de concassage et des granulats recyclés

Soutenue le 11/06/2025, devant le jury composé de :

Ghrici Mohamed	Professeur	UHB Chlef	Président
Boubekeur Toufik	Professeur	UAW Tissemsilt	Examinatur
Salhi Mohamed	MCA	UAZ Relizane	Examineur
Ezziane Karim	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
Ait Mohamed Amer Adem	MCA	UAZ Relizane	Co-Rapporteur

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement le professeur Ezziane Karim, mon directeur de thèse, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et sa persévérance à m'aider dans ce travail. Sa rigueur scientifique a été essentielle au bon déroulement de cette recherche. Sa gentillesse, sa disponibilité et son partage des connaissances m'ont permis de travailler dans des conditions optimales pour arriver à ce jour.

Mes remerciements s'adressent également au Docteur Ait Mohamed Amer Adem, mon co-directeur de thèse à l'Université de Relizane, ainsi qu'au Professeur Adjoudj Mhamed de l'Université de Chlef, pour avoir aménager leurs emplois du temps pour m'orienter et me faire avancer dans ce domaine de recherche.

Je tiens à remercier le Pr Ghrici Mohammed, directeur du Laboratoire de Géomatériaux de l'Université de Chlef (LaG), pour ses conseils durant ma formation. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance et d'avoir enrichi cette étape par son expertise. Mes remerciements vont également aux autres membres du jury, Messieurs Boubekour Toufik de l'Université de Tissemsilt et Salhi Mohamed de l'Université de Relizane, pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à cette étude en acceptant de faire partie du jury.

Je tiens à adresser mes remerciements aux responsables du laboratoire de génie civil et d'hydraulique, en particulier à Monsieur Saiah Aissa Abdelkader, pour leur assistance le long du déroulement de la campagne expérimentale de cette étude. Je remercie également tous les responsables de la faculté de génie civil et d'architecture, notamment Monsieur le Doyen, pour leur soutien et leur collaboration.

Je tiens également à remercier mes parents et mes sœurs qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours de recherche.

T. Saiah

ملخص

إن الهدف من هذه الدراسة هو التعرف على تأثير نوعية الرمل على بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة التي تحتوي على نسبة من الركام الخرساني المعاد تدويره (GBR). تم إنتاج مجموعتين من الخرسانة، إحداهما بالرمل الطبيعي SN والأخرى برمل المحجر SC. في كل مجموعة، يتم استبدال 20%، 40%، 60%، 80% و 100% من الركام العادي (GGO) بـ GBR مع استعمال ثلاث نسب ماء إلى الإسمنت 0.4، 0.5 و 0.6 لكل مجموعة. بعدها اجريت اختبارات لتقييم قابلية تشغيل الخرسانة وسلوكها الميكانيكي وفيما يتعلق بمتانتها. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الخرسانة المنتجة بالرمل SC أظهرت خواص جيدة في كل من الحالة الطازجة والصلبة. يؤدي الجمع بين رمل SC وركام GBR إلى تقليل التدهور الذي يتم تسجيله غالبًا ويسمح للخرسانة المعتمدة على SC بتحقيق نفس أداء الخرسانة مع SN. تم استنتاج علاقات للتعبير عن أداء الخرسانة ذات الأساس الرملي SC مع أداء الخرسانة ذات الأساس الرملي SN. وهذا يجعل استخدام هذه الرمال عمليًا للغاية ويمكن قياس تعديلاتها بسهولة.

الكلمات المفتاحية: إعادة التدوير، الخرسانة، الركام المعاد تدويره، الرمل المسحوق، الرمل الطبيعي، التعديل.

Résumé

Ce travail vise à étudier l'effet du sable issu de déchets de carrière (SC) sur certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton formulé avec des granulats de béton recyclés (GBR). Deux familles de bétons ont été réalisées, l'une avec du sable naturel SN et l'autre avec du sable SC. Sur chaque série, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% de granulats ordinaires (GGO) sont remplacés par des GBR en prenant trois rapports eau sur ciment 0.4, 0.5 et 0.6 pour chaque série. Des essais ont été réalisés pour évaluer l'ouvrabilité du béton, son comportement mécanique et vis-à-vis de la durabilité. Les résultats ont montré que les mélanges produits avec du sable SC présentaient bonne propriétés à l'état frais et durci. La combinaison du sable SC et les granulats GBR réduit la dégradation souvent enregistrée et permet au béton à base de SC d'acquérir les performances que le béton avec le SN. Des relations ont été déduites pour exprimer chaque performance du béton à base de sable SC avec celle du béton à base de sable SN. Cela rend l'utilisation de ce sable très pratique et ses modifications facilement quantifiables.

Mots clés : Recyclage, Béton, Granulats de béton recyclés, Sable de concassage, Sable naturel, Modification.

Abstract

This work investigated the effect of quarry sand (CS) on the physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). Two series of concretes were made, one with natural sand NS and the other with CS sand. Five mixes with substitutions of 20%, 40%, 60%, 80% and 100% of ordinary aggregates by recycled concrete aggregates RCA with three water-cement ratios 0.4, 0.5 and 0.6 were carried out for each series. Tests were carried out to evaluate workability, compressive strength, flexural strength, water absorption by immersion and shrinkage. The results showed that the mixes produced with CS sand presented good properties in fresh and hardened state. The combination of CS sand and RCA aggregates reduces the degradation often recorded and allows SC-based concrete to have the same level of performance as concrete with NS. Relationships have been derived to express each performance of CS sand concrete with that of NS sand concrete. This makes the use of this sand very convenient and its changes easily quantifiable.

Keywords: Recycling, Concrete, Recycled Aggregates concrete, Crushed sand, Natural sand, Modification.

Liste des Figures

N°	Titre	page
1	Figure 1.1. Différents déchets issus du secteur de la construction (UEPG, 2022).	9
2	Figure 1.2. Chaîne de préparation des granulats recyclés.	10
3	Figure 1.3. Production des GBR dans quelques pays développés (UEPG 2022).	12
4	Figure 1.4. Composition d'un GBR avec du mortier attaché (Bai et al, 2020)	13
5	Figure 1.5. Courbes granulométriques des différents agrégats composant le béton (Eckert et Oliveira, 2017).	14
6	Figure 1.6. Effet de la teneur en mortier attaché sur la variation de la masse volumique des GBR (De Juan et Gutiérrez, 2009)	15
7	Figure 1.7. Variation de l'absorption d'eau et la masse volumique des GBR (Le et Bui, 2020)	16
8	Figure 1.8. Zone de transition interfaciale entre un granulat et un ancien et nouveau mortier.	17
9	Figure 1.9. Teneur en mortier attaché et granulométrie des GBR	19
10	Figure 1.10. Effet de différentes méthodes de traitement sur la quantité du mortier attaché	20
11	Figure 1.11. Courbe d'écoulement des fluides Benghamiens.	22
12	Figure 1.12. Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de la teneur en GBR.	24
13	Figure 1.13. Résultats de l'effet de la teneur en GBR sur la résistance à la flexion	25
14	Figure 1.14. Résultats des retraits de différents bétons formulés avec des GBR.	26
15	Figure 1.15 Evolution du retrait lors de la dessiccation des bétons avec des GBR.	26
16	Figure 1.16. Image MEB montrant les zones de transition interfaciale d'un granulat recyclé (Pedro et al., 2018)	27
17	Figure 2.1. Identification de différentes zones d'interface d'un granulat fin naturel (NFA) et d'un granulats fin recyclé (RFA) (Nedeljković et al., 2021).	31
18	Figure 2.2. Distribution granulométrique des granulats fins naturel, concassé et recyclés (Nedeljković et al., 2021).	32
19	Figure 2.3. Mur construit en Mâchefer (Archi contemporaine 2024)	34
20	Figure 2.4. Procédés de fabrication du sable concassé dans une carrière.	36
21	Figure 2.5. Production du sable de carrière en m^3 (les 10 sites les grands producteurs), (Bilan DGM, 2010).	37
22	Figure 2.6. Granulométrie des fines calcaire, granulats fins et gros granulat (Ding et al., 2016).	38
23	Figure 2.7. Effet du taux de sable de carrière sur l'affaissement du béton (Lohani et al., 2012).	40
24	Figure 2.8. Étalement et temps d'écoulement des mortiers contenant différents taux de fines calcaires (Bouedjema et al., 2017).	40
25	Figure 2.9. Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement (Safiddine et al., 2021)	42
26	Figure 2.10. Développement de la résistance à la compression du mortier en substituant le sable SN par le sable SC.	43
27	Figure 2.11. Effet du remplacement partiel du sable SN par le sable SC sur le développement des résistances à la flexion du mortier	44
28	Figure 2.12. Effet de la teneur en poudre de calcaire dans le sable de concassage sur la résistance à la flexion du béton (Alshahwany et al., 2011).	44
29	Figure 2.13. Développement des résistance à la flexion d'un béton contenant différents taux de fines calcaire (Singh et al., 2021).	45
30	Figure 2.14. Évolution du retrait plastique des bétons avec différent taux de fines calcaires	45
31	Figure 3.1. Distribution granulométrique des granulats.	49
32	Figure 3.2. Ancien blocs en béton	50
33	Figure 3.3. Concasseur à mâchoire	50
34	Figure 3.4. Balances électroniques	52

35	Figure 3.5. Bétonnière électrique 115 litres.	53
36	Figure 3.6. Cône d'Abrams	53
37	Figure 3.7 : Types des éprouvettes utilisées	54
38	Figure 3.8. Mesure d'affaissement par le cône d'Abrams	55
39	Figure 3.9. Cube en béton soumis à un essai de compression à l'aide d'une presse hydraulique.	55
40	Figure 3.10. Prisme en béton soumis à un essai de compression à l'aide d'une presse hydraulique.	56
41	Figure 3.11. Conservation des éprouvettes au laboratoire a 20°C.	57
42	Figure 3.12. Bâti de mesure du retrait avec un comparateur d'une précision de 1 μm .	57
43	Figure 3.13. Mode d'immersion des éprouvettes pour la mesure de l'absorption.	58
44	Figure 3.14. Dispositif de mesure de l'absorption capillaire du béton.	59
45	Figure 3.15. Suivi du poids d'une éprouvette séchant à l'air libre (perte en poids)	60
46	Figure 4.1. Résultats des affaissements et des besoins en superplastifiant des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.6).	63
47	Figure 4.2. Résultats des affaissements et des besoins en superplastifiant des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.5).	64
48	Figure 4.3. Résultats des affaissements et des besoins en superplastifiant des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.4).	65
49	Figure 4.4. Résultats de la résistance à la compression des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.6).	67
50	Figure 4.5. Résultats de la résistance à la compression des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.5).	68
51	Figure 4.6. Résultats de la résistance à la compression des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.4).	68
52	Figure 4.7. Résultats de la résistance à la flexion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.6).	70
53	Figure 4.8. Résultats de la résistance à la flexion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.5).	70
54	Figure 4.9. Résultats de la résistance à la flexion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.4).	71
55	Figure 4.10. Résultats de l'absorption par immersion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable.	73
56	Figure 4.11. Résultats de l'absorption par capillarité des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable.	74
57	Figure 4.12. Résultats de retrait de séchage des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable.	77
58	Figure 4.13. Comparaison des dosages de superplastifiant du béton BGR à base de sable SN avec celui à base de sable SC.	78
59	Figure 4.14. Comparaison entre la résistance a la flexion du BGR à base de SN et de SC.	79
60	Figure 4.15. Comparaison entre la résistance à la compression du BGR à base de SN et de SC.	80
61	Figure 4.16. Comparaison entre l'absorption d'eau des BGR à base de sable SN et de SC.	81
62	Figure 4.17. Comparaison entre les déformations du retrait des bétons BGR-SN et BGR- SC.	82
63	Figure 4.18. Variation des résistances à la traction en fonction de celles à la compression pour un béton à base de BGR-SN-SC.	83
64	Figure 4.19. Variation du coefficient k en fonction de la résistance à la compression.	84
65	Figure 4.20. Variation du coefficient k en fonction de la teneur en GBR	85

Liste des Tableaux

N°	Titre	page
1	Tableau 1.1. Valeurs d'abrasion selon l'essai Los Angeles des granulats GBR et des GGO	18
2	Tableau 2.1. Quelques propriétés physiques du sables de déchets de carrière (Ding et al., 2016).	39
3	Tableau 2.2. Eléments chimiques composant le sable de déchets de carrière (Kumar, 2021).	39
4	Tableau 3.1. Eléments chimiques et minéraux composant le ciment	48
5	Tableau 3.2. Quelques propriétés physico-mécaniques des granulats	49
6	Tableau 3.3. Composition de superplastifiant MF 30	50
7	Tableau 3.4. Composition minéral de l'eau	51
8	Tableau 3.5. Composition des bétons avec des granulats de béton recyclé et du sable naturel.	51
9	Tableau 3.6. Composition des bétons avec des granulats de béton recyclé et du sable de carrière.	52

Table des matières

Remerciements	II
ملخص	III
Résumé.....	IV
Abstract	V
Liste des Figures	VI
Liste des Tableaux.....	VIII
Table des matières.....	IX
Introduction générale	2

Chapitre 01 : Utilisation des granulats recyclés pour la confection du béton

1.1. Introduction.....	8
1.2. Déchets de construction et de démolition	8
1.3. Historique de recyclage des déchets de CDW.....	10
1.4. Granulats de béton recyclé.....	12
1.4.1. Description d'un GBR.....	12
1.4.2. Propriétés physiques de GBR	13
1.4.2.1. Distribution granulométrique	13
1.4.2.2. Densité	14
1.4.2.3. Absorption d'eau.....	15
1.4.2.4. Microstructure de GBR.....	17
1.4.2.5. Résistance à l'abrasion	18
1.4.3. Méthodes de traitement	19
1.5. Béton à base de granulats recyclés	21
1.5.1. Ouvrabilité	22
1.5.2. Rhéologie.....	22
1.5.3. Résistance à la compression.....	23
1.5.4. Résistance à la flexion	24
1.5.5. Retrait.....	25
1.5.6. Zone de transition interfacial.....	27
1.6. Conclusion	28

Chapitre 02 : Utilisation des granulats fins recyclés pour la confection du béton

2.1. Introduction.....	30
2.2. Granulats fins recyclés	30
2.2.1. Granulat fin recyclé	30

2.2.2.1. Granulométrie	31
2.2.2.2. Densité	32
2.2.2.3. Absorption d'eau.....	32
2.2.2. Granulat fin artificiel.....	33
2.2.2.1. Laitier de hauts fourneaux	33
2.2.2.2. Laitier d'acier.....	33
2.2.2.3. Sous-produits résultant des centrales thermiques	33
2.2.2.4. Mâchefer	34
2.2.2.5. Scories	34
2.2.2.6. Cendres volantes.....	35
2.2.2.7. Sables de fonderies	35
2.2.2.8. Sable de déchets de carrière.....	35
2.3. Production du sable de concassage en Algérie	36
2.3. Spécifications pour l'utilisation du sable concassé	37
2.4. Caractéristique physico-mécaniques du sable concassé.....	37
2.5. Influence de sable de carrière sur les propriétés du béton	39
2.5.1. Ouvrabilité	39
2.5.2. Paramètres rhéologiques	40
2.5.3. Résistance à la compression.....	42
2.5.4. Résistance à la traction.....	43
2.5.5. Retrait.....	45
2.6. Conclusion	46

Chapitre 03 : Présentation du protocole expérimentale

3.1. Introduction.....	48
3.2. Programme expérimental	48
3.2.1. Matériaux utilisés	48
3.2.1.1. Ciment.....	48
3.2.1.2. Sable.....	49
3.2.1.3. Gravier.....	50
3.2.1.4. Adjuvant	50
3.2.1.5. Eau de gâchage	51
3.2.2. Formulation des bétons.....	51
3.2.3. Matériels utilisé.....	52
3.2.3.1. Balance électronique	52
3.2.3.2. Malaxeur	53
3.2.3.3. Cône d'Abrams.....	53

3.2.3.4. Eprouvettes utilisées	54
3.2.4. Préparation des échantillons	54
3.2.5. Essais effectués.....	55
3.2.5.1. Ouvrabilité.....	55
3.2.5.2. Résistance à la compression	55
3.2.5.3. Résistance à la flexion	56
3.2.5.4. Essai de Retrait.....	57
3.2.5.5. Absorption d'eau par immersion	58
3.2.5.6. Absorption par capillarité	59
3.2.5.7. Perte en poids	60
3.3. Conclusion	62

Chapitre 4 : Présentation et analyse des résultats

4.1. Introduction	64
4.2. Modifications apportées sur l'ouvrabilité	64
4.3. Modifications sur la résistance à la compression	67
4.4. Modifications sur la résistance à la flexion	70
4.5. Modifications sur l'absorption d'eau	73
4.6. Absorption d'eau par capillarité.....	75
4.7. Modifications apportées sur le retrait	76
4.7. Validation des résultats.....	79
4.7.1. Comparaison des besoins en superplastifiant.....	80
4.7.2. Comparaison des résistance à la flexion	81
4.7.3. Comparaison des résistances à la compression	82
4.7.4. Comparaison de l'absorption d'eau	83
4.7.5. Comparaison des retraits	84
4.8. Corrélation de la résistance à la flexion	84
4.9. Conclusion	88
Conclusions générale	90
Références bibliographiques.....	93

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur de la construction a besoin de grandes quantités de matières premières pour la fabrication du ciment, ainsi que pour la composition des mortiers et du béton. À l'échelle mondiale, quatre milliards de tonnes de ciment et quarante milliards de tonnes de granulats sont consommés chaque année (Aslam et al., 2020 ; McNeil et Kang, 2013). Cette exploitation intensive des ressources naturelles conduit à leur épuisement, provoquant des pénuries de la matière première dans certaines régions. Par ailleurs, la démolition d'anciens bâtiments détériorés ou effondrés à la suite de catastrophes génère d'immenses volumes de déchets, dont le stockage représente un défi environnemental majeur. Une solution séduisante face à ce problème est de recycler ces déchets en les introduisant dans des nouveaux projets de béton. Cette nouvelle technologie ouvre une voie alternative durable en permettant la préservation des ressources naturelles. Une solution prometteuse à ce problème est le recyclage du béton usagé pour produire des granulats de béton recyclé. Cette technologie offre une alternative durable en permettant la réutilisation de ces granulats dans de nouvelles applications de construction. Buck (1977) a souligné que l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) a débuté après la Seconde Guerre mondiale, répondant à la forte demande de matériaux pour reconstruire les infrastructures détruites pendant la guerre. Ces dernières décennies, le recyclage des déchets de construction et de démolition s'est imposé comme un enjeu majeur dans les politiques de gestion des déchets. L'objectif est de minimiser, réutiliser, recycler et valoriser ces déchets plutôt de les trouver occuper les terrains dans les décharges publiques.

Les caractéristiques de ces granulats de béton recyclé (GBR) et leur modifications apportées au béton, ainsi que leurs effets sur les propriétés du béton produit, ont fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies (Kim et al., 2022 ; Pedro et al., 2014 ; Tabsh et Abdelfatah, 2009). Bien que l'utilisation des GBR présente des avantages environnementaux significatifs, leur application reste limitée en raison de leurs propriétés physiques et mécaniques inférieures. La principale différence entre les granulats naturels et recyclés réside dans la présence de mortier ancien adhérent à la surface des GBR, ce qui les rend moins denses, plus absorbants et moins résistants que les granulats naturels (Ait Mohamed et al., 2016). Plusieurs études (Sasanipour et Aslani, 2019 ; Zhan et al., 2019) ont mis en évidence la mauvaise qualité des granulats recyclés (GBR), attribuée aux caractéristiques déficientes du mortier adhérent. Cette particularité explique en grande

partie la mauvaise qualité des GBR par rapport aux granulats naturels (Ait Mohamed et al., 2016 ; Sasanipour et al., 2019). Par conséquent, les propriétés du béton sont fortement liées à la quantité et à la qualité du mortier qui reste attaché à ces granulats, ce qui entraîne une porosité accrue, une apparition de microfissures et une chute de la résistance mécanique. Ainsi, les GBR constituent un facteur limitant dans la production de béton.

De nombreux chercheurs (Ait Mohamed et al., 2021 ; Kanellopoulos, et al., 2014) ont prouvé que le BGR présente une résistance à la compression similaire ou légèrement inférieure à celle du béton ordinaire. La rugosité et l'angularité des granulats GBR peuvent augmenter la cohésion entre les grains et assurer une bonne résistance. Ainsi, il est possible d'améliorer les propriétés mécaniques du béton recyclé en améliorant la structure poreuse des granulats recyclés, soit par carbonatation, traitement chimique ou par l'ajout d'additifs minéraux (Kapoor, et al., 2021 ; Kou, et Poon, 2013). La réaction pouzzolanique qui se produit lors de l'hydratation des additifs minéraux améliore les propriétés physiques et mécaniques du béton, tout en augmentant sa durabilité. Selon une étude menée par Aliabdo et al. (2018), l'utilisation de 5% à 10% de fumée de silice dans un béton à base de granulats GBR conduit à une amélioration de la résistance à la compression à 28 jours respectivement de 49% et 61 %.

L'amélioration produite s'explique par la dense microstructure causée par l'effet de remplissage et de la réaction pouzzolanique induite par les fumées de silice. Il est donc possible de produire du béton durable contenant 15 % de métakaolin et 100 % de granulats recyclés (GBR) sans risque de compromettre les propriétés du béton (Muduli, et Mukharjee, 2020). Parmi les propriétés du béton testées, la résistance à la flexion est celle qui est le moins affectée par l'incorporation de granulats GBR (Pacheco et al., 2019).

Une étude statistique (Bai et al., 2020) a révélé qu'il y a 95 % de chances que la résistance à la flexion du béton composé entièrement de granulats recyclés ne soit réduite que de 16,8 %. La résistance à la flexion diminue respectivement de 18,8 % et de 41,2 % lorsque les granulats recyclés sont utilisés à des taux de remplacement de 50 % et de 100 % (Aliabdo et al., 2018). Donc, l'ajout d'un ajout minéral pouzzolanique au ciment permet de corriger les effets négatifs des granulats GBR, même si le béton est entièrement en GBR. Les réactions pouzzolaniques entre l'addition minérale et le mortier adhérent aux granulats GBR améliorent la zone de transition interfaciale (ITZ). D'autres études (Lotfy et Al-Fayez, 2015) ont montré qu'il n'y avait pratiquement aucune différence dans la

résistance à la flexion lorsque le béton contenait 35 % de laitier, quel que soit le taux de remplacement des granulats GBR. Par ailleurs, il est possible d'atteindre une amélioration de 10 à 29 % de la résistance à la flexion en combinant des granulats recyclés grossiers et fins (Domingo-Cabo et al. 2009).

Le béton se rétracte en raison de la perte d'eau lors du séchage et de la consommation d'eau lors de l'hydratation du ciment. Les microfissures provoquées par ce retrait peuvent entraîner des problèmes de corrosion des armatures, une détérioration de la durabilité du béton et une réduction de la durée de vie des structures. Des études ont démontré que le séchage du béton composé de granulats recyclés (GBR) provoque un retrait de 15 à 60 % plus élevé que celui du béton ordinaire (Domingo-Cabo et al., 2009). Les granulats recyclés, qu'ils soient fins ou grossiers, ont une influence significative sur le développement du retrait par séchage. Cependant, lorsque le béton est mélangé avec une teneur élevée en granulats recyclés grossiers (GBR), l'effet des granulats fins sur le retrait par séchage diminue (Sasanipour et Aslani, 2020 ; Zhan et al., 2020). Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte les propriétés des granulats recyclés dans la formulation du béton, afin de minimiser les effets négatifs sur le retrait et d'améliorer la durabilité des structures.

Le sable est une matière première essentielle, représentant environ 35 % du volume du béton (Celik et Marar, 1996 ; Mundra et al., 2016). Traditionnellement, la majeure partie de ce matériau est extraite des rivières et des plages. Cependant, les réglementations environnementales concernant l'exploitation de ces sables se sont considérablement renforcées afin de préserver ces ressources naturelles. Cette évolution a contraint les fabricants à explorer des alternatives durables. Parmi les solutions envisagées, les déchets issus du concassage de roches dans les carrières se sont révélés être un substitut viable au sable naturel. Ces déchets de carrière (SC) sont composés de grains fins de moins de 4 mm et caractérisés par une teneur élevée en poudre fines. Ces propriétés, ainsi que sa disponibilité locale, ont attiré l'attention de nombreux promoteurs de la construction. Pour rendre la production de béton à la fois plus économique et écologique, une solution prometteuse consiste à combiner des granulats grossiers recyclés (GBR) avec du sable de carrière (SC) comme agrégat fin. Cette approche est soutenue par plusieurs chercheurs, qui y voient une opportunité de développer des bétons innovants conformes aux objectifs de développement durable dans le domaine de la construction (Yang et al., 2019). Cette

combinaison permet non seulement de réduire l'impact environnemental, mais aussi d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

La teneur élevée en poudre de calcaire (10 à 20 %) dans le sable SC peut servir de sites de nucléation pour la réaction d'hydratation à un jeune âge, accélérant ainsi l'hydratation des minéraux du clinker. Les carbo-aluminates se forment grâce à la réaction entre la poudre de calcaire et le C_3A , ce qui contribue à une augmentation de la résistance à un jeune âge. Par ailleurs, la présence de micro-fines permet de combler les vides entre les particules d'agrégats, et une meilleure compaction des fines peut accroître la densité de la matrice de la pâte ainsi que celle de la zone de transition inter-granulaire dans le béton durci (Li et al., 2018 ; Pacheco et al., 2019). L'utilisation de sable SC est appropriée comme substitut au sable SN et est devenue incontournable en raison des exigences techniques, commerciales et environnementales. Un contrôle de qualité adéquat lors de l'utilisation de sable SC peut conduire à de meilleurs résultats en termes de béton (Bounedjema et al, 2017 ; Fate 2014 ; Meziane et al., 2015).

L'objectif de cette étude est d'examiner les caractéristiques des bétons qui substituent différentes quantités de granulats de béton recyclés aux granulats grossiers naturels. Des sables SN et SC ont été utilisés pour fabriquer deux séries différentes de bétons. Une série de béton a été réalisée à partir de sable SN et une autre à partir de sable SC. Ces bétons ont été testés au laboratoire LaG de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef. Différents types de béton ont été élaborés avec des rapports E/C de 0,6, 0,5 et 0,4. L'étude a examiné l'évolution des propriétés à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci, en se concentrant sur la résistance mécanique, ainsi que sur la durabilité à travers l'évaluation du retrait et de l'absorption d'eau.

La thèse est organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre propose une revue de la littérature qui vise à classer les déchets issus du secteur de la construction, à identifier les caractéristiques des blocs de béton brut recyclés (GBR), et à retracer l'historique et les données d'utilisation des blocs de béton brut recyclés. Une part importante de ce chapitre est dédiée à la caractérisation des granulats de béton recyclé (GBR), incluant la distribution granulométrique, la densité, la densité apparente, l'absorption d'eau, la microstructure, la résistance à l'abrasion et la teneur en mortier attaché.

Le deuxième chapitre examine l'utilisation des granulats fins recyclés dans le béton, en abordant de manière générale leur intégration. Il se concentre ensuite sur la production et l'utilisation du sable concassé dans le béton, en examinant son influence sur les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité du béton. Ces aspects sont soutenus par des références issues de travaux antérieurs tirés de la littérature scientifique.

Ce chapitre sera suivi d'un troisième chapitre qui se concentrera, dans un premier temps, sur une caractérisation approfondie des matériaux utilisés. Les propriétés physiques comme la masse volumique apparente et spécifique, la granulométrie, la porosité, l'absorption ainsi que les caractéristiques mécaniques comme la résistance à l'abrasion Los Angeles y seront détaillées. Ensuite, une description complète du matériel utilisé sera présentée, incluant la préparation des éprouvettes qui seront soumises à des essais normalisés menés dans le cadre de cette étude.

Les résultats relatifs aux effets du sable concassé (SC) et des granulats de béton recyclé (GBR) sont présentés, analysés et discutés dans le quatrième chapitre. Des analyses et des comparaisons ont été faites sur les différentes caractéristiques du béton, notamment l'ouvrabilité, la résistance à la flexion, la résistance à la compression, le retrait et l'absorption. Ces caractéristiques sont examinées en relation avec le rapport eau/ciment, le type de sable et le taux de substitution du GBR. Ce chapitre se termine par l'élaboration de relations mathématiques décrivant l'évolution de la résistance mécanique, de l'absorption et du retrait en fonction de la composition du béton, avec des coefficients de corrélation jugés satisfaisants.

Une synthèse globale est fournie à la fin de cette thèse, soulignant les principaux résultats et offrant de nouvelles pistes de recherche.

Chapitre 01 :

*Utilisation des granulats recyclés pour la
confection du béton.*

1.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, la gestion des déchets est devenue l'un des problèmes les plus urgents. Les déchets de construction et de démolition (CDW), le plus grand flux de déchets au monde en termes de poids et de volume, sont produits par les secteurs du génie civil et des travaux publics (Kazmi et al., 2020). Les résidus laissés après la construction, la rénovation, l'extension, la modification, l'entretien et la démolition des bâtiments et des infrastructures sont communément appelés (DCD). L'essor industriel, couplé à des réglementations environnementales de plus en plus strictes dans les pays développés et en développement, a conduit à une réévaluation globale des méthodes de recyclage et de réutilisation des déchets de construction et de démolition, notamment sous forme de granulats recyclés pour des projets de génie civil, tels que la construction d'infrastructures. Selon leur qualité, les granulats de béton recyclés (GBR) provenant de ces déchets peuvent être utilisés dans divers travaux de génie civil, offrant ainsi des avantages économiques et environnementaux significatifs (Ait Mohamed et al., 2016).

Cependant, en raison du mortier attaché, de la porosité, de la forte absorption d'eau et de la faible densité, les granulats recyclés sont généralement de qualité inférieure à celle des granulats naturels. Ces caractéristiques influencent les qualités du béton (Sasanipoor et al., 2019), soulignant l'importance de rechercher comment les granulats recyclés affectent le comportement du béton.

La définition des caractéristiques mécaniques, microstructurelles et physiques des granulats de béton recyclé (GBR) est abordée dans ce chapitre. De plus, il présente les différentes techniques de traitement et retrace l'historique de leur utilisation.

1.2. Déchets de construction et de démolition

Contrairement aux déchets industriels, une grande quantité de déchets de démolition et de construction sont réutilisables, et l'industrie de la construction est le plus grand consommateur de matières premières. Ces déchets sont classés selon divers critères, tels que leur nature, leur origine et leur impact potentiel sur l'environnement. Les déchets de chantier sont divisés en trois catégories principales : les déchets inertes, les déchets non dangereux non inertes (ou déchets industriels banals) et les déchets dangereux. La figure 1.1 présente les différents types de déchets produits par les chantiers de construction ainsi que leurs proportions respectives.

a) Les déchets inertes :

Lorsque les déchets ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique pendant leur stockage, ils sont considérés comme inertes. Ils sont incapables de brûler, de se décomposer ou de produire une réaction chimique ou physique dangereuse. Le béton, la brique, la céramique, le verre, etc. font partie des déchets que nous pouvons identifier.

b) Déchets non dangereux :

Ces déchets ne présentent pas de danger immédiat pour l'environnement ou la santé humaine. Ils sont souvent recyclables ou réutilisables, on peut citer parmi d'autres : Papier, Bois, Plastique, Métaux.

c) Déchets dangereux :

Ces déchets contiennent des substances qui peuvent être nocives pour la santé humaine ou l'environnement. Ils nécessitent une gestion spécifique pour éviter les risques. On peut citer parmi d'autres : solvants, huiles usées, produits chimiques, peintures, déchets électroniques, batteries.

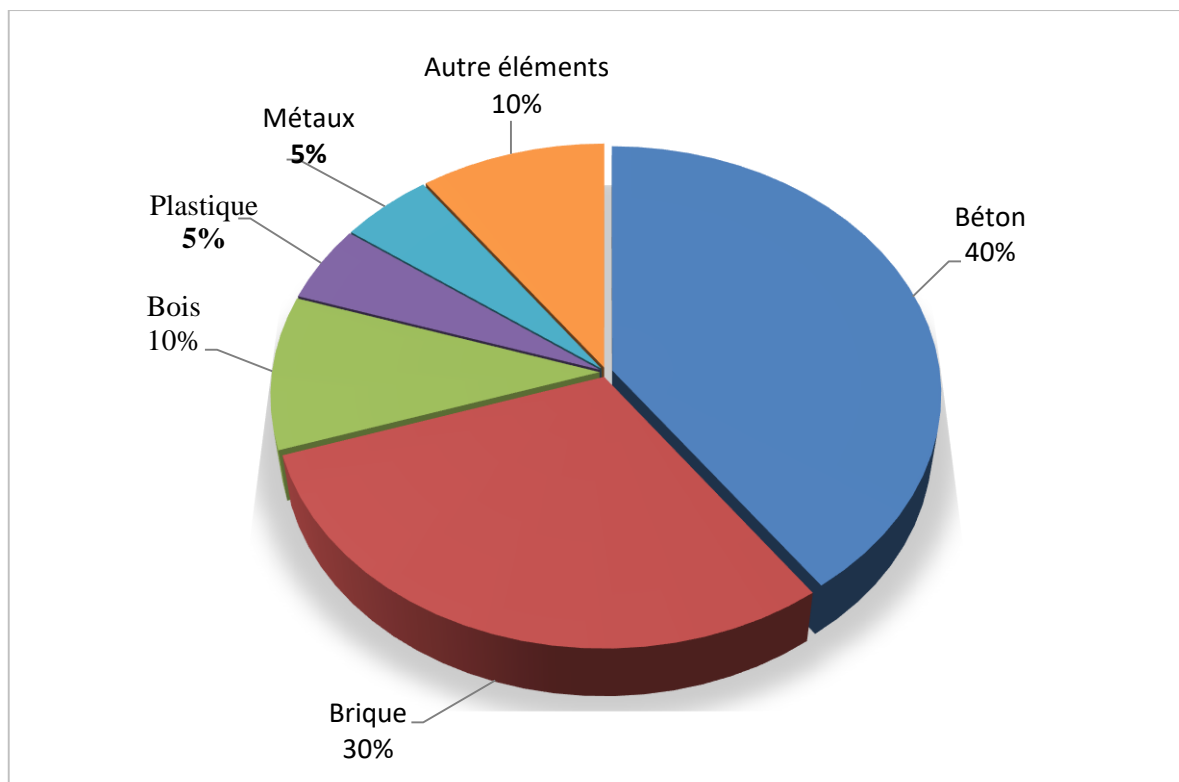


Figure 1.1. Différents déchets issus du secteur de la construction (UEPG, 2022).

1.3. Historique de recyclage des déchets de CD

Au début des années 1970, les départements de génie civil des pays développés comme les États-Unis et le Japon ont commencé à recycler les déchets de construction, suivis par l'Europe en 1980. (Le et Bui, 2020). La figure 1.2 illustre les étapes suivies comme le tri, le concassage et le recyclage.



Figure 1.2. Chaîne de préparation des granulats recyclés.

La croissance continue des secteurs de la construction et de l'industrie a produit d'énormes quantités de déchets. C'est pourquoi le recyclage de ces déchets est devenu une priorité absolue pour les écologistes et les responsables publics. L'utilisation des ressources naturelles dans le secteur de la construction est en augmentation. Entre 2007 et 2014, elle est passée de 21 milliards de tonnes à 40 milliards de tonnes. Des pays comme la Chine, les États-Unis, le Brésil, l'Inde, la Turquie, l'Indonésie, le Mexique et la Russie détiennent la plus forte augmentation de la demande en recyclage des déchets. En outre, les ouragans, les tremblements de terre et d'autres catastrophes naturelles ont également contribué à l'accumulation excessive de déchets de béton, une tendance qui devrait se poursuivre (UEPG, 2022).

L'essor industriel, associé à l'application de réglementations environnementales strictes dans les pays développés et en développement, a incité à une réévaluation globale des méthodes destinées à recycler et à valoriser des déchets issus de la construction et de la démolition (DCD). Ces déchets sont destinés à se transformer en granulats recyclés, utilisables dans des projets de génie civil, tels que la construction et le développement d'infrastructures. Selon leur qualité, ces granulats recyclés peuvent être intégrés à divers travaux de génie civil, contribuant ainsi significativement à la durabilité économique et environnementale.

Actuellement, 68 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition (CDW) sont recyclés chaque année en Allemagne. Néanmoins, avec 90 % de leurs DCD recyclés, les Pays-Bas sont en tête en Europe en termes de proportion. Il reste encore beaucoup à faire, ce qui explique pourquoi la directive-cadre sur les déchets (Directives 2008/98/CE, 2008) a fixé un objectif pour recycler et réutiliser près de 70% (en poids) des DCD non dangereux d'ici la prochaine décennie.

En 2018, les États-Unis ont produit plus de 600 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition. Les matériaux bitumineux représentaient 17,8 % de ces déchets, tandis que le béton en représentait 67,5 %. Seuls 10 % de ces déchets sont produits par la construction, tandis que 90 % sont produits par la démolition (EPA, 2018). Selon cette cadence, on prévoit d'atteindre 2.2 milliards de tonnes de déchets (DCD) en 2024 (figure 1.3). Ces déchets DCD constituent 40 % de l'ensemble des déchets solides produits à l'échelle mondiale (UEPG, 2022).

Les communautés et les entreprises engagées dans la protection de l'environnement ne se contentent plus de recycler une partie des déchets mais elles aspirent désormais à atteindre l'objectif du zéro déchet. Ceci consiste à concevoir des produits pouvant être réutilisés, réparés ou recyclés, que ce soit sur le marché ou dans la nature, tout en éliminant tout rejet nocif dans le sol, l'eau et l'air. Bien que ce concept ait vu le jour en Californie, aux États-Unis, en 1975, il a depuis été adopté à l'échelle mondiale, notamment par les gouvernements locaux en Australie et en Nouvelle-Zélande, qui ont mis en place des plans ambitieux pour tendre vers le zéro déchet.

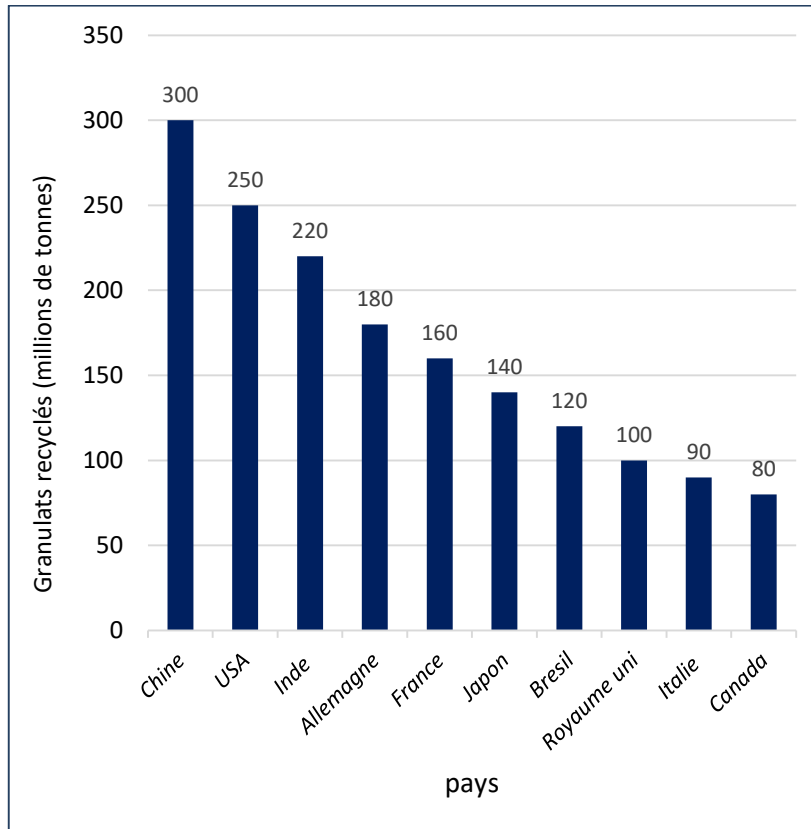


Figure 1.3. Production des GBR dans quelques pays développés (UEPG 2022).

Le besoin de granulats augmente constamment en raison des initiatives gouvernementales visant à stimuler le développement économique grâce à des investissements dans le secteur de la construction et des infrastructures routières.

La consommation globale en granulat a enregistré un volume de 47 milliards de tonnes en 2018, équivalent à une valeur de 300 milliards de dollars américains. Les estimations prévoient un accroissement positif de ce marché représentant un TCAC (taux de croissance annuel composé) stable de 6 % de 2019 à 2029 (UEPG 2022)

Par exemple, le programme d'action au Royaume-Uni a encouragé l'utilisation de granulats fabriqués à partir de matériaux recyclés et secondaires. En conséquence, 25 % de la demande en granulats a été satisfaite par un approvisionnement durable. Grâce à ces efforts, ce pourcentage est passé à 30 % trois ans plus tard,

1.4. Granulats de béton recyclé

1.4.1. Description d'un GBR

Généralement, les débris de construction et de la démolition sont transformés par concassage et criblage en granulats (GBR). Ces granulats recyclés se composent d'un gravier naturel avec une partie d'ancien mortier attaché à sa surface comme s'est illustré sur la figure 1.4. La quantité de la phase de mortier attaché varie en fonction de la nature du béton d'origine, des méthodes de concassage employées et des traitements appliqués et (Le et Bui, 2020).

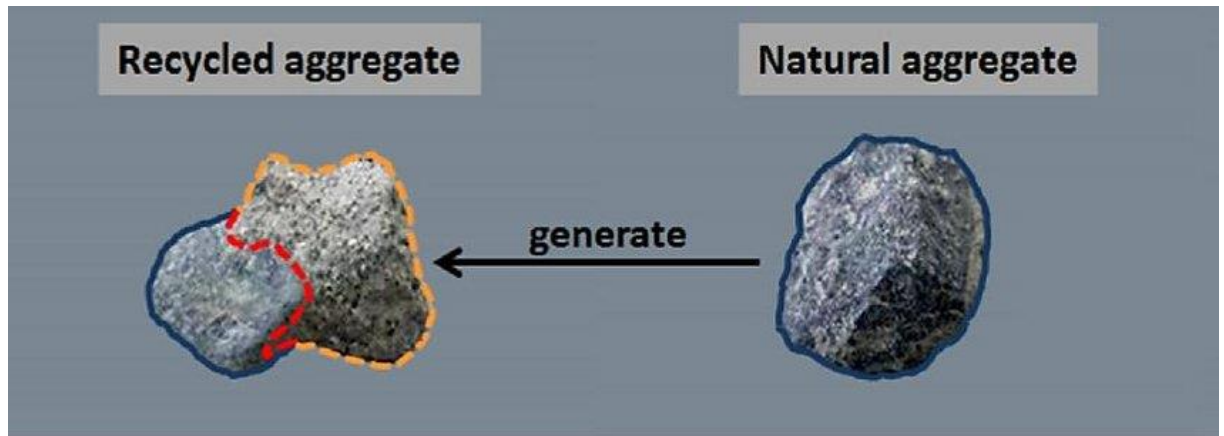


Figure 1.4. Composition d'un GBR avec du mortier attaché (Bai et al, 2020)

1.4.2. Propriétés physiques de GBR

Le granulats de béton recyclé peut être décrit comme un matériau composé de deux phases principales : le granulats naturel et le mortier attaché. Une troisième phase, appelée zone de transition interrassiale (ITZ), est également identifiée, située à l'interface entre le granulats naturel et la pâte résiduelle (Kim, 2022 ; Sasanipoor et Aslani, 2020).

Les caractéristiques physiques des granulats de béton recyclé (GBR) présentent une grande variabilité. Elles dépendent du béton parent d'origine et de la taille du granulats. En général, ces caractéristiques telles que l'absorption d'eau, la densité et la résistance à l'usure sont inférieures à celles des granulats naturels. Cette différence s'explique essentiellement par la présence de mortier adhérent et d'impuretés résiduelles dans les granulats recyclés, comme l'ont souligné Kapoor et al. (2021) et Tabsh et Abdelfettah (2009).

1.4.2.1. Distribution granulométrique

La distribution granulométrique des GBR est une caractéristique importante qui influence les propriétés mécaniques et physiques du béton fabriqué avec ces granulats. Les

GBR présentent une distribution granulométrique variée, incluant des particules fines et grossières. Cette variation dépend des caractéristiques du béton parent, du processus de concassage et du criblage utilisé lors du recyclage du béton. Plusieurs recherches ont montré que la distribution granulaire des granulats recyclés (GBR) diffère légèrement de celle des granulats naturels (GN). Ying. et al. (2020) ainsi qu'Eckert et Oliviera (2017) ont observé que la distribution granulométrique des GBR se situe dans la plage de référence spécifiée comme le montre la figure 1.5. Cela indique que les GBR possèdent une granulométrie conforme aux normes applicables, sans nécessiter d'ajustements.

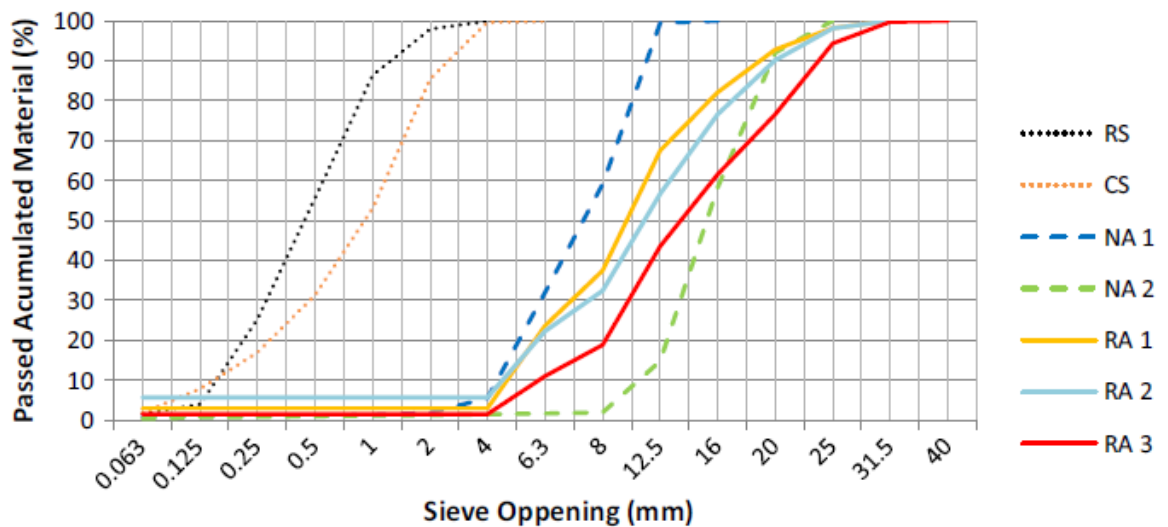


Figure 1.5. Courbes granulométriques des différents agrégats composant le béton (Eckert et Oliveira, 2017).

1.4.2.2. Densité

La densité des granulats est une propriété essentielle qui influence la qualité du matériau. Elle joue un rôle déterminant dans la composition des mélanges de béton et dans le contrôle des plusieurs propriétés du béton, notamment celui fabriqué à base de granulats recyclés.

En général, les granulats de béton recyclés pèsent moins que les granulats naturels. La présence de mortier attaché aux granulats d'origine, qui a une densité plus faible et contribue donc à une densité globale plus faible, explique cet écart (Poon et al., 2004 ; Pedro et al., 2014). En règle générale, la densité spécifique des granulats recyclés varie entre 2,4 et 2,5 (soit 2400 à 2500 kg/m³), tandis que celle des granulats naturels se situe typiquement entre 2,6 et 2,7 (2600 à 2700 kg/m³).

De Juan et Gutiérrez (2009) ont mis en évidence, à travers les résultats illustrés sur la figure 1.6, la relation entre la quantité de mortier adhérent et la variation de la densité des granulats de béton recyclé. Ils ont démontré que la densité peut varier selon le degré de libération et les différentes fractions granulométriques. Par exemple, la fraction fine, où se concentre l'ancienne pâte de ciment, peut présenter une densité distincte de celle de la fraction grossière (Reis et al., 2021).

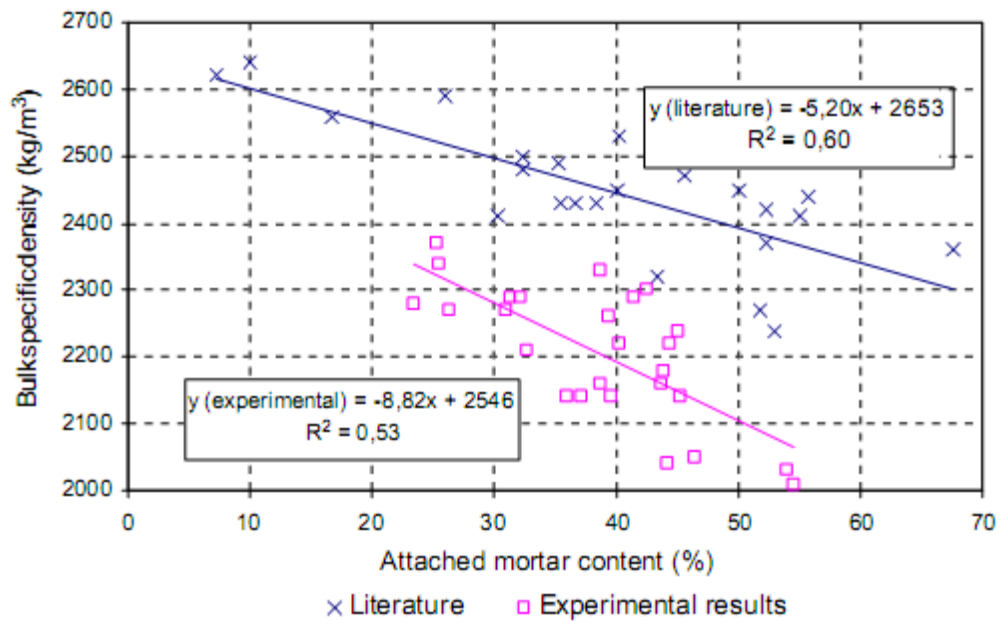


Figure 1.6. Effet de la teneur en mortier attaché sur la variation de la masse volumique des GBR (De Juan et Gutiérrez, 2009)

1.4.2.3. Absorption d'eau

L'absorption d'eau était un indice décisif affectant les performances des granulats recyclés. La littérature montre que le GBR a une capacité d'absorption d'eau plus élevée que le granulat naturel en raison de la mauvaise structure du mortier attaché (Upshaw et Cai, 2020 ; Le et Bui 202). L'une des difficultés liées à l'application de béton de granulats recyclés en pratique, c'est le contrôle de l'eau contenu en granulats recyclés. Une forte absorption d'eau et l'hétérogénéité des granulats recyclés provoquent des difficultés pour déterminer l'eau efficace à la formulation du béton (figure 1.7).

Alors que les valeurs d'absorption des granulats naturels sont souvent inférieures à 1 %, bien qu'elles puissent atteindre jusqu'à 5 %, celles des granulats recyclés sont généralement comprises entre 3 % et 10 %. La quantité du mortier attaché et la qualité du

béton parent affecte significativement les propriétés du béton. Une valeur d'absorption élevée indique une grande teneur en mortier attaché (Reis et al., 2021; Zhan et al., 2019).

Cette propriété est importante car elle affecte la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la maniabilité appropriée. La quantité d'eau retenue à l'état saturé est nettement plus élevée dans les granulats recyclés en raison de leur taux d'absorption nettement plus élevé que celui des granulats naturels. Pour maintenir le rapport E/C constant, la quantité d'eau ajoutée au mélange doit être modifiée.

Français Les mécanismes qui gouvernent la formation de la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le granulat et la nouvelle pâte de ciment peuvent être modifiés par la présence d'une ancienne pâte carbonatée poreuse. À l'interface entre l'ancienne et la nouvelle pâte, celle-ci peut faire émerger une microstructure spécifique. La formation de l'auréole de transition est influencée par les échanges d'eau entre le granulat et la pâte de ciment fraîche lorsque des granulats poreux à forte capacité d'absorption sont utilisés. Lorsqu'il s'agit de granulats légers comme les argiles expansées ou les schistes qui présentent un réseau de macropores (dont la taille peut varier de quelques centaines de microns à plusieurs millimètres), un état initial sec conduit à une absorption d'eau lors de la fabrication et de la mise en place du béton, ce qui crée un halo de transition plus dense et plus adhérent (Wang et al., 2020 ; Kou et Poon, 2013).

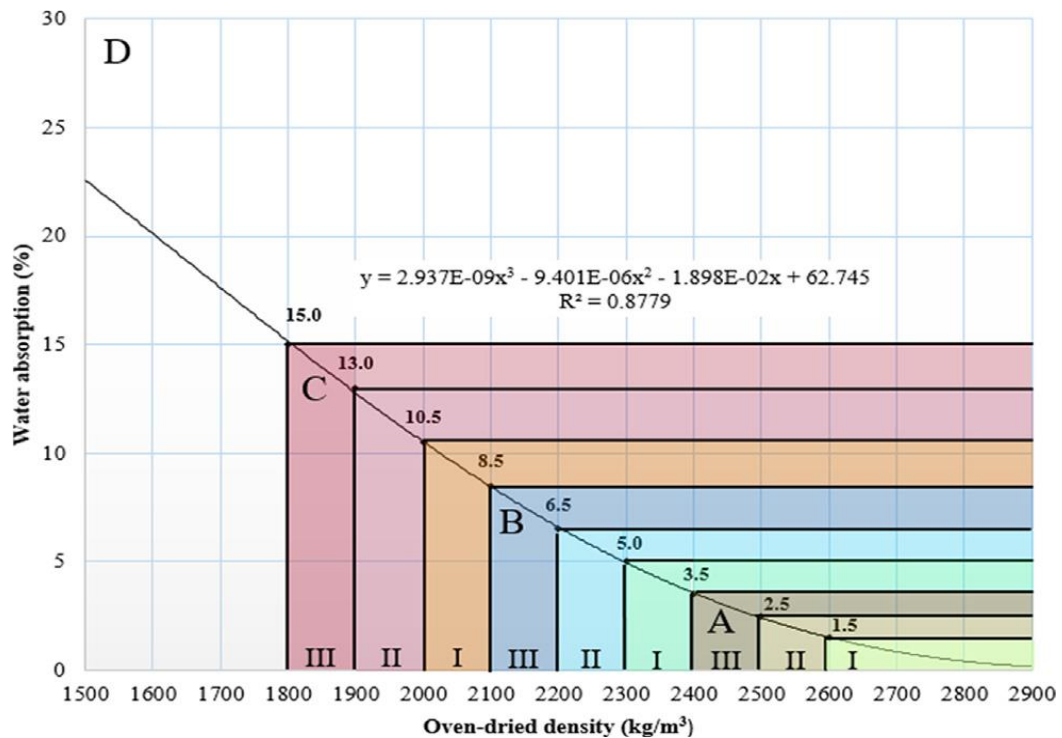


Figure 1.7. Variation de l'absorption d'eau et la masse volumique des GBR (Le et Bui, 2020).

1.4.2.4. Microstructure de GBR

Les agrégats issus de déchets de construction et de démolition sont poreux, inhomogènes, moins denses et présentent une faible zone de transition interfaciale (ITZ) entre les agrégats et le mortier. Ils sont également partiellement recouverts de restes de mortier attaché. La ITZ est la région d'environ 10 à 50 micromètres d'épaisseur entourant chaque granulat dans le béton. Cette zone présente des propriétés physico-chimiques distinctes par rapport à la matrice du ciment principale (Wang et al., 2020).

La teneur en mortier résiduel varie entre 25 % à 60 % selon la taille des granulats et le processus du concassage (Tam et al., 2018, Ying et al., 2020). La zone ITZ est composée d'hydroxyde de calcium (CH) et de quantités limitées de silicate de calcium hydraté (C-S-H) (figure 1.8), avec une composition proche de celle de la matrice principale. Elle contient également, en partie, des phases d'ettringite (AFT) et de monosulfoaluminate (Afm), similaires à celles présentes dans la phase massive. Elle présente une porosité capillaire et d'absorption d'eau relativement élevée à cause de la faible rigidité du mortier adhérent, l'absorption d'eau de GBR peut varier largement de 3 % à 10 %, par rapport aux 1 à 5 % pour les granulats naturel (Poon et al., 2004).

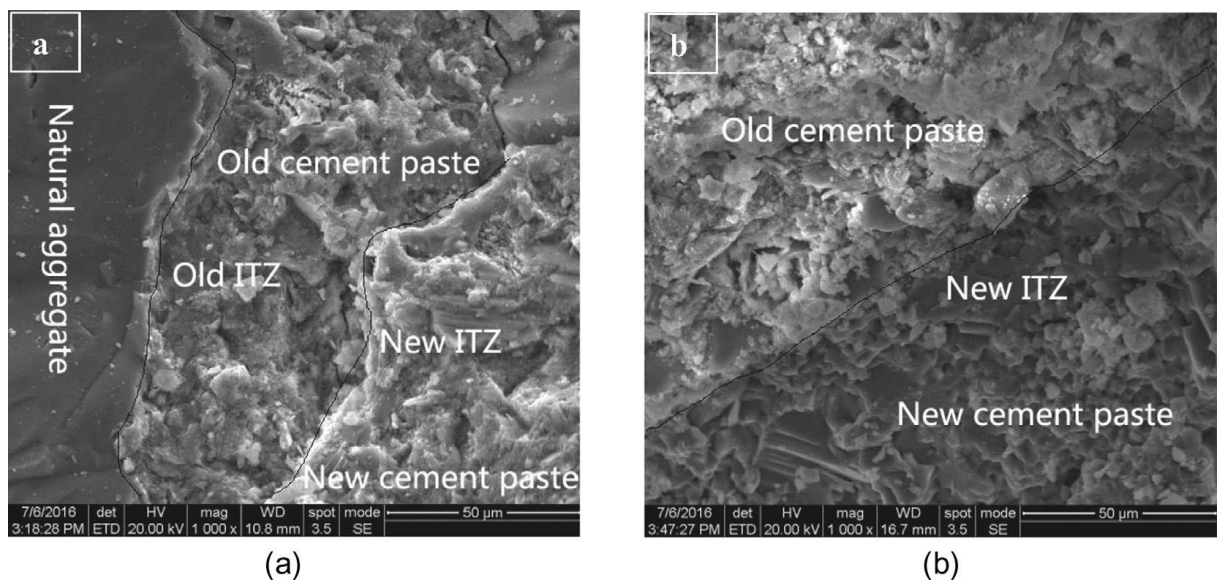


Figure 1.8. Zone de transition interfaciale entre un granulat et un ancien et nouveau mortier.

1.4.2.5. Résistance à l'abrasion

Le pourcentage de perte de masse des agrégats lors de l'essai d'impact avec des billes d'acier est mesuré par le test d'abrasion de Los Angeles (LA). De manière générale, les granulats du béton recyclés (GBR) ont des valeurs de perte de masse par abrasion LA plus élevées que les granulats naturels (GO). Les particules qui se sont fissurées lors de l'écrasement du béton parent et la présence de vieux mortier, plus faible et moins dense que le gravier d'origine, sont les raisons de cette perte plus élevée (Lahmar et al., 2020). D'après la norme ASTM C-33 (2023), spécifié pour les granulats de béton, la valeur d'abrasion Los Angeles doit être inférieure à 50 % pour les granulats destinés à la fabrication du béton et inférieur à 40 % pour ceux utilisés dans les applications routières (Ait Mohamed et al., 2016).

Les valeurs d'abrasion de Los Angeles (LA) des granulats naturels (GN) et des granulats de béton recyclés (GBR) issues de diverses études sont comparées dans le tableau 1.1. En raison du mortier résiduel, les granulats recyclés ont généralement des valeurs d'abrasion plus élevées que les granulats naturels. Par exemple, Etxeberria et al., (2007) ont rapporté des valeurs d'abrasion LA de 40 % pour la fraction 4-10 mm et de 20 % pour la fraction 4-20 mm. De même, De Juan et Gutiérrez (2009) ont démontré que la teneur en mortier adhérent est plus importante dans les granulats de petite taille (figure 1.9). Ils ont observé que 32 à 55 % de mortier était attaché dans les graviers recyclés de taille 4/8 mm, et 23 à 45 % dans ceux de taille 8/16 mm, en raison de leur rigidité réduite. La taille des particules de GBR et la résistance du béton d'origine peuvent également influencer les valeurs d'abrasion LA, comme l'ont souligné plusieurs chercheurs (Domingo-Cabo, 2009 ; Kenai et Debieb, 2011 ; Ying et al., 2020).

Tableau 1.1. Valeurs d'abrasion selon l'essai Los Angeles des granulats GBR et des GGO

Référence	Dimension (mm)	Los Angeles		Mortier attaché aux GBR
		GGO	GBR	GBR
Kazmi et al. (2020)	4-20	27	31	34
Ait Mohamed et al. (2016)	8-16	38.3	51.5	23
De Juan et Gutiérrez (2009)	4-8 8-16		37-42	32-55 23-45
Fonseca et al., (2011)	4-25.4	29.5	42.7	/
Domingo-Cabo et al., (2009)	10—20/4-20	27.8	40.22	/
Lahmar et al. (2020)	5-15	27	35	/
Etxeberria et al. (2007)	4-10 10-25			40 20
Kenai et Debieb (2011)		22-24	34-36	/

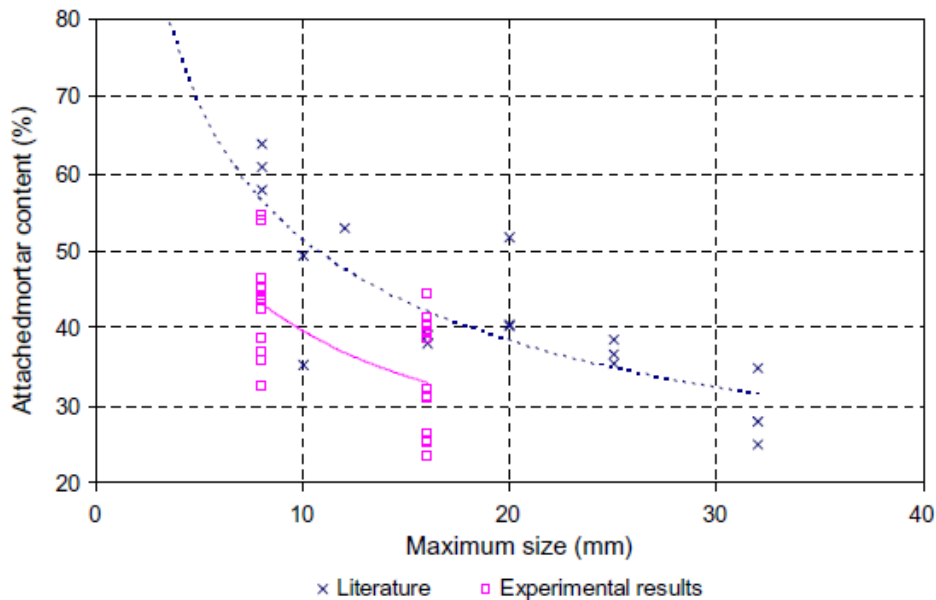


Figure 1.9. Teneur en mortier attaché et granulométrie des GBR

1.4.3. Méthodes de traitement

La quantité ou la composition du mortier qui adhère à la surface a un impact direct sur la qualité du GBR. Le nombre d'opérations de broyage sur les sites de production

détermine la quantité de mortier qui adhère. Ces opérations peuvent augmenter le coût de production, cela nécessite une optimisation pour obtenir des granulats de bon qualité à un cout raisonnable (Zaben et al., 2021). En cas de granulat traité, la teneur et la qualité du mortier attaché reste encore dépendante à la méthode utilisée.

Les méthodes de traitement du mortier attaché aux granulats de béton recyclés (GBR) visent à améliorer leur qualité pour une réutilisation optimale dans le béton. La littérature décrit des méthodes de traitement efficaces pour réduire l'impact négatif et améliorer la microstructure du gravier recyclé :

a) Traitement mécanique :

Le concassage suivi d'un tamisage permet d'éliminer une partie du mortier attaché, mais cette technique est parfois insuffisante pour une séparation complète.

b) Traitements thermiques :

b1) Thermo-mécanique chaud (TMC) : Les granulats sont chauffés à environ 600°C, ce qui fragilise le mortier, permettant son retrait par action mécanique ultérieure. Cependant, cette méthode peut endommager certains granulats, notamment ceux contenant du calcaire (De juan et Gutierrez.,2009)..

b2) Thermo-mécanique froid (TMF) : Les granulats sont exposés à de très basses températures, souvent en association avec une immersion, créant des pressions internes qui affaiblissent le mortier. Cette technique est moins agressive pour les granulats, mais son efficacité reste limitée à l'échelle industrielle.

c) Traitement chimique :

L'utilisation d'acides ou d'autres produits chimiques peut dissoudre une partie du mortier, mais cette solution présente des défis environnementaux et de sécurité (Nagataki et al., 2000, Duan et Poon, 2014).

d) Combinaisons de procédés :

Des approches combinant traitement thermique et mécanique ont montré une certaine efficacité, mais elles ne parviennent pas toujours à produire des granulats entièrement exempts de mortier, rendant leur adoption à grande échelle complexe.

Comme le montre la figure 1.10, De Juan et Gutiérrez (2009) ont comparé les résultats de trois approches de traitement différentes. Selon la technique, ils ont constaté des différences notables : de 25 à 70 % lors de l'utilisation d'une solution d'acide chlorhydrique, de 25 à 65 % lors de la production de nouveau béton et de 40 à 55 % lors du traitement thermique. Le traitement thermique a donné les résultats les plus cohérents parmi ces méthodes.

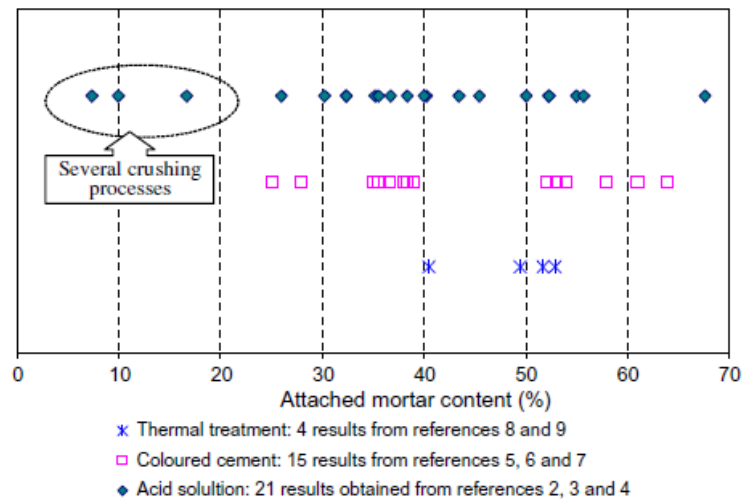


Figure 1.10. Effet de différentes méthodes de traitement sur la quantité du mortier attaché

Al-Bayati et al., (2016) ont indiqué que la combinaison d'un traitement thermique à 350 °C et d'un traitement mécanique court conduit aux meilleures performances pour améliorer les propriétés physiques, avec une absorption d'eau réduite de plus de 27 %. L'utilisation d'un traitement aux acides faibles est une méthode efficace, sûre et préférable aux acides forts.

1.5. Béton à base de granulats recyclés

Les granulats de béton recyclé se distinguent principalement des granulats naturels par le fait qu'ils sont constitués de deux matériaux distincts : le mortier attaché et le granulat naturel. Il est bien connu que les autres caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que la durabilité du béton neuf (BGR) sont influencées par la qualité et la teneur en mortier résiduel. De nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature pour améliorer la microstructure et la teneur en mortier résiduel du GBR afin qu'il soit comparable ou presque à celui du gravier naturel.

1.5.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité et les caractéristiques rhéologiques du béton peuvent être affectées par la substitution de granulats recyclés aux granulats naturels dans la composition. Cela est dû à la force de frottement entre les surfaces rugueuses des GBR et à la forte absorption du mortier collé.

Par rapport aux granulats naturels, les granulats recyclés peuvent contenir plus d'eau et présenter un degré de variabilité physique plus élevé. Pour les GBR, le contrôle de la teneur en eau effective du béton est donc une tâche difficile. Pour garantir une maniabilité appropriée, la teneur en eau du béton doit être contrôlée. De plus, l'eau absorbée par les granulats recyclés doit être prise en compte, en intégrant à la fois leur taux d'absorption et leur état de pré-saturation (Kim, 2022 ; Sasanipoor et Aslani, 2020 ; Mistri et al., 2020).

L'intégration de granulats recyclés secs dans la préparation des bétons agit comme une éponge durant les 30 premières minutes. Par la suite, une portion de l'eau absorbée est libérée dans le béton. Pour atteindre une ouvrabilité comparable à celle du béton ordinaire, le béton contenant des granulats recyclés (GBR) requiert environ 5 % à 15 % d'eau en plus dans le mélange lorsqu'ils sont utilisés à l'état sec (Omary et al., 2016 ; Le et Bui, 2020).

Par rapport au béton fabriqué à partir de granulats ordinaires, la densité à l'état frais du béton fabriqué à partir de granulats recyclés diminue à mesure que le taux de remplacement augmente. Cela est dû au fait que les granulats recyclés constituent une grande partie du mortier total du béton (Tam et al., 2021). Des chercheurs ont proposé des méthodes efficaces de traitement pour minimiser l'effet de forte absorption d'eau du GBR (Mistri et al., 2020 ; Upshaw et Cai, 2020).

1.5.2. Rhéologie

En 1928, Eugene Bingham a proposé les premières notions de la rhéologie pour désigner *la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière*. Cette science s'intéresse au comportement mécanique des matériaux dans sa phase de l'écoulement. Elle met en jeu la relation entre les déformations et les contraintes de la matière (Bounedjma et al., 2016).

La rhéologie du béton a fait l'objet de nombreuses études, et la littérature montre que le béton ordinaire, présentant une ouvrabilité supérieure à 8 cm sans subir de ségrégation

sous l'effet de la gravité, peut être assimilé à un fluide de Bingham (Safiddine et al., 2021). Ainsi, l'écoulement d'un matériau granulaire comme le béton frais peut être décrit comme celui d'un fluide (figure 1.11), nécessitant au moins deux paramètres pour sa caractérisation ; la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique (Ait Mohamed et al., 2016).

A l'état frais, le BGR est considéré comme un fluide non newtonien dont le comportement peut être modélisé par le modèle de Bingham. Nous déterminons les paramètres rhéologiques de ce BGR, qui sont décrits par le seuil de cisaillement, en établissant une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ).

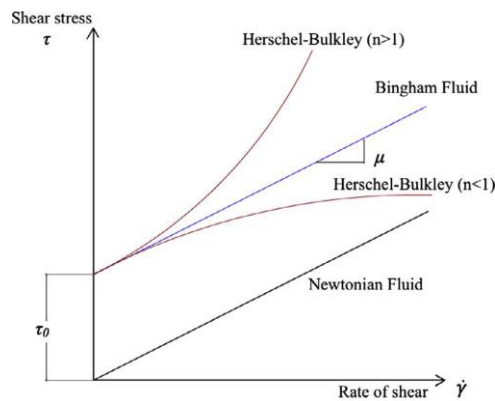


Figure 1.11. Courbe d'écoulement des fluides Binghamiens.

1.5.3. Résistance à la compression

Étant donné que les granulats recyclés ont une porosité plus élevée que les granulats ordinaires, le béton contenant des granulats recyclés présente souvent une résistance à la compression légèrement inférieure (Sasanipoor et Aslani, 2020 ; Kim, 2022). Cette baisse de résistance est dépendante de la teneur en granulats recyclés dans le béton ainsi que de leur qualité (Yuan et al., 2022 ; Bhat, 2021). Le béton contenant des GBR, à l'état durci, présente des propriétés spécifiques influencées par la nature des granulats recyclés utilisés, le rapport eau/ciment ainsi que certains adjuvants pour améliorer ses propriétés.

Plusieurs études ont montré que, par rapport aux bétons fabriqués à partir de granulats naturels, la résistance à la compression des bétons contenant des granulats recyclés diminue de 5 à 40 %. Cependant, certaines recherches ont montré que, notamment à long terme, la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés (GBR) est soit inchangée, soit légèrement supérieure à celle des bétons à granulats naturels (BGN) (Gesoglo et al., 2015 ; Kurda et al., 2018). Ce comportement peut s'expliquer en grande

partie par un bon contrôle de la qualité des granulats recyclés. Poon et al. (2004) constatent que la résistance à la compression de BGR est influencée légèrement par les GBR, et les résultats sont comparables à celles d'un béton ordinaire.

En se basant sur les travaux de Wagih et al., (2013), la baisse de résistance entre un béton avec des GBR et un autre sans GBR reste dépendante du rapport eau/ciment, de l'humidité des granulats ainsi que du taux granulats substitués. D'après une étude menée par Lahmar et al., (2020), une évidence de l'effet de remplacement des GGN par les GBR dans le béton est illustrée sur la figure 1.12. Cette dernière montre que l'augmentation du taux de GBR diminue légèrement la résistance à la compression du béton à long terme.

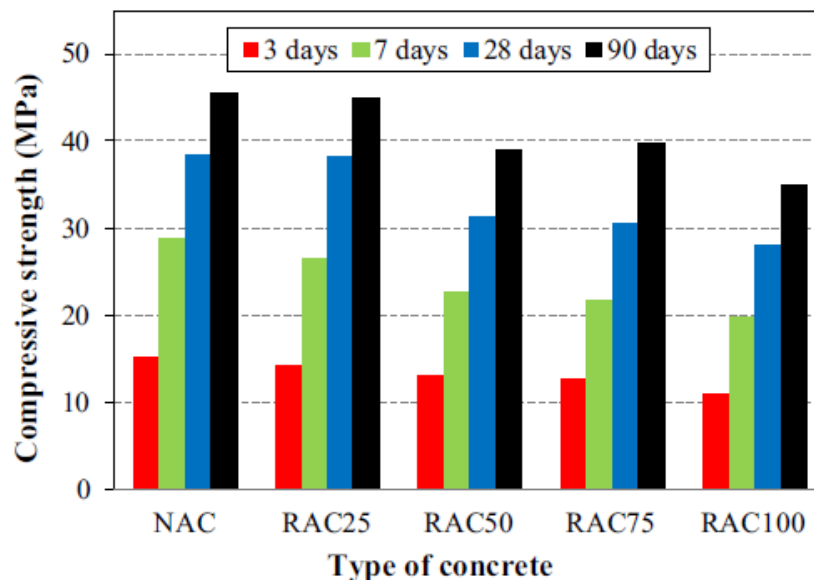


Figure 1.12. Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de la teneur en GBR.

1.5.4. Résistance à la flexion

Les recherches sur la résistance à la traction des bétons contenant du GBR donnent des résultats quelque peu différents. Bien que toutes s'accordent sur une diminution de la résistance pour le béton BGR par rapport au béton conventionnel, certaines affirment une réduction de 15 à 20 % lorsque le taux de remplacement atteint 100% (Ait Mohamed et al., 2016), tandis que d'autres observent une perte inférieure à 30% (Lahmar et al., 2020). Les travaux menés par Prasad et al., (2021) et illustrés sur la figure 1.13 montre une chute linéaire avec le taux de gravier substitué que ce soit à 7 ou à 28 jours. En outre, tout comme pour la résistance à la compression, il a été observé qu'à des âges tardifs le béton

BGR devient plus performant. Par ailleurs, il a été démontré que l'ajout de certains matériaux, comme la fumée de silice, améliore les performances du BGR.

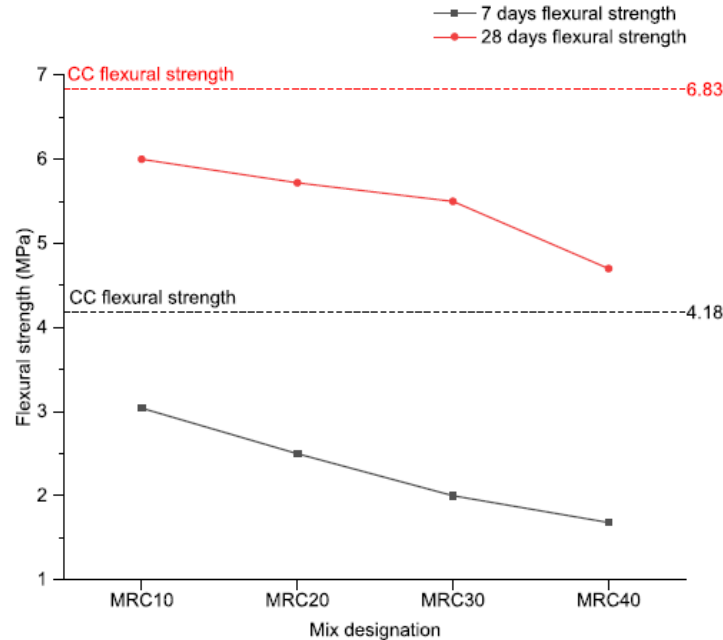


Figure 1.13. Résultats de l'effet de la teneur en GBR sur la résistance à la flexion

1.5.5. Retrait

Le mouvement de l'eau lors de l'hydratation et la dessiccation du béton entraîne une variation de volume appelé retrait. Ce phénomène se traduit par des fissures et des microfissures dans le béton, ce qui affecte négativement la durabilité du béton. Le retrait du béton se compose principalement d'un retrait endogène lié à la consommation d'eau par l'hydratation du ciment et d'un retrait exogène lié aux échanges hydriques avec le milieu extérieur (Wang et al., 2020).

Le béton avec des granulats recyclés possède un retrait du séchage nettement élevé par rapport à celui du béton avec des granulats naturels. Cet écart est causé par la porosité élevée du mortier adhérent dans les GBR (He et al., 2020; Kapoor et al., 2020 ; Wang et al., 2021). Wang et al., (2020) ont confirmé que le retrait de dessiccation du béton augmente avec la teneur en GBR où de nombreux chercheurs ont tenté de le quantifier. Domingo-Cabo et al., (2009) ont étudié l'effet d'incorporer les GBR dans le béton et ils ont observé que les résultats du retrait de séchage illustrés sur la figure 1.14 augmentent de 12% et 70% lorsque 50% et 100% de granulats sont remplacés par des GBR.

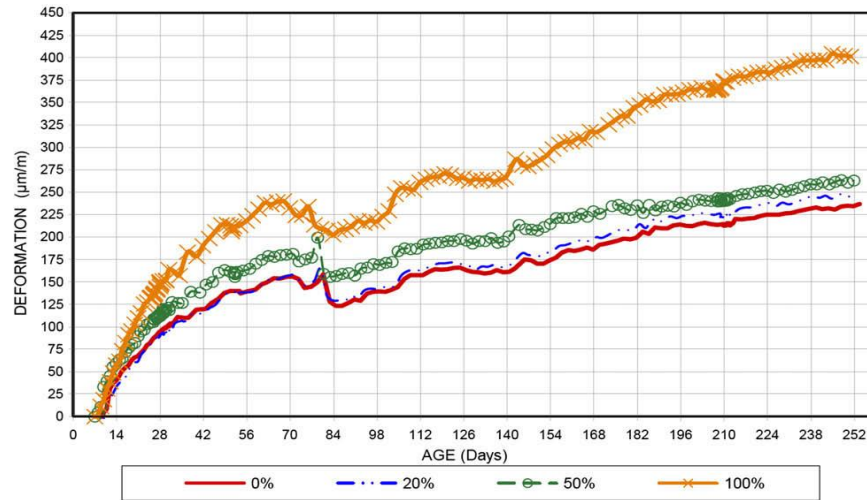


Figure 1.14. Résultats des retraits de différents bétons formulés avec des GBR.

Kenai et Debieb (2011) ont constaté que les bétons BGR se rétractaient considérablement plus lorsqu'ils séchaient à l'air que les bétons fabriqués avec des granulats naturels, comme le montrent les résultats présentés à la figure 1.15. La forte porosité des granulats recyclés et le taux d'absorption d'eau élevé du mortier utilisé pour les recouvrir dans le vieux béton sont les principales caractéristiques qui définissent cette différence. De plus, ils ont observé que bien que ce retrait cumulé ait initialement un degré d'intensité limité, il devient éventuellement important. Le fait que les granulats recyclés soient pré-saturés avant le mélange du béton contribue à expliquer cette caractéristique. De plus, les bétons recyclés montrent des valeurs de retrait plus inférieures, lorsqu'un adjuvant superplastifiant est ajouté.

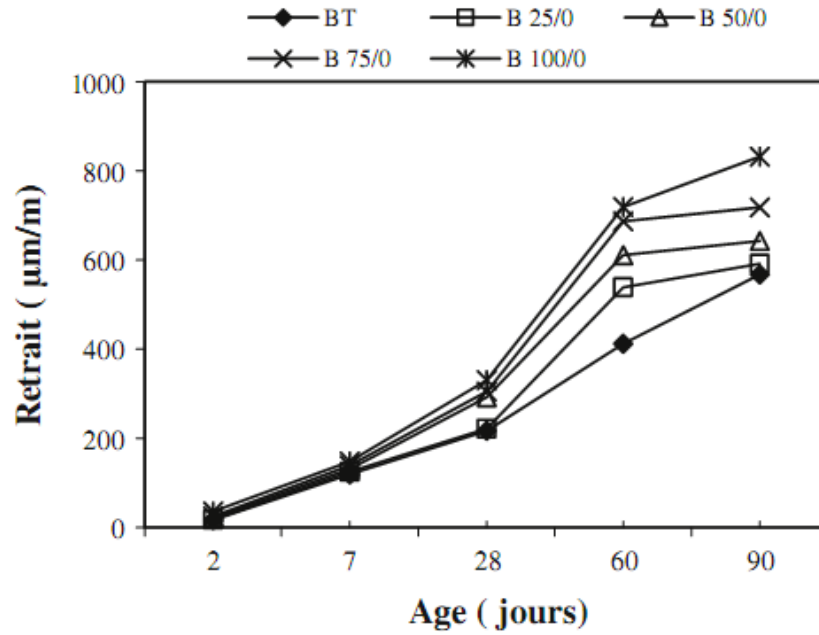


Figure 1.15 Evolution du retrait lors de la dessiccation des bétons avec des GBR.

1.5.6. Zone d'interface de transition

Les performances du béton sont en grande partie déterminées par les caractéristiques des agrégats qui le composent. La microstructure du béton affecte ses performances (Upshaw et Cai, 2020 ; Bai et al., 2020). Sur la figure 1.16, un granulat recyclé est composé de granulats naturel et de vieux mortier adhérent (Pedro et al., 2018), le GBR a donc trois ITZ :

- a- ITZ entre le GN et le vieux mortier (ancienne ITZ),
- b- ITZ entre le GN et le nouveau mortier (nouvelle ITZ),
- c- ITZ entre le nouveau mortier et le vieux mortier (nouvelle ITZ).

La liaison entre la surface d'un granulat et la pâte de ciment est représentée par la zone d'interface de transition (Lee et Bui, 2020). Un gradient de porosité croissant vers la surface des granulats caractérise cette zone.

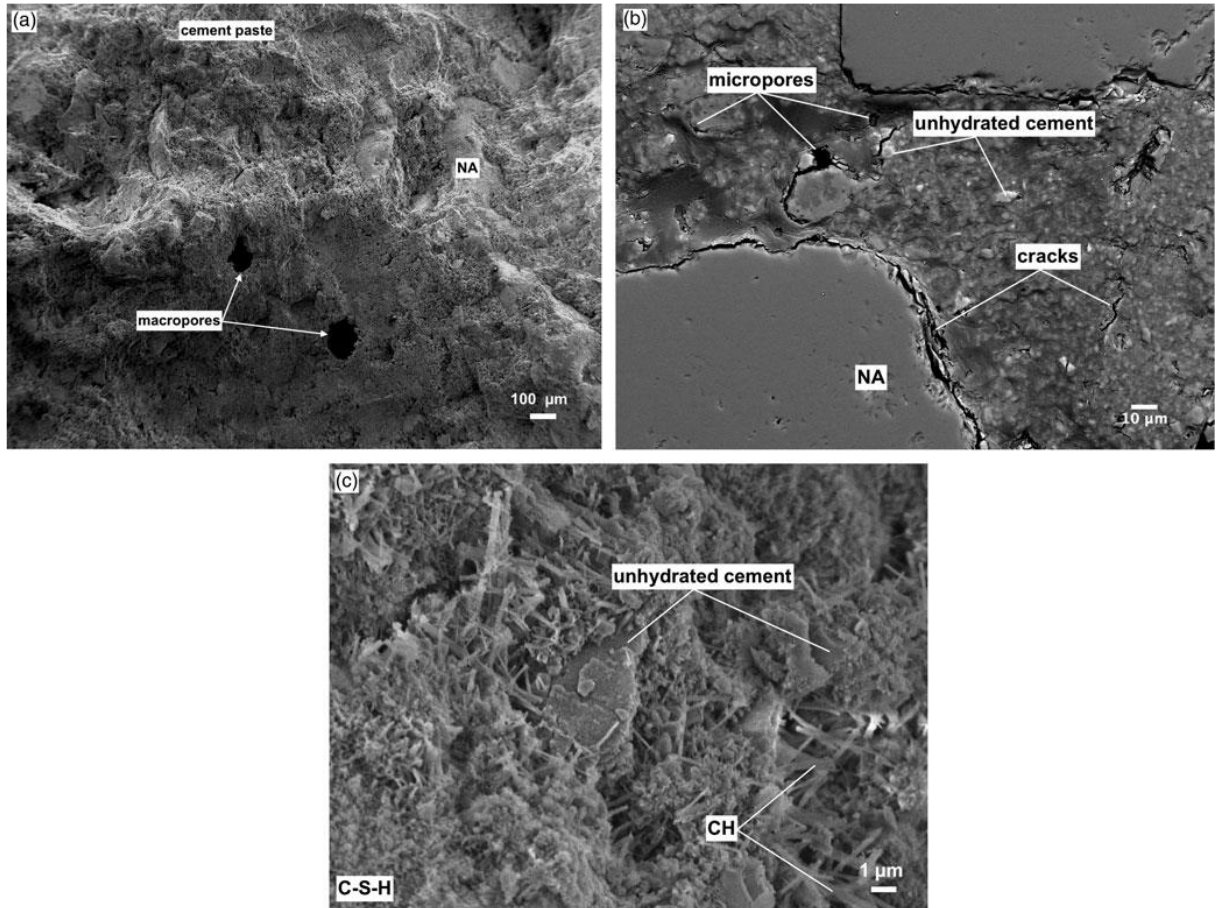


Figure 1.16. Image MEB montrant les zones de transition interfaciale d'un granulat recyclé (Pedro et al., 2018)

1.6. Conclusion

Une étape importante pour rendre la construction en béton plus durable est le recyclage des déchets de construction sous forme de granulats. Les préoccupations environnementales concernant l'industrie de la construction et de la démolition en béton étant de plus en plus largement reconnues, la recherche dans ce domaine reste importante. Cependant, afin de récolter les avantages pratiques de la réutilisation des déchets de construction et de démolition dans le béton, une méthodologie bien définie est nécessaire. Cette étude a passé en revue les problèmes qui ont été identifiés jusqu'à présent, notamment la présence de microfissures, une absorption d'eau élevée et une faible zone de transition interfaciale lors de l'utilisation de déchets de construction et de démolition comme granulats recyclés.

Chapitre 02 :

*Utilisation des granulats fins recyclés
pour la confection du béton*

2.1. Introduction

L'urbanisation rapide et la croissance démographique ont augmenté la demande de nouveaux logements, d'aménagements urbains et d'infrastructures. La politique des gouvernements se dirige vers une utilisation de matériaux recyclés plutôt que de ressources naturelles. La gestion des déchets est souvent une contrainte (Wang et al. 2020). L'aspect positif, en revanche, envisage ces déchets comme des ressources réutilisables plutôt que des décharges en fin de vie. Au contraire, ils constituent une ressource inépuisable de matières premières pour divers usages et produits.

Le recyclage des déchets de construction présente un grand intérêt comparé à l'exploitation des ressources naturelles non renouvelables, car il contribue à la protection de l'environnement tout en favorisant la création de nouvelles matières premières. L'un des enjeux majeurs actuels est l'utilisation de ces déchets, notamment ceux issus du broyage de béton ancien, comme matières premières pour confectionner de de nouveau béton (Tam et al., 2018). En plus, la production des granulats dans les carrières engendrent de grandes quantités de déchets sous forme de sable et de poudre fine ne sont d'aucune attraction dans le domaine de la construction.

2.2. Granulats fins recyclés

2.2.1. Granulat fin recyclé

Parmi l'ensemble des matériaux de construction, le béton occupe près de 75% en poids. Donc, la plus grande partie de déchets issus du domaine de la construction est composé de béton. À cela s'ajoutent les débris résultant de catastrophes naturelles et de conflits militaires. Le concassage répété de blocs de béton produit des agrégats fins de béton recyclé (GFBR) ayant un diamètre inférieur à 4 mm. Les GFBR sont actuellement utilisés dans des applications de faible qualité comme matériau de substitution au sable naturel dans les enduits cimentaires et les mortiers de maçonnerie (Soni et Shukla, 2021). On les trouve dans les constructions routières et comme matériau de remplissage pour les structures renforcées par géo-synthétiques ainsi que dans la stabilisation des sols (Nedeljković et al., 2021).

De nos jours, les producteurs de granulats GBR suivent une politique stricte lors du choix des matériaux de démolition, qui sont divisés en plusieurs catégories différentes en

fonction de leur composition, déchets de béton produits pendant les étapes de production, telles que le transport de béton frais, les lots inutilisés ou le nettoyage des installations, matériaux constitués de gravier, de blocs de roche, de briques, de tuiles et d'autres matériaux ; et matériaux hétérogènes contenant de petites quantités de bois, de plastique ou de plâtre. Selon les normes techniques et environnementales, cette classification permet une gestion précise des matériaux et un recyclage approprié.

Le sable recyclé (RFA), obtenu par le recyclage des déchets de construction ou de déconstruction, peut avoir des caractéristiques différentes à celles d'un sable naturel. Cette différence reste liée à la qualité du béton parent et des techniques utilisées pour le concassage. La figure 2.1 montre une différence entre un granulat naturel (NFA) et un autre recyclé (RFA).

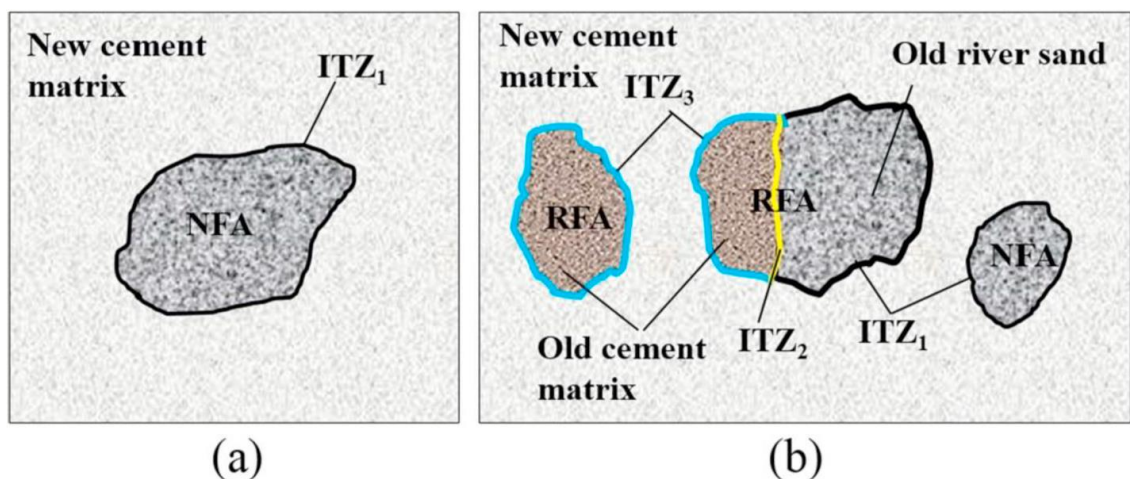


Figure 2.1. Identification de différentes zones d'interface d'un granulat fin naturel (NFA) et d'un granulat fin recyclé (RFA) (Nedeljković et al., 2021).

2.2.2.1. Granulométrie

La granulométrie du sable recyclé est souvent plus irrégulière que celle du sable naturel. Il peut contenir des grains anguleux ou arrondis, en fonction des matériaux recyclés (figure 2.2). La distribution des tailles de grains peut varier en fonction du procédé de concassage et de criblage. (Nedeljković et al., 2021) ont confirmé que le sable recyclé contient une grande teneur en fine et approuvé que la granulométrie dépend du nombre du processus de concassage.

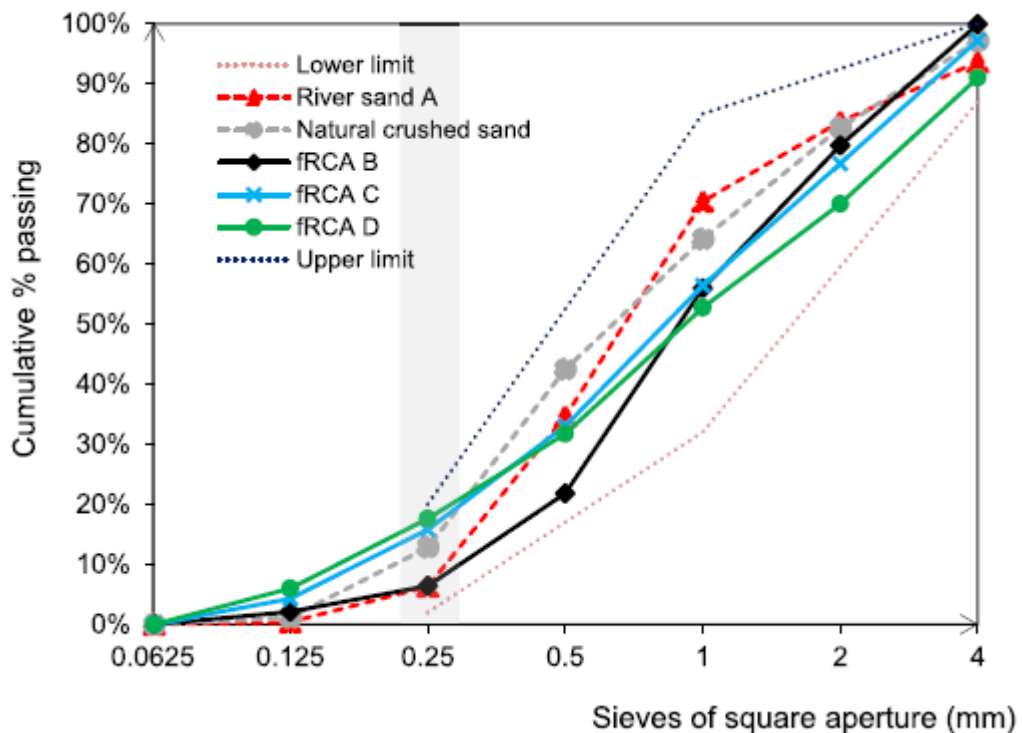


Figure 2.2. Distribution granulométrique des granulats fins naturel, concassé et recyclés (Nedeljković et al., 2021).

2.2.2.2. Densité

La densité apparente est généralement inférieure à celle du sable naturel, en raison de la présence de particules poreuses issues, par exemple, du béton ou des briques (Xiao et al., 2022). La densité réelle peut varier entre 2,2 et 2,6 g/cm³ selon les matériaux sources.

De plus, le sable recyclé a une densité inférieure à celle du sable naturel. Les densités sèches à surface saturée obtenues pour le sable recyclé étaient comprises entre 1630 et 2560 kg/m³.

2.2.2.3. Absorption d'eau

Le sable recyclé se caractérise par une absorption d'eau beaucoup plus importante que celle d'un sable naturel. Cela est due à la nature poreuse de granulats (Nedeljkovic et al 2021), cette valeur se situe entre 4 et 12 % et dépend de sa granulométrie donc des particules plus fines. Nedeljković et al.,(2021) ont montré dans une étude expérimentale, que les valeurs d'absorption rapportées pour le sable recyclé varient entre 4,28 et 13,1 %, avec une moyenne de 8,4 %. La dispersion des valeurs de l'absorption d'eau et de la densité entre différentes études est due aux variations de la qualité du béton parent, qui est souvent méconnue (quantité de ciment, rapport eau sur ciment, propriétés des granulats, etc.), ainsi qu'à la différenciation de ses propriétés au cours de sa durée d'exécution.

2.2.2. Granulat fin artificiel

2.2.2.1. Laitier de hauts fourneaux

Lorsqu'on fait entrer le minerai de fer dans un haut fourneau, on obtient la fonte et un résidu appelé laitier. Ce laitier peut être refroidi de deux manières différentes : soit lentement à l'air libre, ce qui produit un matériau cristallin et compact appelé « laitier rocheux », soit rapidement par pulvérisation d'eau, ce qui génère un matériau léger et vitreux connu sous le nom de « laitier granulé ».

Lorsque le laitier est refroidi à l'air libre, il s'accommode comme granulat pour le béton. Grâce à sa stabilité volumique, sa capacité à résister à la corrosion par les solutions de chlorure et sa résistance aux sulfates, le béton armé à base de laitier est idéal pour de nombreuses applications.

2.2.2.2. Laitier d'acier

A partir de l'affinage de la fonte brute, un laitier d'aciérie est obtenu après l'élimination des impuretés. Ce laitier est riche en calcium ou en phosphates et contient également des silicates bi-calciques métastables. Ceci limite son utilisation principale au remblayage des routes. Généralement, ce laitier est stocké en tas pendant une période pouvant aller jusqu'à un an avant son emploi. A cause des problèmes de sa stabilité dimensionnelle, son utilisation reste relativement limitée. Des techniques de maturation et de vieillissement ont été développées pour contrôler cette instabilité, et des initiatives visent à valoriser ce matériau, notamment dans le domaine du génie civil. Cependant, les risques environnementaux liés à l'utilisation de ces laitiers dans certaines applications restent encore mal connus.

2.2.2.3. Sous-produits résultant des centrales thermiques

Les sous-produits de la combustion de la houille sont appelés « mâchefer » dans les centrales électriques conventionnelles. Les centrales électriques modernes, en revanche, brûlent du charbon pour produire de la vapeur, qui produit de minuscules particules fines qui sont capturées par précipitation électrostatique et emportées par les gaz de combustion. Le terme « cendres volantes » fait référence à ces particules. Les scories se forment lorsque certaines particules de cendres s'accumulent au fond du four. De plus, les fours à haute température produisent également des résidus fondus appelés scories de charbon.

2.2.2.4. Mâchefer

Le mâchefer est un résidu issu de l'incinération des ordures ménagères qui se forme au fond du four et composé principalement de matériaux non combustibles. Il contient une proportion importante de charbon non brûlé ainsi que diverses impuretés. Ce matériau est principalement utilisé pour la fabrication de blocs en béton. Cependant, à cause de sa teneur en sulfates et de chlorures, il n'est pas adapté à la fabrication de béton armé. La disponibilité du mâchefer pourrait diminuer à l'avenir, car les centrales électriques traditionnelles adoptent de plus en plus la combustion du charbon pulvérisé.

Les mâchefers sont humides et contiennent des matières grossières comme du verre, de la ferraille, etc. lorsqu'elles sortent du four.

Les catégories suivantes peuvent être appliquées aux cendres de fond en fonction de leurs propriétés physico-chimiques et elles sont classées comme suit :

- a) Ayant une faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans les solvants) ;
- b) Ayant une fraction lixiviable intermédiaire ;
- c) Ayant une fraction lixiviable élevée.



Figure 2.3. Mur construit en Mâchefer

2.2.2.5. Scories

Les scories, riches en silicates et en oxydes métalliques, sont des sous-produits de la métallurgie. En raison de leur teneur en oxydes, certaines scories sont recyclées, tandis que d'autres sont utilisées pour fabriquer du ciment, des matériaux isolants, des revêtements routiers ou même comme engrais. Environ 2,5 % de la quantité totale de cendres produites est constituée de ces déchets. La production de cendres devrait augmenter parallèlement à l'utilisation cumulative du charbon. Les scories de combustion américaines ont une

composition chimique similaire à celle des cendres volantes, à l'exception d'une teneur plus élevée en alcalis et en sulfates. De plus, les scories de charbon peuvent être recyclées en granulats légers.

2.2.2.6. Cendres volantes

Lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques, les gaz de combustion transportent une fine particule ininflammable appelée cendre volante. Bien qu'il s'agisse d'un excellent granulats léger, ses applications restent limitées. Il est toutefois supérieur à de nombreux autres granulats légers. En fait, la chaleur nécessaire pour sécher les granulés et élever leur température pour le frittage est produite par le carbone qu'ils contiennent. Le type de charbon utilisé lors de la combustion et la quantité de CaO dans les cendres déterminent sa classification.

2.2.2.7. Sables de fonderies

L'industrie de la fonderie génère une quantité appréciable de sable de fonderie. Ce résidu est créé pendant le moulage des pièces métalliques. Pour cette opération, on utilise souvent du sable fin composé principalement de silice, fréquemment combiné avec des substances telles que l'argile ou des liants organiques (par exemple, des résines phénoliques). Lorsque ce sable n'est plus réutilisable dans le cadre de la fonderie, il est généralement envoyé en décharge. Cependant, ces sables de fonderie peuvent représenter une matière première peu coûteuse pour la production de bétons hydrauliques.

L'arrêté ministériel du 16 juillet 1991 fixe les règles relatives à la réutilisation de ces sables en France. Il vise à donner des indications précises sur la manipulation des sables de fonderie contenant des liants organiques artificiels. Il propose, entre autres, de les utiliser pour fabriquer des produits à base de liants hydrauliques, à condition que la teneur en phénol du sable ne dépasse pas 5 mg/kg. La matière sèche augmente ce taux.

2.2.2.8. Sable de déchets de carrière

Le sable de carrière, également appelé sable de concassage, résulte du concassage des roches telles que le calcaire, l'andésite, le granite, la dolomie et le basalte. Ses particules ont des dimensions comprises entre 0 et 6 mm. En raison du procédé de concassage (figure 2.4), ce sable se différencie des sables naturels par sa forme, la texture

de ses grains et sa granulométrie. De plus, il renferme souvent une proportion de fines comprise entre 10% et 20% (Menadi et al., 2009 ; Bounedjema et al., 2017).



Figure 2.4. Procédés de fabrication du sable concassé dans une carrière.

2.3. Production du sable de concassage en Algérie

Le sable naturel, fréquemment utilisé dans la production de béton, de mortiers et d'autres matériaux de construction, peut être remplacé par du sable concassé.

Alternative au sable naturel, le sable concassé est particulièrement utile dans les mortiers, le béton et d'autres matériaux de construction (béton armé, béton prêt à l'emploi, etc.). Et aussi dans les revêtements routiers. L'exploitation des carrières est encadrée par des lois environnementales et minières en Algérie. Les promoteurs de la construction sont tenus d'obtenir des autorisations et de se conformer aux réglementations environnementales en vigueur.

L'utilisation des sables issus des déchets de carrière dans les projets de construction peut significativement réduire l'empreinte écologique de l'industrie des granulats. Toutefois, cela nécessite des investissements dans des technologies propres et une gestion rigoureuse des impacts environnementaux pour garantir la durabilité de cette pratique.

En 2005, l'Algérie a mis en place une instruction ministérielle (Loi N° 05-12, 2005) visant à promouvoir progressivement l'utilisation des sables de concassage dans le secteur

du bâtiment (figure 2.5), tout en définissant les spécifications techniques requises pour ces matériaux (Bilan DGM, 2010).

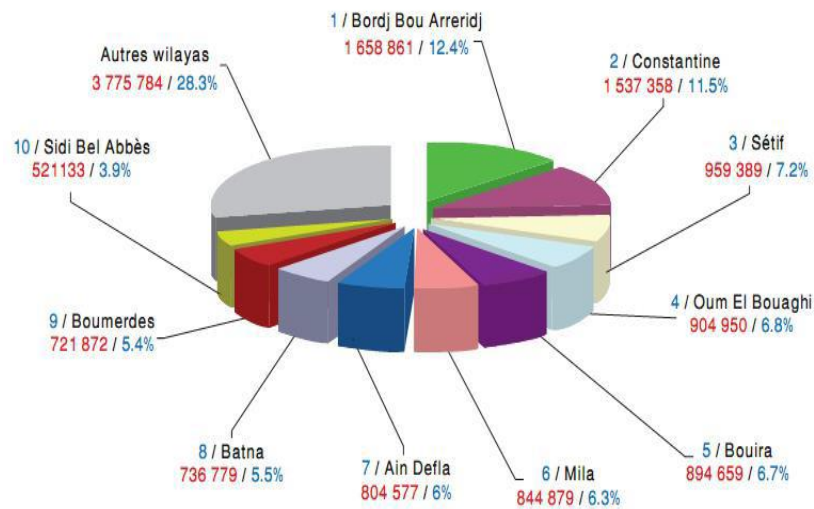


Figure 2.5. Production du sable de carrière en m^3 (les 10 sites les grands producteurs), (Bilan DGM, 2010).

2.3. Spécifications pour l'utilisation du sable concassé

Étant donné que le sable concassé est facilement disponible dans les carrières de gravier, son utilisation pourrait réduire considérablement le coût de production du béton tout en protégeant l'environnement en réduisant le besoin d'extraire des sables naturels.

Dans de nombreux pays à travers le monde, le sable concassé de bonne qualité n'est pas économiquement accessible pour plusieurs applications. Des spécifications et réglementations encadrent la teneur en fillers calcaires dans ce type de sable. En Chine, la norme 14684 de 2001 fixe des limites pour la teneur en fines acceptables : 3 %, 5 % et 7 % pour les ciments utilisés respectivement dans les classes de résistance 30 MPA, entre 30 et 60 MPA, et 60 MPA (Meziane et al., 2015). Les normes britanniques BS 882 autorisent une teneur en fines allant jusqu'à 15 % dans le sable concassé, tandis que la norme américaine ASTM C 33 (2023) et la norme japonaise JSI A 0015 (2002) fixent des limites plus strictes, ne dépassant pas respectivement 5 % et 7 %.

2.4. Caractéristique physico-mécaniques du sable concassé

Le sable concassé, produit par le broyage de roches ou de déchets de construction, possède des propriétés distinctes qui le différencient du sable naturel. Une distribution granulométrique plus irrégulière que celle du sable naturel, avec une teneur en fines (<

0,063 mm) entre 10 et 20% (figure 2.5). La forme angulaire et la texture plus rugueuse du sable concassé confère une meilleure adhérence et augmentent l'interaction entre la matrice cimentaire et la résistance mécanique.

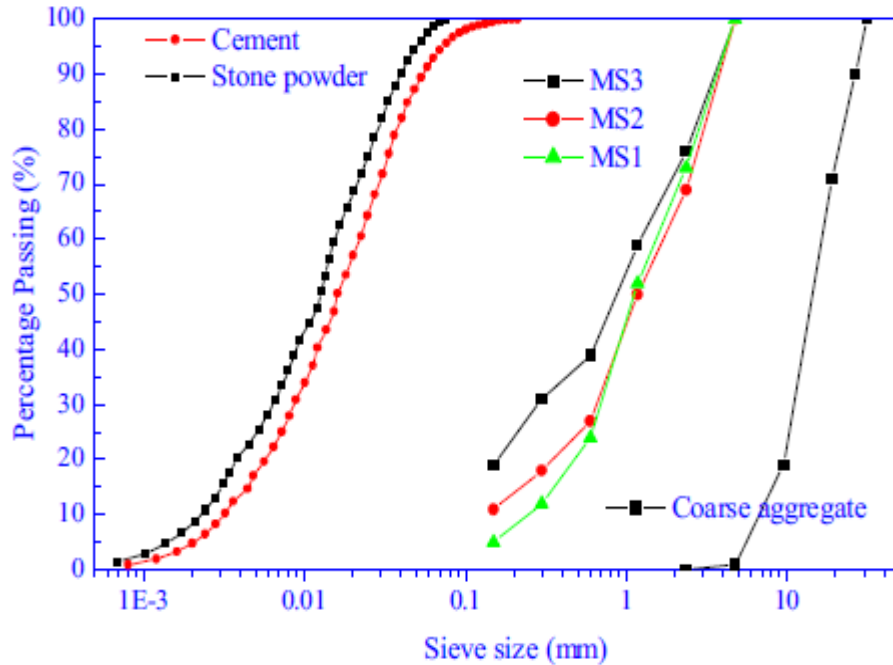


Figure 2.6. Granulométrie des fines calcaire, granulats fins et gros granulat (Ding et al., 2016).

La densité du sable concassé est similaire à celle des granulats naturels. Selon le tableau 2.1, sa masse volumique varie entre 2600 et 2800 kg/m^3 (Bounedjema et al., 2017).

Tableau 2.1. Quelques propriétés physiques du sables de déchets de carrière (Ding et al., 2016).

Sable concassé	SC1	SC2	SC3
Fines calcaire %	5	9	13
Densité kg/m^3	2720	2750	2760
Densité apparente kg/m^3	1550	1610	1610
Absorption %	0.7	0.8	1.0
Module de finesse	3.34	3.27	2.77

Les caractéristiques intrinsèques du sable de concassé sont étroitement liées à la nature de la roche source et aux procédés de production (tableau 2.2). Ces propriétés influencent directement son comportement dans les mélanges de construction, notamment le béton et les mortiers (Menadi et al., 2009 ; Wang et al., 2018)

Tableau 2.2. Eléments chimiques composant le sable de déchets de carrière (Kumar, 2021).

Composition	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5
W %	13.46	71	3.40	2.16	0.62	2.46	5.24	0.05	0.26	0.61

2.5. Influence de sable de carrière sur les propriétés du béton

2.5.1. Ouvrabilité

L'un des défis majeurs associés à l'utilisation du sable de concassage dans les mélanges de mortier et de béton réside dans le besoin accru en eau de gâchage pour obtenir une ouvrabilité adéquate. Cela est dû à la présence d'une teneur élevée en filler (Ltifi et Zafar, 2022).

Lohani et al. (2012) ont examiné l'impact du sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton en substituant le sable naturel par du sable concassé à des taux de 20 %, 30%, 40% et 50%. Ils ont constaté que les fines calcaires du sable concassé améliorent progressivement l'ouvrabilité du béton (figure 2.7).

Benabed et al. (2012) ont constaté que l'ajout de 10 % à 15 % de fines calcaires dans le mélange de mortier améliore significativement son ouvrabilité (figure 2.8). Cependant, lorsque le taux dépasse 15 %, on obtient un mortier avec un étalement plus faible et un temps d'écoulement plus allongé.

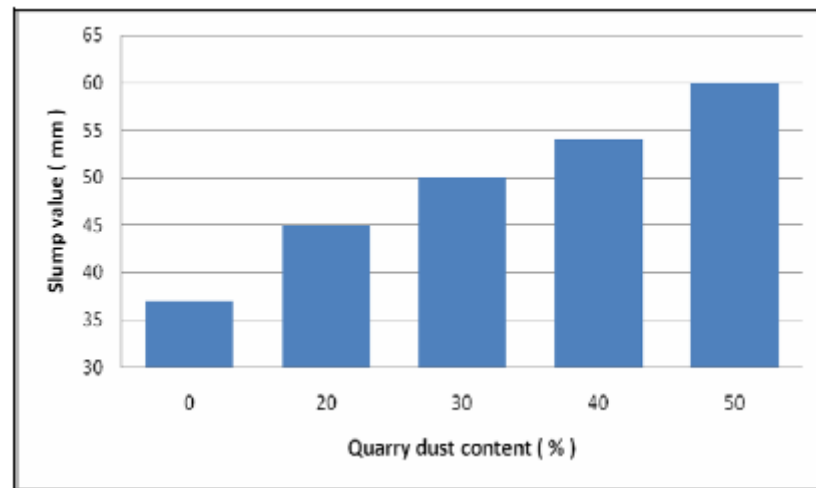


Figure 2.7. Effet du taux de sable de carrière sur l'affaissement du béton (Lohani et al., 2012).

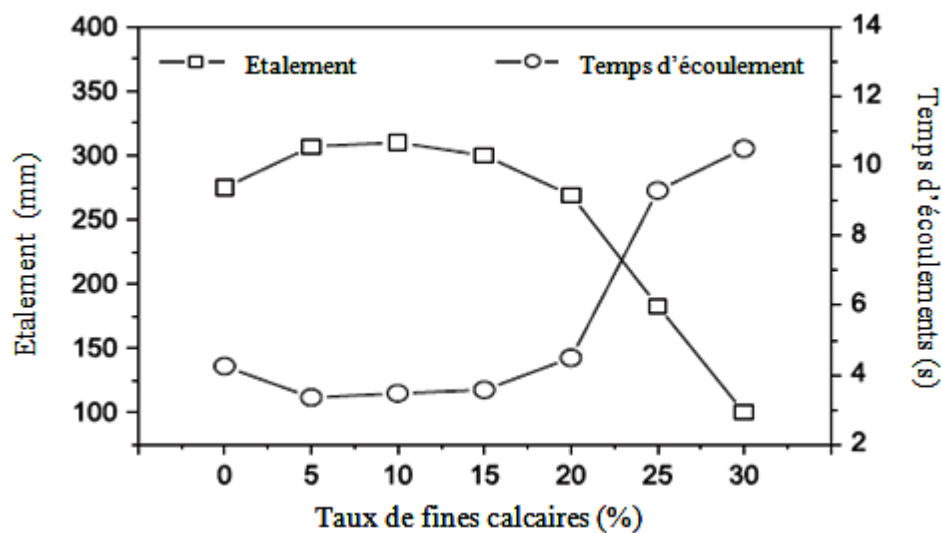


Figure 2.8. Étalement et temps d'écoulement des mortiers contenant différents taux de fines calcaires (Bounedjema et al., 2017).

2.5.2. Paramètres rhéologiques

Le sable de concassage peut avoir une granulométrie adaptée pour assurer la continuité granulaire du mélange de béton. Une bonne gradation des particules permet une meilleure compacité et réduit les vides, ce qui facilite l'écoulement et l'application au béton.

Les fines des calcaires issues du sable de concassage jouent un rôle significatif dans l'amélioration de la rhéologie du béton. Ces particules fines agissent comme un lubrifiant entre les grains plus gros. Cela réduit les frictions internes et facilite l'écoulement du béton frais (Menadi et al., 2009 ; Li. et al., 2018).

Plusieurs études (Wang et al., 2018 ; Ltfi et Zafar, 2022) ont démontré qu'une portion de 10 à 20 % de fines dans le sable concassé améliore significativement la fluidité du mortier tout en réduisant son seuil de cisaillement. Il est généralement reconnu que le béton frais et le mortier de ciment peuvent être décrits avec une bonne précision par le modèle de fluide de Bingham exprimé par l'équation 2.1 (Coussot, 1993). Cependant, ce modèle s'avère inadapté aux mélanges à haute maniabilité (figure 2.8), tels que les bétons autoplaçants (BAP) ou les coulis de ciment. Dans ces cas, la réduction de la limite d'élasticité peut devenir si significative qu'elle tend vers zéro, rendant la limite d'élasticité extrapolée du modèle de Bingham négative, ce qui est physiquement incohérent. Pour pallier cette limitation, deux modèles ont été proposés : le modèle de Herschel-Bulkley donné par l'équation 2.2 (Mardani Aghabaglou et al., 2021) et le modèle de Bingham modifié donné par l'équation 2.3 (Pilehvar et al., 2020).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2 \quad (2.3)$$

Avec :

K : facteur de cohérence (Pa sn) .

n : indice d'écoulement.

τ : contrainte de cisaillement appliquée au matériau.

τ_0 : limite d'élasticité.

μ : viscosité plastique

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement (s⁻¹).

Pour le modèle Herschel-Bulkley, lorsque $n < 1$, il s'agit d'un comportement d'amincissement par cisaillement et lorsque $n > 1$, l'équation signifie un comportement d'épaississement par cisaillement, tandis que pour $n = 1$, il s'agit d'un comportement de Bingham. Ces comportements sont illustrés dans la figure 2.9.

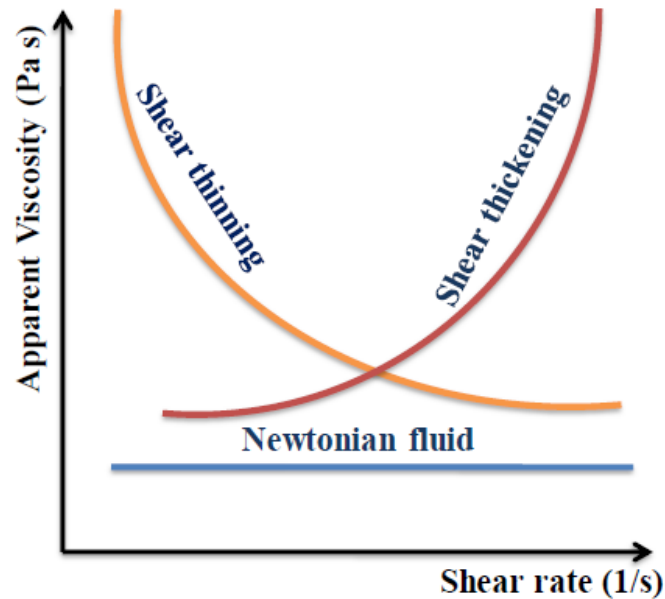


Figure 2.9. Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement (Safiddine et al., 2021)

2.5.3. Résistance à la compression

De nombreuses études (Safiddine et al., 2021, Menadi et al., 2020, Ltifi et Zafar, 2022) ont souligné l'effet significatif du sable concassé sur la résistance à la compression du béton et du mortier. Selon certains travaux de (Benabed et al., 2012), la résistance à la compression du mortier à 28 jours atteint un maximum lorsque les mélanges contiennent entre 10% et 15% de fines calcaires. Au-delà de cette proportion, la résistance diminue progressivement.

Ding et al. (2016) ont étudié l'impact des fines de calcaire dans le sable concassé sur la résistance à la compression du béton en utilisant trois types différents de sable contenant 5 %, 9 % et 13 % de fines. Ils sont arrivés à la conclusion que le béton de sable concassé a une résistance à la compression à long terme comparable à celle du béton ordinaire. Le développement de la résistance à la compression à long terme du béton est positivement influencé par une quantité appropriée de poudre de calcaire dans le SC. Une teneur idéale en poudre de calcaire ne dépassant pas 13 % s'est avérée bénéfique en raison de la nature discrète de la résistance à la compression.

Yang, R. et al., (2019) ont étudié l'effet des caractéristiques du sable concassé sur les résistances mécaniques du béton, ainsi que l'effet de la teneur en fines calcaires du SC sur la durabilité de différentes classes de béton. Les résultats obtenus indiquent que le MS était comparable au sable de rivière et qu'une certaine teneur en poudre de calcaire (6% à 12%)

dans le SC pourrait contribuer au développement de la résistance mécanique, et de la durabilité du béton.

D'après l'étude expérimentale menée par (Bounedjema et al., 2017) sur l'influence de sable concassé sur la résistance à la compression du mortier (figure 2.10). Ils ont abouti à une amélioration de la résistance mécanique au jeune âge et à long terme, grâce à la forme rugueuse des grains et la texture ce qui assure une bonne cohésion entre la matrice cimentaire.

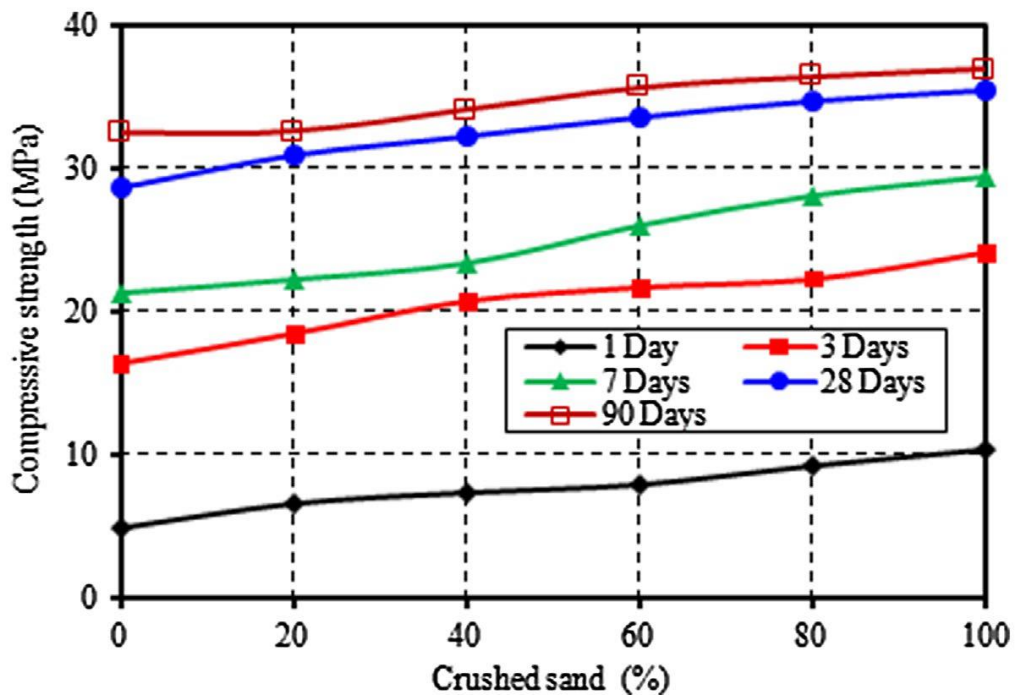


Figure 2.10. Développement de la résistance à la compression du mortier en substituant le sable SN par le sable SC.

2.5.4. Résistance à la traction

L'introduction du sable de concassage dans la composition du béton et du mortier contribue de manière significative à améliorer la cohésion entre les particules et la pâte (figure 2.11), grâce à la texture rugueuse et anguleuse du gravier. De plus, la poudre calcaire du sable concassé joue un rôle complémentaire pour combler les pores et augmenter la résistance du béton au jeune âge et à long terme (Yang et al., 2019 ; Meisuh et al., 2018)

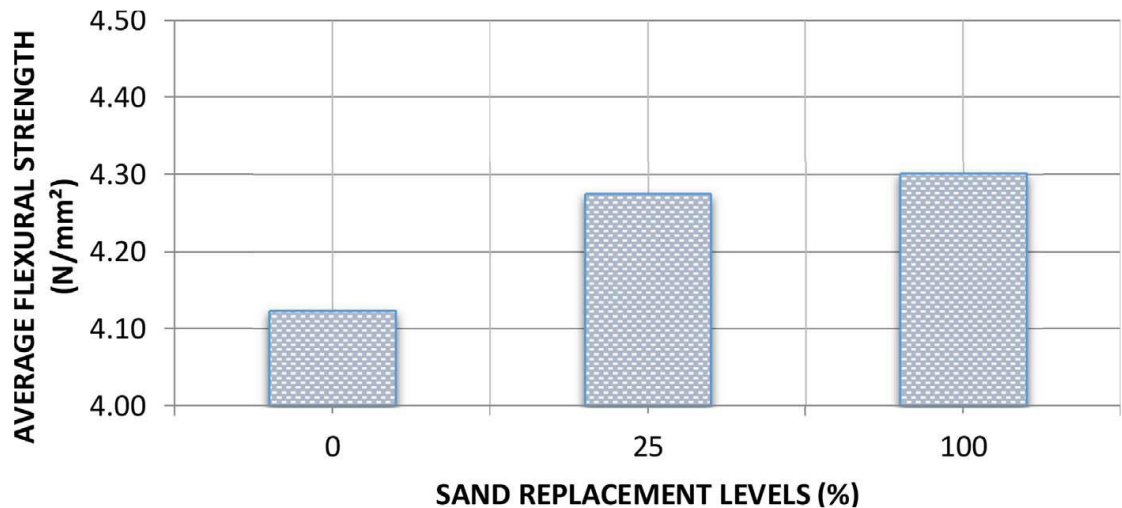


Figure 2.11. Effet du remplacement partiel du sable SN par le sable SC sur le développement des résistances à la flexion du mortier

Une étude menée par Alshahwany. (2011) a mis en évidence l'effet des fines calcaires contenues dans le sable de concassage sur la résistance à la traction du béton. Différentes proportions de fillers calcaires ont été substituées au sable à savoir 0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50% (figure 2.12). Les résultats ont montré que cette substitution augmente la résistance à la traction du béton. À 20% de calcaire fin, la résistance atteint son maximum et augmente linéairement. La résistance diminue progressivement après avoir franchi ce seuil (Bounedjema et al., 2017).

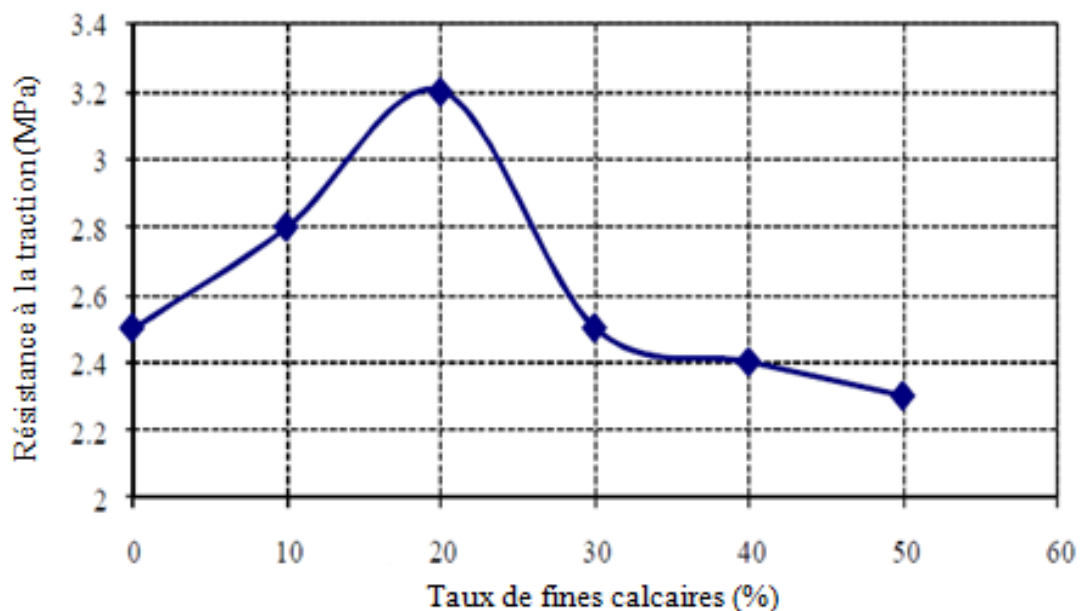


Figure 2.12. Effet de la teneur en poudre de calcaire dans le sable de concassage sur la résistance à la flexion du béton (Alshahwany et al., 2011).

Singh et al., (2021) ont testé la substitution partielle du sable naturel par 10%, 20%, 30%, 40 et 50% de fines sur la résistance à la traction du béton (figure 13). Ils ont observé que la résistance à la traction suit une tendance croissante similaire à celle de la résistance à la compression, jusqu'à une teneur de 20 % de fines.

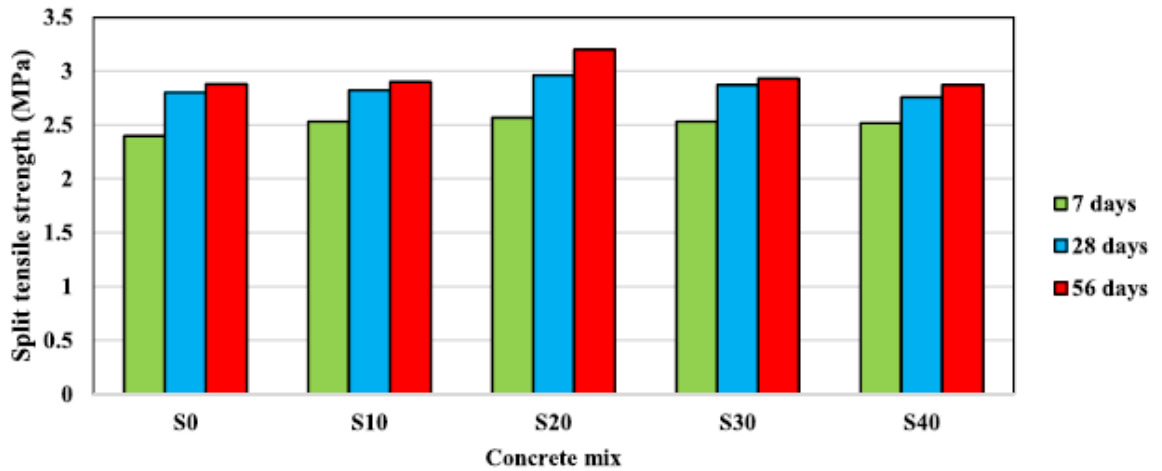


Figure 2.13. Développement des résistance à la flexion d'un béton contenant différents taux de fines calcaire (Singh et al., 2021).

2.5.5. Retrait

Zhang et al. (2023) ont étudié l'influence de la poudre calcaire sur les propriétés du béton (figure 2.14). Ils ont constaté qu'une teneur optimale, comprise entre 10 et 20 %, permet de réduire efficacement le retrait du béton au jeune âge. En revanche, un excès de la poudre de calcaire risque de diminuer de la résistance et de la durabilité du béton à base de sable de concassage (Zhang et al., 2023).

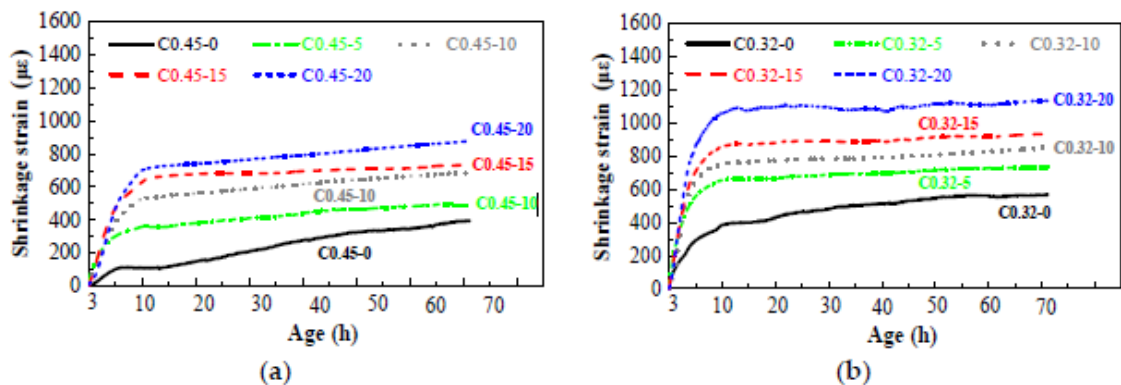


Figure 2.14. Évolution du retrait plastique des bétons avec différent taux de fines calcaires

L'incorporation de 30 % en poids de poudre de calcaire à la composition du béton conduit à une légère diminution de la porosité et une modification de la microstructure du béton en raison de son effet de remplissage et d'accélérateur d'hydratation, ce qui améliore la résistance du béton à la diffusion des ions chlorure. Cependant, un ajout excessif de calcaire nuit à la microstructure du béton et à sa durabilité (Valcuende et al., 2012).

2.6. Conclusion

L'utilisation des déchets fins recyclés dans le domaine du génie civil représente une solution prometteuse pour réduire l'impact écologique du secteur de la construction. Ces nouveaux matériaux, issus du recyclage des déchets de construction ou des résidus industriels peuvent trouver une utilisation utile dans divers projets.

L'utilisation des déchets de carrière dans la formulation du béton et du mortier est une approche novatrice et durable qui répond à la fois aux besoins de l'industrie de la construction et aux exigences environnementales. Cependant, leur valorisation dans les matériaux de construction offre de multiples avantages, notamment sur le plan économique, environnemental ainsi qu'une amélioration des performances mécaniques et de la durabilité du béton.

Chapitre 03 :

Présentation du protocole expérimental

3.1. Introduction

L'objectif de cette étude expérimentale est d'analyser l'impact du remplacement intégral du sable naturel (SN) par du sable de concassage (SC) sur les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité d'un béton à base de granulats recyclés (GBR). La caractérisation de ces matériaux est une étape très importante dans l'étude. Elle permettra de comprendre la relation entre la composition du béton et ses performances. On commencera par chercher une composition standard d'un béton ordinaire, puis on substituera une partie de gros granulat par un GBR. De même, on procèdera le même travail avec un béton à base de sable de carrière. Des essais de caractérisations seront entamés selon les normes en vigueur sur les deux bétons formulés à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

3.2. Programme expérimental

Sur deux séries de bétons, l'un à base de sable naturel et l'autre à base de sable recyclé, on a procédé au remplacement de 20%, 40%, 60%, 80% et 100% des gros granulats ordinaires par des granulats de béton recyclé. Pour obtenir une ouvrabilité souhaitée, on a utilisé un adjuvant superplastifiant MEDAFLOW30 (SP) avec trois rapports E/C (0.4, 0.5 et 0.6). Douze bétons ont été confectionnés au laboratoire de géomatériaux de l'université de Chlef où ils subiront des tests physiques, mécaniques et de durabilité. Ceci permet de cerner les effets des deux types de sables sur certaines propriétés du béton. En plus, leur combinaison avec les granulats issus du recyclage éclaircira l'efficacité de chaque sable.

3.2.1. Matériaux utilisés

3.2.1.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est nommé CEM II/A 42.5. Il est produit par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) et contient 10% de calcaire. Ces caractéristiques chimiques et minéralogiques sont récapitulées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Eléments chimiques et minéraux composant le ciment

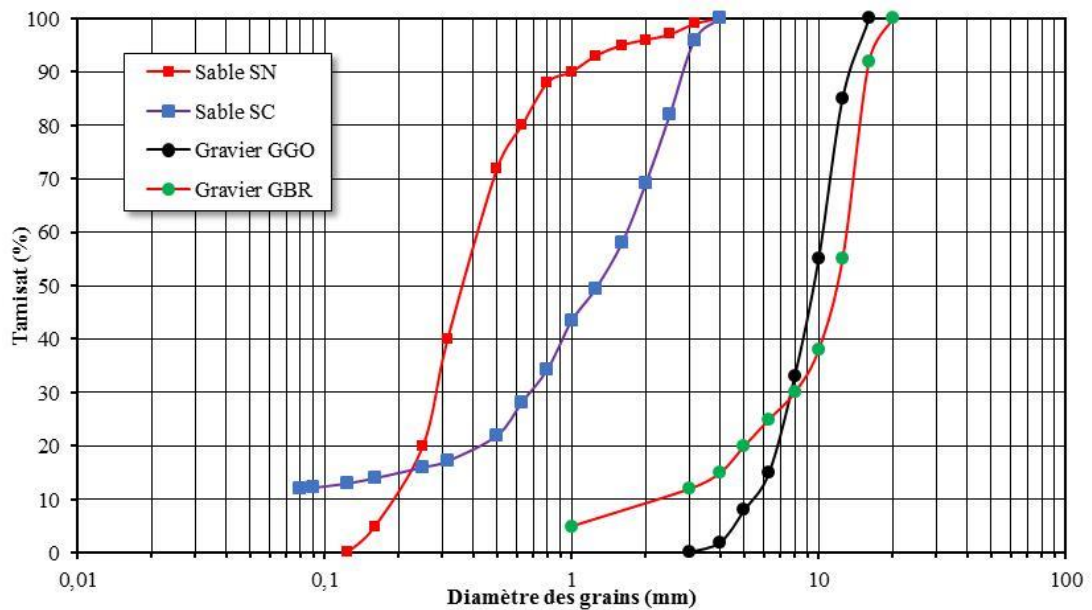
CEM II/A 42.5	Composition chimique %								Composition minéralogique %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	PAF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	PAF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	22.6	4.20	3.55	62.17	2.19	0.63	0.42	1.84	41.8	33.3	5.1	10.7

3.2.1.2. Sable

Deux types de sable ont été utilisés pour tester l'impact de la teneur en granulats grossiers recyclés dans le béton. Le premier est le sable naturel de classe 0/4 de l'Oued Ras de Chlef. Le second est un sable issu de déchets de carrière, qui est une roche concassée utilisée pour fabriquer du gravier. Le tableau 3.2 et la figure 3.1 montrent les principales caractéristiques et la distribution des tailles de particules.

Tableau 3.2. Quelques propriétés physico-mécaniques des granulats

Caractéristique	GGO	GBR	SN	SC
Module de finesse	/	/	2.79	2.97
Equivalent sable	/	/	79	81
Densité absolue (kg/m ³)	2631	2381	2608	2621
Densité apparente (kg/m ³)	1477	1205	1562	1470
Los-Angeles %	27.9	33	/	/
Absorption %	0.95	5.1	/	/

**Figure 3.1.** Distribution granulométrique des granulats.

3.2.1.3. Gravier

Deux types de graviers ont été utilisés. Le premier est Naturel d'origine silico-calcaire. Il possède une classe 8/15 et provient de la carrière d'Oued Fodda à Chlef. Le deuxième (Gravier de béton recyclé) est de classe 4/16 obtenue par concassage des blocs en béton ordinaire confectionné de même types du ciment et même composition. Après une année de durcissement, il a été concassé par un concasseur à mâchoire (figure 3.2), et tamisé d'une série de 4/16 mm. Les caractéristiques de granulats utilisés sont montrées dans le tableau 3.2.



Figure 3.2. Ancien blocs en béton



Figure 3.3. Concasseur à mâchoire

3.2.1.4. Adjuvant

Pour assurer la conservation des propriétés du béton, on a utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau (**MEDAFLOW 30**), à base de polycarboxylates d'Ether. Sa teneur en extrait sec est de 30% comme montré dans le tableau 3.3. Ce type d'adjuvant peut réduire fortement la teneur eau et améliorer les propriétés du béton à l'état frais.

Tableau 3.3. Composition de superplastifiant MF 30

MEDAFLOW 30	
Nature chimique	Polycarboxylate
Extrait sec	30%
Densité	1.07g/ cm ³
PH	6 – 6.5

3.2.1.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des différents types des bétons est l'eau potable conforme aux spécifications et normes européennes NF EN 1008 (2003). La composition minéralogique est démontrée dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Composition chimique de l'eau

Composant	Concentration (mg/L)
Mg	6.6
K	0.5
Na	5.8
Ca	53
Cl	11
HCO ₃	168
NO ₃	2
SO ₄	9
pH	7.3

3.2.2. Formulation des bétons

Après la caractérisation des granulats, et pour assurer l'homogénéité et la continuité granulaire dans les mélanges, On s'est basé sur la méthode de DREUX-GORISSE norme EN 933-1 pour déterminer les proportions des constituants.

On a confectionné trois types de béton selon le rapport E/C (0.4, 0.5, 0.6). Un béton ordinaire de chaque classe confectionnée avec 100% de gravier naturel GGO (tableau 3.5) et (tableau3.6), comme un béton de référence. Ensuite, on a substitué partiellement le gravier naturel GGO par le gravier recyclé GBR par masse de proportions (0, 20, 40, 60, 80 et 100%), pour garder la même ouvrabilité (16 ± 1 cm), on a ajouté une quantité de superplastifiant.

Tableau 3.5. Composition des bétons avec des granulats de béton recyclé et du sable naturel.

Mix	Matériaux (kg/m ³)				SP%		
	GN	GBR	SN	Ciment	0.4	0.5	0.6
BN0	1047	0	600	400	1.3	0.4	0
BN1	837.6	209.4	600	400	2.2	0.6	0.1
BN2	628.2	418.8	600	400	2.8	0.7	0.2
BN3	418.8	628.2	600	400	3	0.8	0.22
BN4	209.4	837.6	600	400	/	0.9	0.28
BN5	0	1047	600	400	/	0.9	0.3

Tableau 3.6. Composition des bétons avec des granulats de béton recyclé et du sable de carrière.

Mix	Matériaux (kg/m ³)				SP%		
	GN	GBR	SC	Ciment	0.4	0.5	0.6
BC0	1047	0	600	400	1	0.3	0
BC1	837.6	209.4	600	400	1.2	0.4	0.05
BC2	628.2	418.8	600	400	1.2	0.45	0.1
BC3	418.8	628.2	600	400	1.5	0.6	0.15
BC4	209.4	837.6	600	400	1.8	0.7	0.2
BC5	0	1047	600	400	2.2	0.8	0.25

BN : Béton de sable naturel, BC : Béton de sable concassé, GBR : Granulats de Béton Recyclés

3.2.3. Matériels utilisé

3.2.3.1. Balance électronique

Plusieurs balances électroniques de différentes précisions de 0,1 g, 0.01g et 0.001g ont été utilisées pour le pesage des ingrédients et la confection des différents bétons (figure 3.4). De plus, un thermomètre d'une précision de 0,1 °C a servi à contrôler la température des bétons après chaque malaxage



Figure 3.4. Balances électroniques

3.2.3.2. Malaxeur

Les propriétés rhéologiques dépendent fortement du mode de malaxage et du dosage des constituants utilisés. Avant de commencer tout travail, il est essentiel de choisir un malaxeur approprié en fonction de la quantité et la qualité du béton à préparer. Le malaxeur illustré à la figure 3.5 fait partie des équipements de laboratoire couramment utilisés pour la fabrication du béton. Cet appareil, conforme à la norme NF EN 12390-2 (2019), sert de référence pour la majorité des normes relatives à la préparation du béton (NF EN 206-1).



Figure 3.5. Bétonnière électrique 115 litres.

3.2.3.3. Cône d'Abrams

Un cône d'Abrams, illustré à la figure 3.6, est utilisé pour mesurer l'ouvrabilité du béton après le malaxage selon la norme NF EN 12350-2 (2019). Cet outil a un diamètre de base de 150 mm, un diamètre supérieur de 100 mm et une hauteur de 300 mm.



Figure 3.6. Cône d'Abrams utilisé pour mesurer l'affaissement

3.2.3.4. Epreuves utilisées

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons deux types d'éprouvettes ont été utilisées dont les moules sont illustrés sur la figure 3.7:

- Epreuves cubique de dimension 10x10x10 cm selon la norme NF EN 12390-1 pour les essais mécaniques.
- Epreuves prismatique de dimension 7x7x28 cm selon la norme (NF P18-406) pour les essais de traction par flexion, l'absorption, la sorptivité et le retrait de séchage.

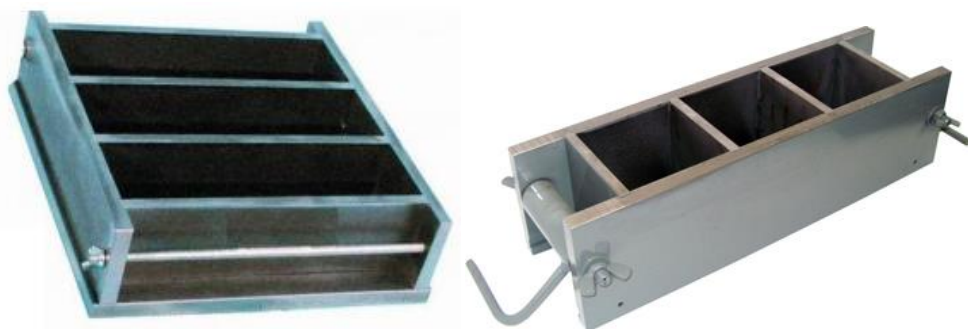


Figure 3.7 : Types des éprouvettes utilisées

3.2.4. Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est effectuée à l'aide d'un malaxeur à axe incliné de 30 litres. Pour faciliter et assurer l'homogénéité des composants du béton, les étapes ci-dessous ont été suivies :

- a) Introduire les granulats (Graviers et Sable) et malaxer pendant une minute.
- b) Ajouter le ciment et mélanger à sec pendant une minute.
- c) Ajouter 2/3 de l'eau et mélanger pendant une minute.
- d) Mélanger le 1/3 de l'eau avec la quantité de superplastifiant et introduire dans la bétonnière et mélanger pendant deux minutes.

3.2.5. Essais effectués

3.2.5.1. Ouvrabilité

L'essai d'affaissement, également appelé Slump-test ou essai au cône d'Abrams, est la méthode la plus couramment utilisée et reconnue à l'échelle mondiale pour mesurer la consistance du béton. Cet essai est réalisé conformément à la norme NF EN 12350-2 (2019). Le dispositif employé est un cône tronqué de 30 cm de hauteur (figure 3.8). Après avoir légèrement huilé et fixé le moule sur une plaque d'appui, celui-ci est rempli de béton en trois couches de hauteur égale, chaque couche subira un picage de 25 coups à l'aide d'une tige. Une fois le béton nivelé au bord supérieur du moule, celui-ci est délicatement retiré. La valeur d'affaissement, exprimée en centimètres, est la chute de hauteur du cône de béton que subira le béton une minute après le démoulage.



Figure 3.8. Mesure d'affaissement par le cône d'Abrams.

3.2.5.2. Résistance à la compression

Les éprouvettes préparées pour étudier l'évolution de la résistance à la compression sont des cubes de 100 mm sont conservés dans un bac d'eau à une température constante de 20°C (figure 3.9). Elles subissent un écrasement en compression simple pour suivre l'évolution de leurs résistances. Ces essais sont effectués conformément à la norme NF EN 12390-4 (2019), le teste de compression consiste à mesurer la résistance des éprouvettes

préparés à l'aide d'une presse hydraulique à 3, 7, 28 et 90 jours (figure 3.9), on prend la valeur moyenne de trois échantillons.



Figure 3.9. Cube en béton soumis à un essai de compression à l'aide d'une presse hydraulique.

3.2.5.3. Résistance à la flexion

L'essai de résistance à la flexion est effectué conformément à la norme NF EN 12390-5 (2019). On a préparé des éprouvettes prismatiques de 70x70x280 mm en les conservant dans un bac d'eau, pendant 28 jours à 20°C. L'essai est effectué sur les échantillons à l'âge de 3, 7, 28 et 90 jours. L'essai est exécuté à l'aide d'une machine de flexion trois points (figure 3.10) ayant une capacité 200 KN. La résistance à la flexion est prise égale à la moyenne de trois mesures.



Figure 3.10. Prisme en béton soumis à un essai de compression à l'aide d'une presse hydraulique.

3.2.5.4. Essai de Retrait

Le retrait du béton est une contraction qui résulte de l'hydratation de la pâte ciment. Les échanges hydriques, thermiques et mécaniques avec le milieu environnant peuvent amplifier ou diminuer ce retrait que ce soit avant, pendant ou après la prise du béton et qui même provoquer l'apparition de fissures.

Dans ce test, on a étudié l'évolution du retrait total des éprouvettes durant 140 jours. Les échantillons sont confectionnés dans des moules prismatiques de 70x70x280 mm, et recouverts de papier isolant après le démoulage, pour éviter toute évaporation. Un plot est fixé au bout de l'éprouvette pour une mesure précise. Les éprouvettes sont conservées à une température constante de 20°C selon la norme ASTM C157/C157M (Figure 3.11). Les mesures sont effectuées à l'aide d'un dispositif de mesure du retrait (comparateur d'une précision de 1 µm) (Figure 3.12). Les résultats obtenus correspondent à la moyenne des trois essais sur le même type de béton et sous les mêmes conditions.

La déformation finale des échantillons c'est la différence de la longueur à partir le 1^{er} jour de démoulage et exprimée par :

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (3.1)$$

Avec :

ΔL : variation de la longueur de l'échantillon exprimée en µm.

L : longueur entre les deux bords de l'échantillon prise égale à 280 mm.

ε : déformation de retrait correspondante exprimée en µm/m.



Figure 3.11. Conservation des éprouvettes au laboratoire a 20°C.



Figure 3.12. Bâti de mesure du retrait avec un comparateur d'une précision de 1 μm .

3.2.5.5. Absorption d'eau par immersion

La porosité du béton est un paramètre très important dans l'étude et l'évaluation de sa durabilité. Le test d'absorption d'eau du béton caractérise la compacité du béton par l'indice de porosité. Le test consiste à mesurer la teneur en eau absorbée par l'échantillon par rapport à la masse total de l'éprouvette. Selon la norme ASTM C642-13 (2022), on a confectionné des éprouvettes cubiques 100 mm, après 28 jours de durcissement dans un bac d'eau (figure 3.13), on les sèche dans un four à 105 C, ensuite on les pèse (M_s) puis les émerge totalement dans un bac d'eau pendant 24 heures. Finalement on les pèse une autre fois (M_h) après l'immersion. La teneur en eau absorbée est exprimée par la relation suivante :

$$W(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.2)$$

Avec :

M_s : la masse sèche de l'éprouvette.

M_h : la masse humide de l'éprouvette.



Figure 3.13. Mode d'immersion des éprouvettes pour la mesure d'absorption.

3.2.5.6. Absorption par capillarité

Le béton est un matériau poreux, contenant des pores de tailles variées qui se forment principalement lors de son hydratation et de son durcissement. Ces pores permettent à l'eau de pénétrer et de migrer dans la matrice de béton.

Plusieurs paramètres commandent le transport des matériaux délétères à l'intérieur du béton. La sorptivité (S_w ($m.s^{-1/2}$)) est l'un de ces paramètres. Elle est définie comme étant la propriété qui caractérise la possibilité d'un matériau poreux d'absorber et transmettre l'eau par capillarité pour des conditions initiales et limites (figure 3.14). Selon la norme NF EN 13057 (2002).

Étapes générales de l'essai :

- a) Préparation de l'échantillon: Un échantillon de béton est séché jusqu'à un poids constant pour éliminer l'humidité initiale.
- b) Immersion partielle: La base de l'échantillon est mise en contact avec de l'eau, parfois à une profondeur standardisée, comme 5 mm.

- c) Suivi du poids: L'échantillon est pesé à intervalles réguliers pour mesurer la quantité d'eau absorbée.
- d) Calcul du taux d'absorption : La quantité d'eau absorbée est exprimée en grammes par unité de surface et par unité de temps ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}^{0.5}$).
- e)

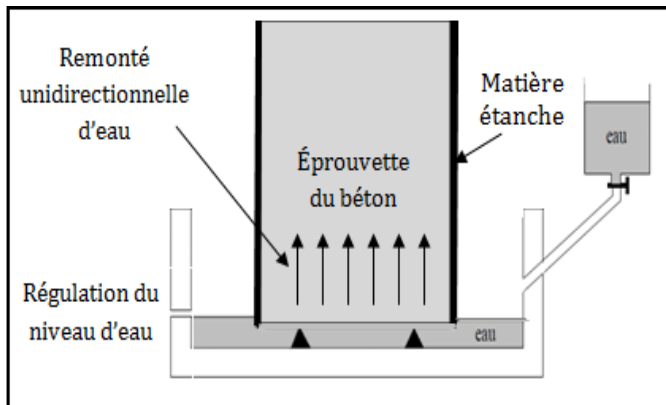


Figure 3.14. Dispositif de mesure de l'absorption capillaire du béton.

L'absorption capillaire d'un échantillon est évaluée comme :

$$Abs = \frac{M_2 - M_1}{A} / \sqrt{t}$$

Avec :

- M_1 et M_2 : la masse de l'échantillon entre le temps t_1 et t_2
- A : section en contact avec de l'eau
- T : temps d'exposition entre t_1 et t_2

3.2.5.7. Perte en poids

La perte en poids du béton est un paramètre important pour évaluer ses performances et sa durabilité. Elle peut être liée à divers phénomènes comme le séchage, la dégradation par des agents chimiques, ou encore l'érosion.

Le suivi de l'évolution d'essai de la perte en poids des échantillons est cohérent avec le suivi de l'évolution du retrait suivant la norme (ASTM C157/C157M) Les échantillons confectionnés dans des moules prismatiques (70x70x280) mm, exposés à l'air libre et restés verticalement au cours du séchage dans les mêmes conditions (figure 3.15). Les échantillons sont pesés quotidiennement afin de suivre l'évolution au cours du durcissement du béton sur une période de 140 jours.



Figure 3.15. Suivi du poids d'une éprouvette séchant à l'air libre (perte en poids).

La perte en poids W (%) représente la perte de masse de l'échantillon, elle est calculée :

$$W = (M_2 - M_1) / M_1$$

Avec : M_1 : Masse initial de l'éprouvette

M_2 : Masse de l'éprouvette après 180 jours de durcissement

3.3. Conclusion

Ce protocole expérimental a été tracé pour mettre en évidence l'effet du type de sable sur le comportement d'un béton contenant diverses proportions de gravier de bétons recyclés. Le sable concassé provenant des déchets des carrières semble posséder une morphologie et une composition lui permettre de contrecarrer le déficit de performances rencontrées lorsque les granulats GBR sont employés.

Le gravier recyclé a une grande capacité d'absorption. En raison du mortier adhérent, cela affecte négativement les propriétés du béton à l'état frais et durci. L'incorporation de sable concassé dans la formulation de béton contenant des GBR améliore son ouvrabilité, sa résistance ainsi que sa durabilité à long terme. La présence de ce sable peut rendre les caractéristiques du BGR comparables à celle d'un béton ordinaire.

Chapitre 04 :

Présentation et analyse des résultats

4.1. Introduction

Cette partie est consacrée à faire une comparaison entre le béton de granulats recyclés formulé à base de sable naturel et un sable concassé. L'étude s'étend vers la détection des propriétés physiques, mécaniques et de durabilité. Cette comparaison sera illustrée par des relations mathématiques entre les deux bétons en fonction de leurs teneurs en GBR.

4.2. Modifications apportées sur l'ouvrabilité

L'ouvrabilité du béton est propriétés intrinsèque du béton frais qui gouverne sa mise en œuvre. Les granulats GBR considérés comme un matériau poreux et plus absorbant, nécessitent plus d'eau pour le mélange et plus de superplastifiant. Ce comportement affecte les propriétés du béton à l'état frais et durci (Medjigbodo et al., 2018). Pour maintenir le même affaissement (170 ± 10 mm), une quantité spécifique de superplastifiant a été ajoutée. Pour les deux types de béton testés, les valeurs d'affaissement et les dosages de superplastifiant requis, pour chaque proportion de GBR utilisée, sont illustrés dans les figures 4.1, 4.2 et 4.3 selon les rapports E/C utilisés à savoir 0.6, 0.5 et 0.4 respectivement.

Ceci est cohérent avec les résultats de Falek et al., (2017) où 0,7 % supplémentaires de superplastifiant doivent être ajoutés pour obtenir un affaissement de 180 mm, en raison de la forte absorption des GBR. Il a été démontré que le sable concassé réduit le dosage de superplastifiant de 15 à 50 % par rapport au béton avec du sable naturel. Pour maintenir un affaissement identique avec un rapport E/C de 0.6, les bétons fabriqués avec du sable SN et contenant 60 % et 100 % de GBR ont nécessité des dosages en superplastifiant de 0,2 % et 0.3 respectivement, Si on remplace le sable SN par le SC dans la formulation des bétons, ces dosages diminuent à 0,15% et 0,25% pour les mêmes bétons. Ce résultat est cohérent avec celui de Guneyisi et al., (2016) où l'augmentation des diamètres d'écoulement est beaucoup plus importante lorsque le niveau de granulats fins recyclés augmente dans le mélange de béton.

Plusieurs chercheurs (Ait Mohamed et al., 2016 ; Poon et al., 2004) ont montré que les granulats recyclés GBR sont de mauvaise qualité à cause de la teneur en mortier attaché, ce qui diminue les valeurs d'affaissement et augmente le dosage de superplastifiant. L'utilisation du sable SC dans le béton au lieu du sable SN permet d'améliorer les propriétés physiques des bétons et réduire les besoins en superplastifiant.

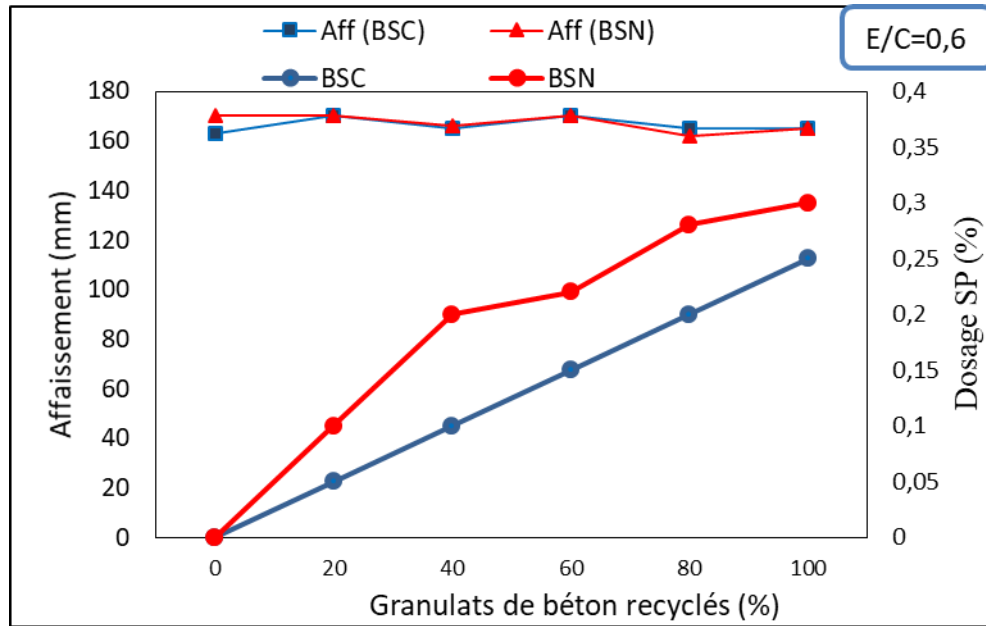


Figure 4.1. Résultats des affaissements et des besoins en superplastifiant des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.6).

D'après les valeurs de la figure 4.2, un béton ouvrable à base de sable SC malaxé avec un E/C de 0.5 et qui contient de 60% et 80% de GBR nécessite de 0.6 et 0.7% de superplastifiant au lieu d'ajouter 0.8 et 0.9% de superplastifiant pour un béton à base de sable SN pour les mêmes taux de substitution.

Le rapport eau/ciment (E/C) est un facteur clé influençant la résistance du béton. Une faible quantité d'eau par rapport au ciment réduit la porosité de la pâte de ciment durcie, augmentant ainsi la densité et la résistance du béton. Le dosage en superplastifiant augmente à mesure que le rapport E/C diminue et que le taux de remplacement des granulats ordinaires (GGO) par des granulats de béton recyclé (GBR) augmente dans le béton. Cette augmentation est importante lorsque le rapport E/C atteint 0,4 dans les bétons de GN et que le taux de substitution dépasse 60%. Dans ces conditions, la réduction de l'eau de gâchage ne permet pas de recouvrir tous les grains de ciment, limitant ainsi leur mobilité.

Pour les bétons à faible E/C, les valeurs d'affaissement (figure 4.3) montrent l'effet positif du sable concassé sur l'ouvrabilité du BGR au remplacement partiel et total du GBR

par les GN, pour un béton à base de sable concassé contenant 60% de GBR, nécessite la moitié de la quantité de superplastifiant que le béton à base du sable SN.

Dans le même contexte, Li et al., (2011) affirment que la morphologie des granulats fins décrite par leur sphéricité, leur rondeur et leur dimension fractale a un impact notable sur les propriétés rhéologiques des mortiers. De plus, la poudre de calcaire présente dans le sable SC améliore légèrement l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques du béton (Adjoudj et al., 2014; Meziane et al., 2015). De même, Beixing et al. (2011) confirment que l'ouvrabilité s'améliore progressivement en augmentant la poudre de calcaire de 10% à 15%. De plus, Lohani et al. (2012) ont ajouté que les valeurs d'affaissement augmentent avec la teneur accrue en poussière de carrière dans le sable SC.

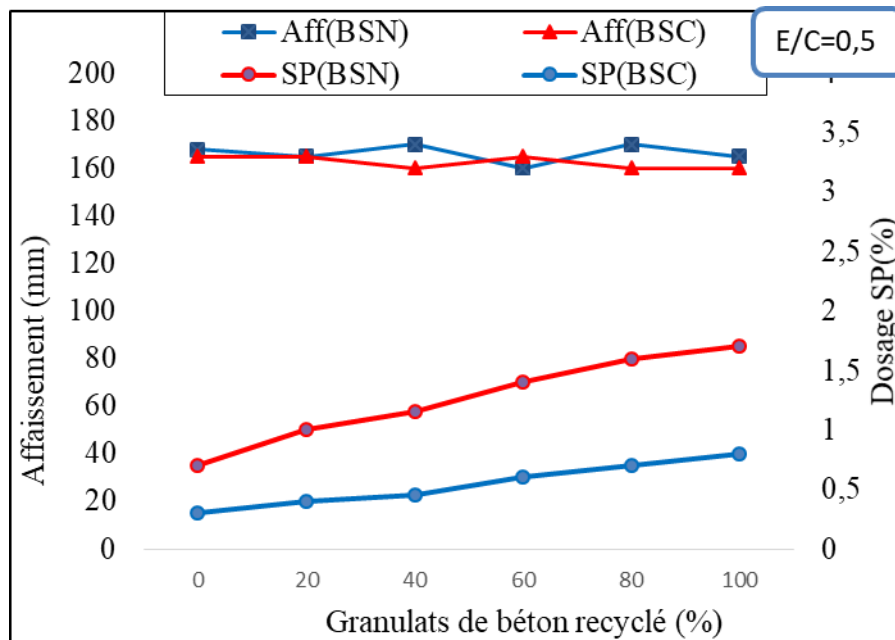


Figure 4.2. Résultats des affaissements et des besoins en superplastifiant des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.5).

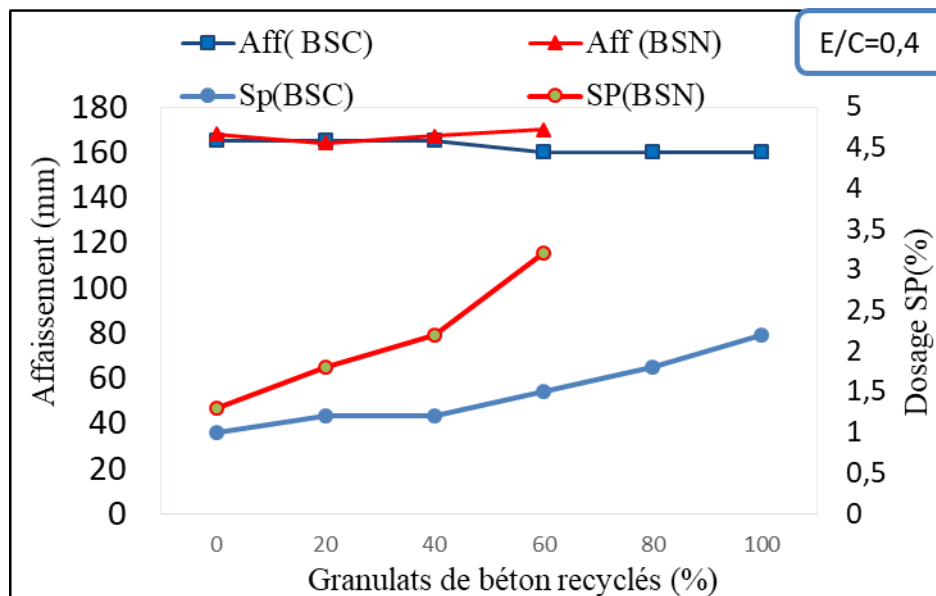


Figure 4.3. Résultats des affaissements et des besoins en superplastifiant des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.4).

4.3. Modifications sur la résistance à la compression

Dans ce contexte, l'évolution de la résistance à la compression du béton a été suivie sur des périodes de 3, 7, 28 et 90 jours. Les mesures ont été effectuées en prenant la valeur moyenne de trois essais réalisés sur des éprouvettes cubiques de 100 mm. Les résultats obtenus montrent un effet légèrement positif des granulats recyclés dans les deux types de béton, BSC et BSN (figure 4.4), pour des taux de substitution de 60 % et 80 %. Le remplacement des granulats grossiers naturels (GGO) par des granulats recyclés (GBR) modifie la résistance mécanique à long terme, en particulier dans les bétons BSC. À un jeune âge, et pour des taux de substitution de 40 % et 60 %, la résistance à la compression reste quasiment équivalente à celle du béton ordinaire.

Une diminution notable de la résistance à la compression est observée lorsque la concentration en superplastifiant dépasse le seuil de saturation. La figure 4.6 montre une baisse de la résistance à la compression du béton avec un pourcentage élevé de GBR à un rapport E/C de 0,4. De plus, dans les bétons à base de SN, le mélange devient moins maniable et l'ajout de superplastifiant est inefficace si le taux de remplacement des granulats grossiers naturels (GGO) par des granulats recyclés (GBR) dépasse 60 %.

Le remplacement des GGO par des GBR à des taux de 80 % et 100 % entraîne une augmentation de la résistance à la compression des bétons à base de sable concassé. Cette amélioration peut atteindre 1,2 fois celle des bétons à base de sable naturel, comme illustré dans les figures 4.4 et 4.5.

L'effet du type de sable devient plus évident et le béton formulé avec du sable SC présente une résistance supérieure à celle du béton avec du sable SN. Certaines études (Mahakavi et Chithra, 2020 ; Poon et al., 2004) ont mis en évidence que les granulats recyclés (GBR) réduisent la résistance à la compression du béton par rapport aux granulats naturels. Cependant, les résultats de cette étude diffèrent : à faible taux d'incorporation de GBR, aucun effet négatif n'est observé. En revanche, à des taux élevés, les GBR ont un impact globalement positif sur la résistance à la compression.

L'effet positif du sable SC sur le comportement du béton de granulats recyclés peut être attribué à deux facteurs importants : la teneur en poudre de calcaire du sable concassé, qui renforce la structure de GBR et améliore la compacité du béton, et les particules angulaires rugueuses qui assurent une bonne cohésion entre les granulats. La forme angulaire et la surface rugueuse du sable SC et des granulats GBR augmentent la résistance à la compression, là où la texture conduit à une meilleure adhésion entre les granulats et la matrice cimentaire (Ait Mohamed et al., 2016). Huang et Wang (2017) ont conclu que l'angularité des particules peut augmenter la résistance à la compression et à la flexion du béton. Poon et al. (2004) ont montré que la résistance du béton dépend de la matrice cimentaire et de la force d'adhérence. La poudre de calcaire contenue dans le sable SC peut jouer un rôle de nucléation qui accélère l'hydratation des grains de ciment dès le plus jeune âge et entraîne une amélioration de la résistance. Dans le même contexte, Itim et al. (2011) ont conclu que l'incorporation de moins de 15% de poussières de carrière dans le ciment s'avère bénéfique et que le mortier atteint des résistances à la compression similaires à celles du ciment ordinaire avant 28 jours. D'autres études (Beixing et al., 2011) expliquent que l'augmentant de la quantité de poudre de calcaire dans le sable SC de 4,3 % à 20 % engendre une amélioration de la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à l'abrasion.

Lorsque la teneur en GBR augmente, une quantité importante d'eau de gâchage est absorbée, ce qui provoque une variation significative du rapport eau sur ciment effectif. L'amélioration de la résistance à la compression peut être attribuée à la réduction de ce rapport eau sur ciment effectif lorsqu'on utilise des granulats secs sans compenser l'absorption d'eau. Ces observations sont en accord avec les conclusions de Bouarroudj et

al., (2019), selon lesquelles l'utilisation de granulats fins recyclés à l'état sec améliore la résistance à la compression par rapport au mortier témoin.

Dans ce contexte, l'ajout d'adjuvants réducteurs d'eau semble constituer la meilleure solution pour limiter les altérations des propriétés des enrobés (Sosa et al., 2021). En outre, pour une faible teneur en GBR, la perte de résistance peut être partiellement compensée par l'effet de remplissage des particules friables de mortier attaché, qui se détachent des granulats recyclés (GBR) lors du malaxage (Pacheco et al., 2019).

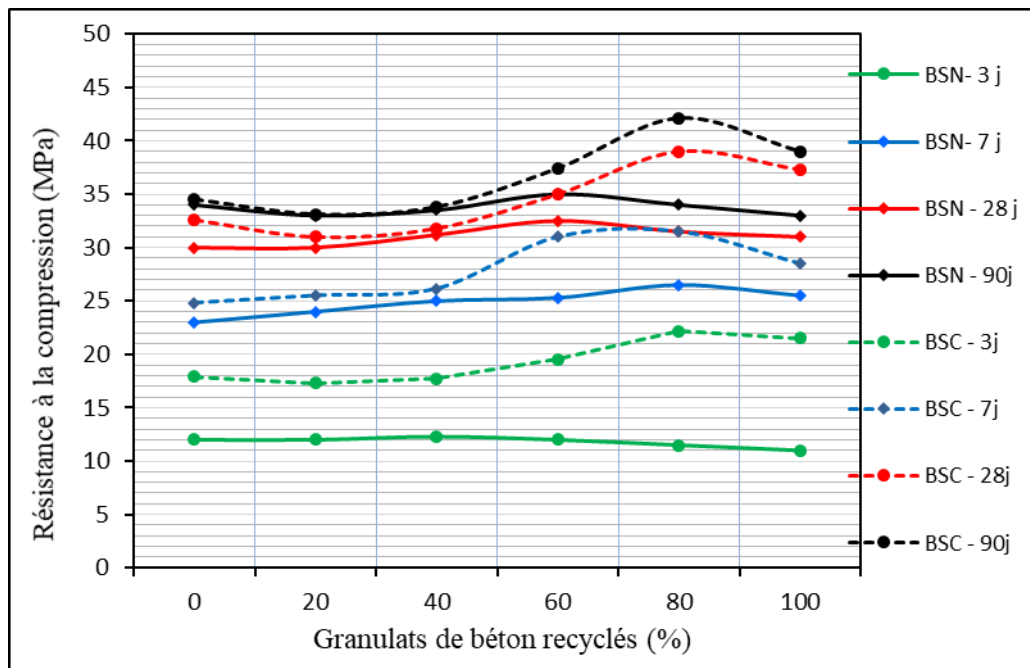


Figure 4.4. Résultats de la résistance à la compression des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable ($E/C=0.6$).

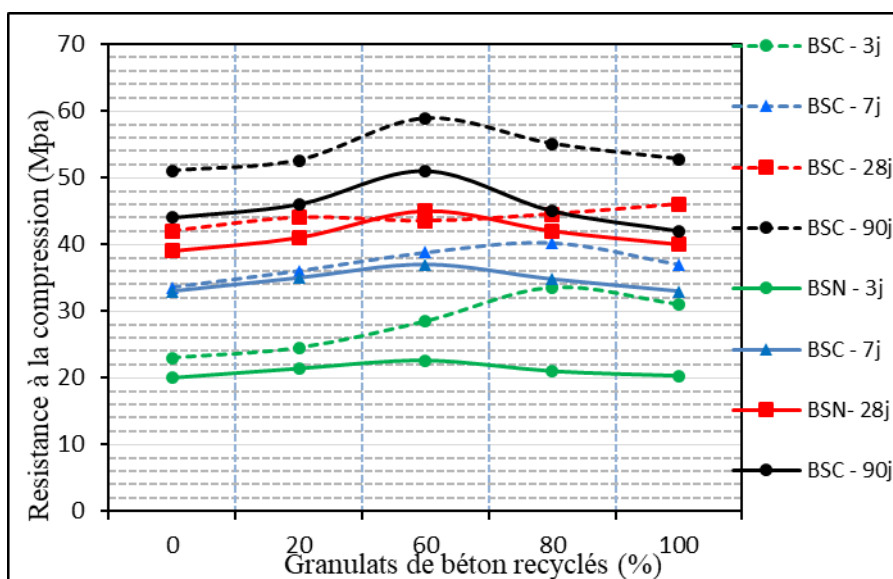


Figure 4.5. Résultats de la résistance à la compression des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable ($E/C=0.5$).

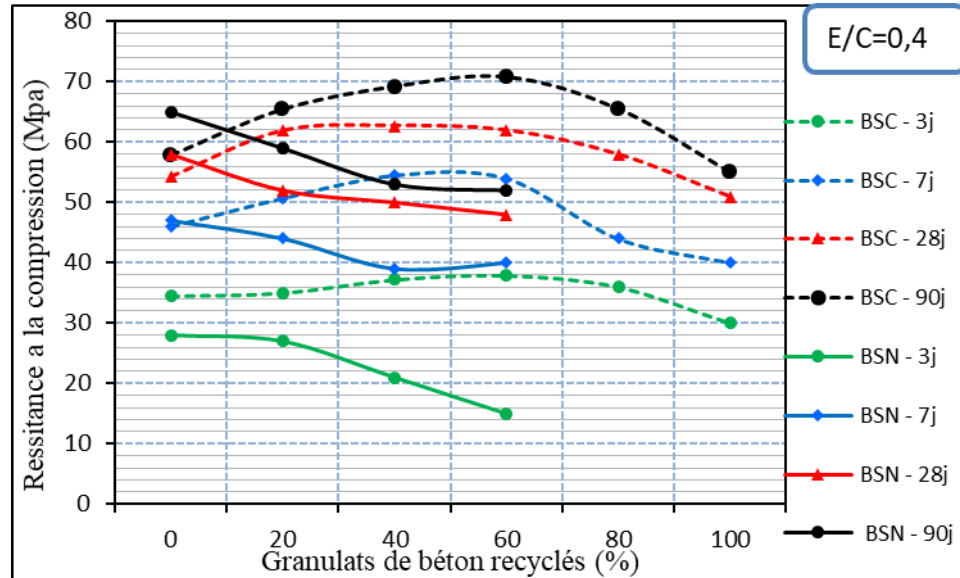


Figure 4.6. Résultats de la résistance à la compression des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable ($E/C=0.4$).

4.4. Modifications sur la résistance à la flexion

La résistance à la flexion du béton dépend de l'adhésion entre ces composants et de la capacité de la matrice à résister à des contraintes de séparation. L'évolution de la résistance à la flexion avec l'âge suit la même tendance que celle de la résistance à la compression comme illustré dans les figures 4.7, 4.8 et 4.9. On peut mentionner que tous les bétons fabriqués avec du sable concassé SC d'un E/C de 0.5 et 0.6 E/C atteignent une résistance à la flexion supérieure à celle des bétons fabriqués avec du sable naturel SN au jeune âge. A l'âge de 28 jours et 90 jours les valeurs de la résistance des bétons BSN sont similaires aux valeurs des bétons BSC pour les substitutions de 60% et 80% des GBR.

Les résultats rapportés dans la littérature montrent souvent une diminution des résistances à la flexion et à la compression à mesure que la proportion de granulats recyclés (GBR) augmente. Pour remédier à cette limitation, il est recommandé d'incorporer

des matériaux cimentaires supplémentaires, qui renforcent la pâte cimentaire et améliorent son adhésion aux granulats GBR. L'interaction chimique entre ces matériaux cimentaires supplémentaires et le mortier résiduel des GBR contribue à améliorer la zone de transition interfaciale (ITZ).

Aliabdo et al. (2018) ont constaté qu'une réduction de la résistance à la flexion de 18,8 % et 41,2 % pour des substitutions par des granulats recyclés de 50 % et 100 %, respectivement. Cependant, cette diminution est compensée par l'ajout de la fumée de silice, même avec une utilisation à 100 % de granulats recyclés (GBR). Le sable SC, aux particules rugueuses et anguleuses, joue un rôle constructif dans la composition du béton. De plus, la poudre de calcaire contenue dans ce sable comble les vides et augmentant la densité de la matrice, ce qui améliore la résistance mécanique et la durabilité du béton (Bounedjema et al., 2017; Meziane et al., 2015). Pacheco et al. (2019) ont observé une amélioration significative de la résistance à la traction par fendage, compensant les effets négatifs associés à l'utilisation des granulats recyclés (GBR). De plus, ils ont conclu que l'ajout de seulement 15 % de métakaolin suffit à produire un béton durable intégrant 100% de granulats GBR, sans compromettre ses propriétés.

D'après Lohani et al. (2012), la résistance à la flexion du béton contenant 35% de scories reste pratiquement inchangée, même avec une augmentation du taux de substitution des granulats par des GBR. Cela suggère que l'utilisation de matériaux cimentaires complémentaires permet aux mélanges incorporant divers taux de granulats GBR d'afficher un comportement mécanique similaire à celui du béton de référence (Aliabdo et al., 2018 ; Pacheco et al., 2019).

La performance en termes de résistance à la flexion observée dans les résultats des bétons formulés avec du sable SC peut être attribuée à la présence de poudre de calcaire dans ce sable. Cette poudre remplit les vides, libère de l'eau et renforce la densité de l'adhérence entre la nouvelle pâte et le mortier résiduel. Selon certains travaux (Domingo-Cabo et al., 2009), il est possible d'obtenir un gain de 10% à 29% en résistance à la flexion en combinant des granulats recyclés grossiers et fins.

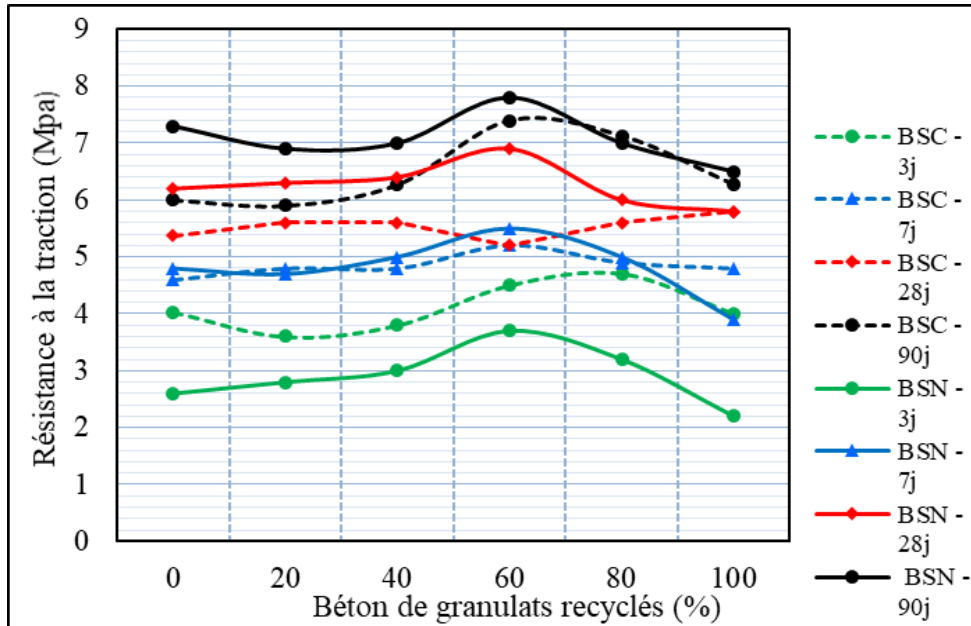


Figure 4.7. Résultats de la résistance à la flexion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.6).

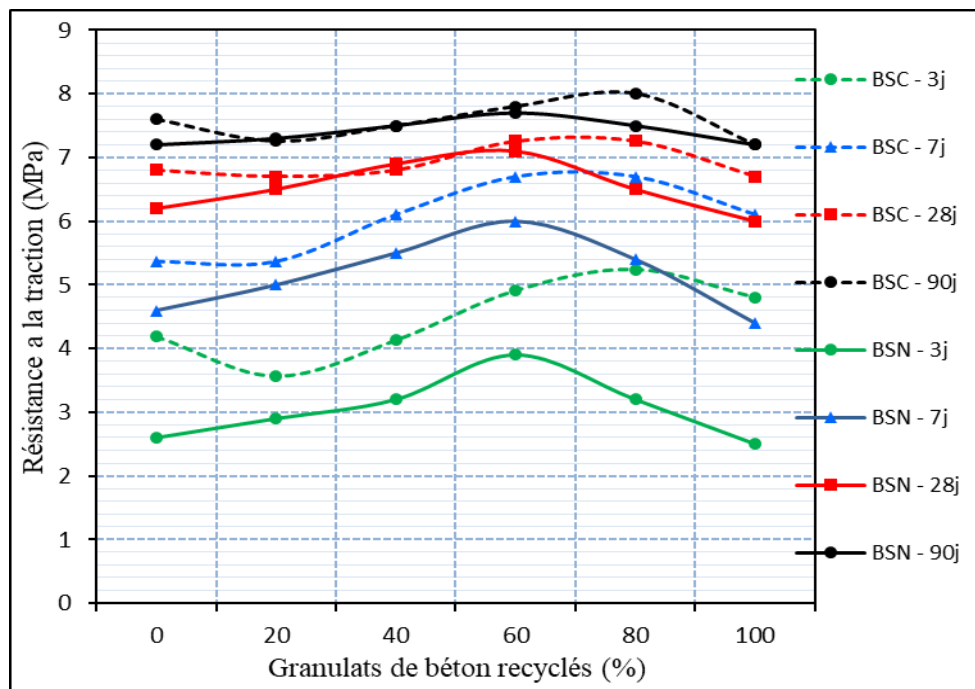


Figure 4.8. Résultats de la résistance à la flexion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable (E/C=0.5).

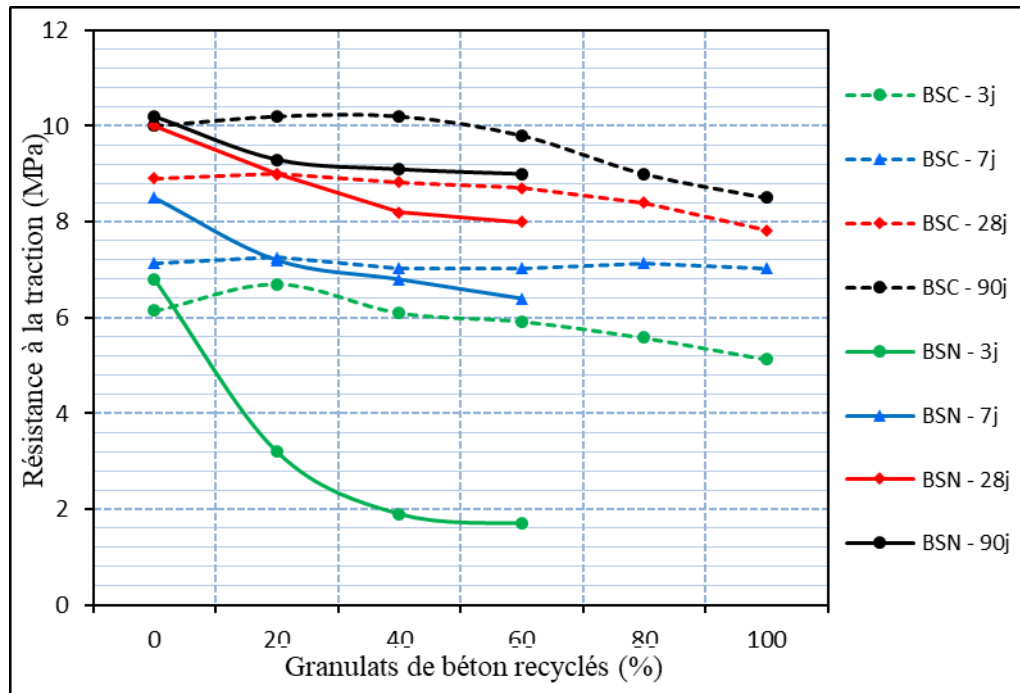


Figure 4.9. Résultats de la résistance à la flexion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable ($E/C=0.4$).

4.5. Modifications sur l'absorption d'eau

La durabilité du béton est généralement liée à sa capacité d'absorption, où l'eau transporte des ions dans le béton, augmentant ainsi le risque de dégradation et de corrosion des armatures. L'absorption d'eau par immersion résulte du mouvement de l'eau dans les pores capillaires du béton ouverts sur le milieu ambiant. En raison de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme indicateur de la qualité du béton. Les figures 4.10 et 4.11 montrent les valeurs d'absorption d'eau par immersion de bétons de granulats recyclés réalisés avec du sable SN et du sable SC. Les résultats obtenus montrent que la teneur en eau absorbée augmente linéairement avec la substitution des GGN par les GBR. Lorsque le béton ordinaire est réalisé avec du sable SN, son absorption après 28 jours de cure atteint 6,1%, alors que cette valeur chute à 3,4% lorsque ce sable est remplacé par du sable SC. Le sable concassé SC contient une poudre plus fine, ce qui aide à combler les pores capillaires et rend la pâte de ciment moins absorbante. Lorsque les granulats GGN sont remplacés par des granulats GBR, l'absorption d'eau du béton augmente de façon linéaire, que ce soit avec le sable SN ou le sable SC.

Selon les corrélations établies, une substitution de 10 % des granulats par des GBR entraîne une augmentation de l'absorption d'eau de 0,25 % et de 0,08 % lorsque le béton est fabriqué avec du sable SN ou SC, respectivement. Le mortier adhérent à la surface des granulats recyclés les rend plus poreux, favorisant ainsi l'absorption d'eau. Lorsqu'on utilise du sable SC, sa teneur en poudre calcaire remplit les vides et enrobe les granulats recyclés, réduisant ainsi leur capacité d'absorption. De plus, la pâte de ciment est plus riche en produits d'hydratation, ce qui la rend plus dense et moins poreuse. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Eckert et Oliveira (2017) où l'absorption d'eau augmente de 15,5 % à 21,1% lorsque les granulats GGN sont remplacés par des granulats GBR. Des recherches antérieures (Le et Bui, 2020) confirment que la qualité des GBR et les rapports eau sur ciment peuvent affecter de manière significative la quantité d'absorption d'eau pour les bétons BGR. Ce phénomène est étroitement lié à la microstructure des zones de transition interraciales (ITZ), anciennes et nouvelles, présentes dans les granulats recyclés (GBR). Bien que l'absorption d'eau augmente avec une teneur croissante en GBR, une tendance inverse a été observée lorsque des matériaux cimentaires complémentaires, tels que les cendres volantes, sont ajoutés au mélange (Kurda et al., 2018).

Les résultats de résistance à la compression, illustrés dans la figure 4.3 et 4.4 indiquent qu'une teneur élevée en granulats GBR peut avoir un effet positif. Toutefois, cet effet bénéfique n'est pas visible dans les résultats d'absorption d'eau, où l'augmentation de la teneur en GBR conduit à une porosité accrue du béton. L'utilisation de sable SC à la place de sable SN peut contribuer à réduire la porosité et à améliorer la résistance mécanique à diverses échelles.

Certains travaux (Kanellopoulos et al., 2014) ont montré que le remplacement des granulats naturels (GGN) par des GBR n'entraîne qu'une faible diminution de 2% de la résistance à la compression, mais provoque une augmentation significative de la porosité de 19%. D'autres études (Da Silva et al., 2023) ont révélé qu'un béton contenant 50% de granulats GBR, 20% de cendres volantes et 10% de chaux hydratée amélioreraient la résistance à la compression de 12,47 % tout en réduisant l'absorption d'eau de 9,87 %. Par ailleurs, il a été constaté (Adessina et al., 2023) qu'une diminution du rapport eau/ciment effectif, passant de 0,42 à 0,35, permet de compenser en partie la perte de résistance à la compression associée à l'utilisation de granulats GBR au lieu de granulats GGO.

Cependant, cette réduction du rapport eau/ciment reste insuffisante pour corriger la porosité accrue et l'absorption d'eau.

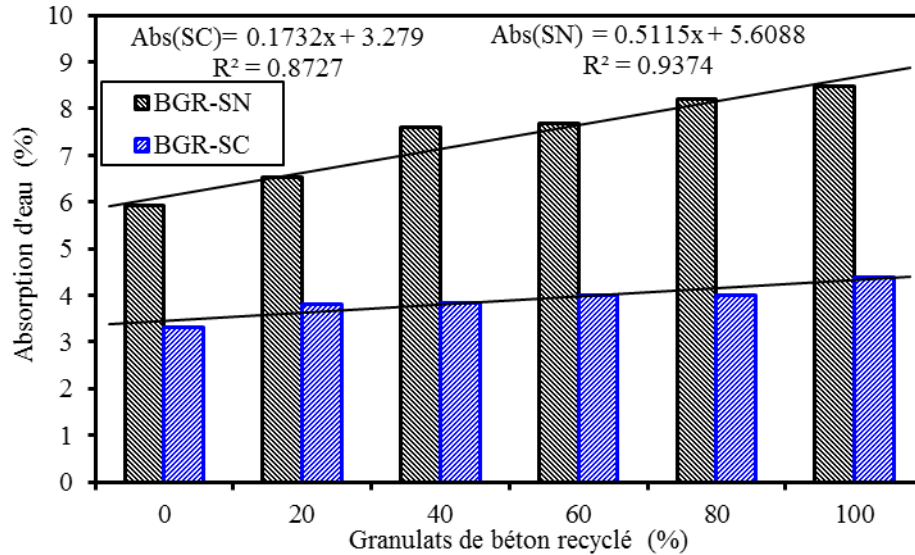


Figure 4.10. Résultats de l'absorption par immersion des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable.

4.6. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons sont résumés dans sur figure suivante 4.11. Selon les résultats, on observe que la porosité augmente avec la présence des granulats de béton recyclé. Ceci est dû à la porosité élevée de ces granulats engendré par la présence d'un mortier attaché poreux.

Il est clair que l'utilisation de sable de concassage, riche en grains fins, diminue cette absorption tant que son taux continue à augmenter. Les valeurs d'absorption sont plus importante à partir de 60% de GBR, à titre d'exemple pour un taux de 0, 20, 40, 60, 80 et 100% de granulat recyclé on enregistre respectivement des valeurs de du coefficient de capillarité de 1.2, 1.25, 1.33, 1.46, 1.93et 1.96 $\text{kg/m}^2/\text{h}^{0.5}$ pour des bétons à base de sable naturel. Ce coefficient devient en substituant le sable naturel par le sable de concassage de 1.17, 1.21, 1.27, 1.35, 1.74 et 1.77 respectivement.

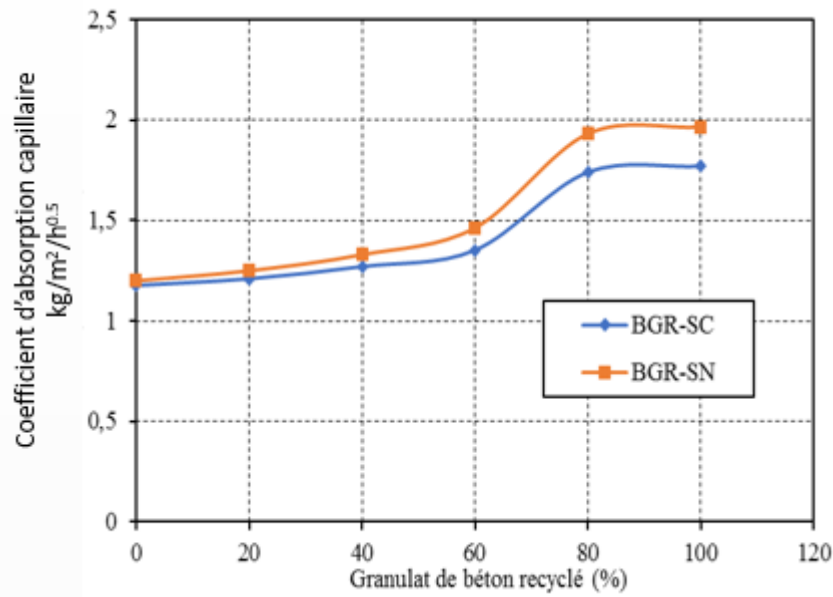


Figure 4.11. Résultats de l'absorption par capillarité des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable.

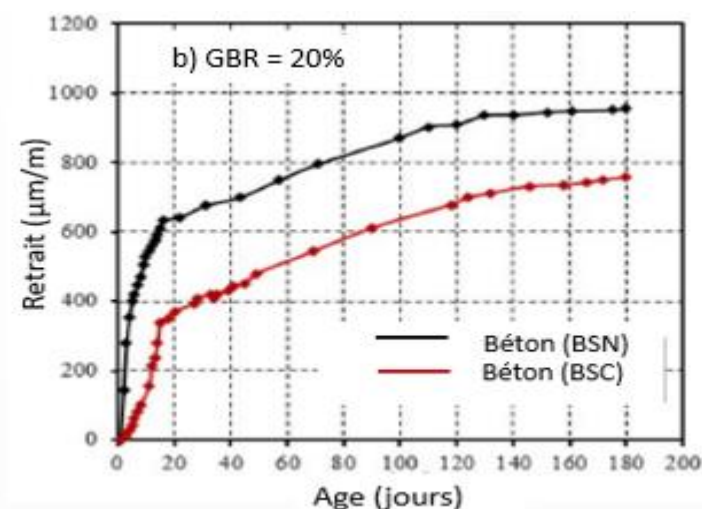
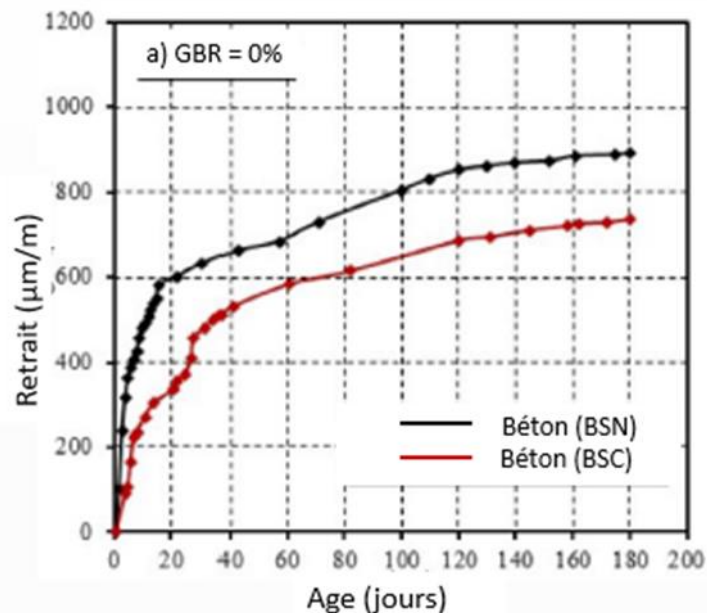
4.7. Modifications apportées sur le retrait

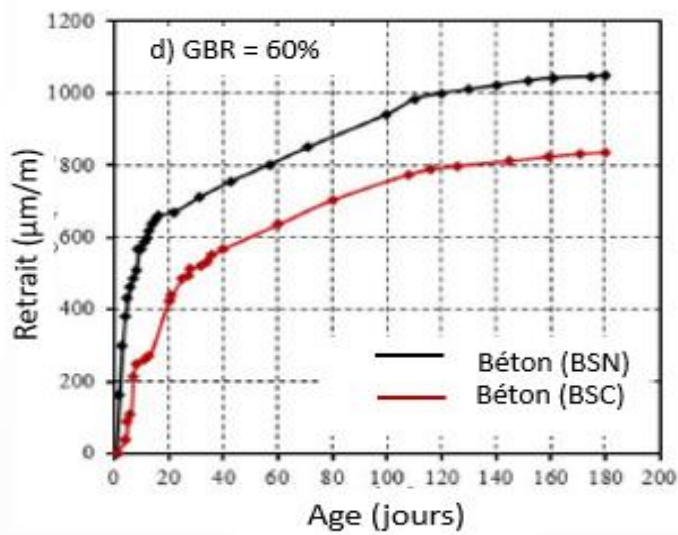
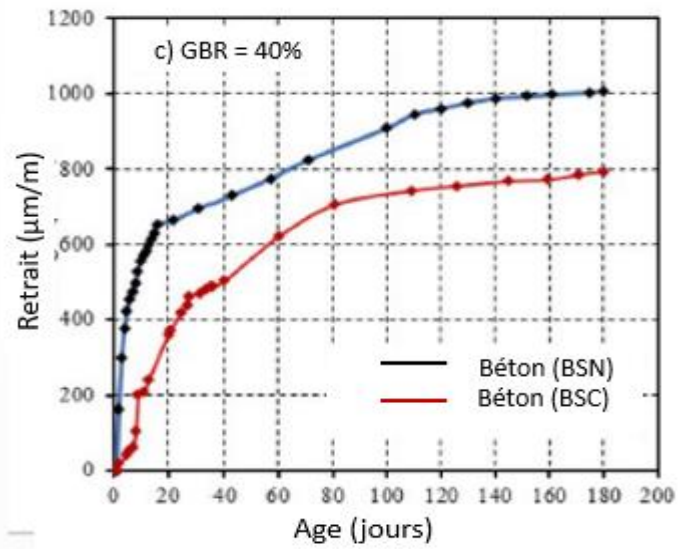
Le retrait du béton est le changement de volume provoqué par le séchage au cours de durcissement. Il est influencé par la composition du béton, les conditions et le milieu de séchage. La figure 4.12 illustre l'évolution du retrait en fonction de l'âge pour les bétons contenant des granulats recyclés, utilisant du sable SN et du sable SC comme granulats fins. On constate que les valeurs du retrait augmentent avec la teneur en GBR, particulièrement pour les proportions les plus élevées. Les augmentations de retrait observées pour le béton contenant des granulats GBR sont en accord avec les résultats rapportés par Wang et al. (2020). Leur étude a montré des hausses allant jusqu'à 19,7 % et 59,6 % pour des bétons incorporant respectivement 50 % et 100 % de granulats GBR, comparée au béton de référence. Par ailleurs, Lahmar et al. (2020) ont également souligné que l'augmentation des valeurs de retrait est corrélée au taux de remplacement croissant des granulats GBR, un phénomène qu'ils attribuent à la porosité plus élevée et au module d'Young plus faible de ces granulats.

Le sable SC, riche en poudre de calcaire, comble les pores et favorise la formation d'une matrice plus dense, limitant ainsi le séchage du béton et réduisant son retrait. Cette observation est corroborée par les travaux d'Itim et al. (2011), qui ont constaté que le retrait du mortier ordinaire progressait plus rapidement après sept jours, se distinguant nettement

de celui des mortiers contenant des déchets poussiéreux. Après six mois, les bétons fabriqués avec du sable SN présentent des retraits de séchage de 890, 1006, 1118 et 1157 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des taux de substitution des granulats GGO par 0 %, 40 %, 80 % et 100 % de granulats GBR. En revanche, pour les mêmes taux de substitution, le retrait ne dépasse pas 736, 794, 910 et 952 $\mu\text{m}/\text{m}$ lorsque le béton est réalisé avec du sable SC utilisé comme granulats fins.

Le béton subit un retrait rapide au un jeune âge en raison de l'excès d'eau dans la pâte de ciment et du déséquilibre avec l'environnement extérieur. Un béton contenant des granulats GBR atteint 50% de son retrait total en 10 jours lorsqu'il est formulé avec du sable SN, et en 25 jours lorsqu'il est fabriqué avec du sable SC.





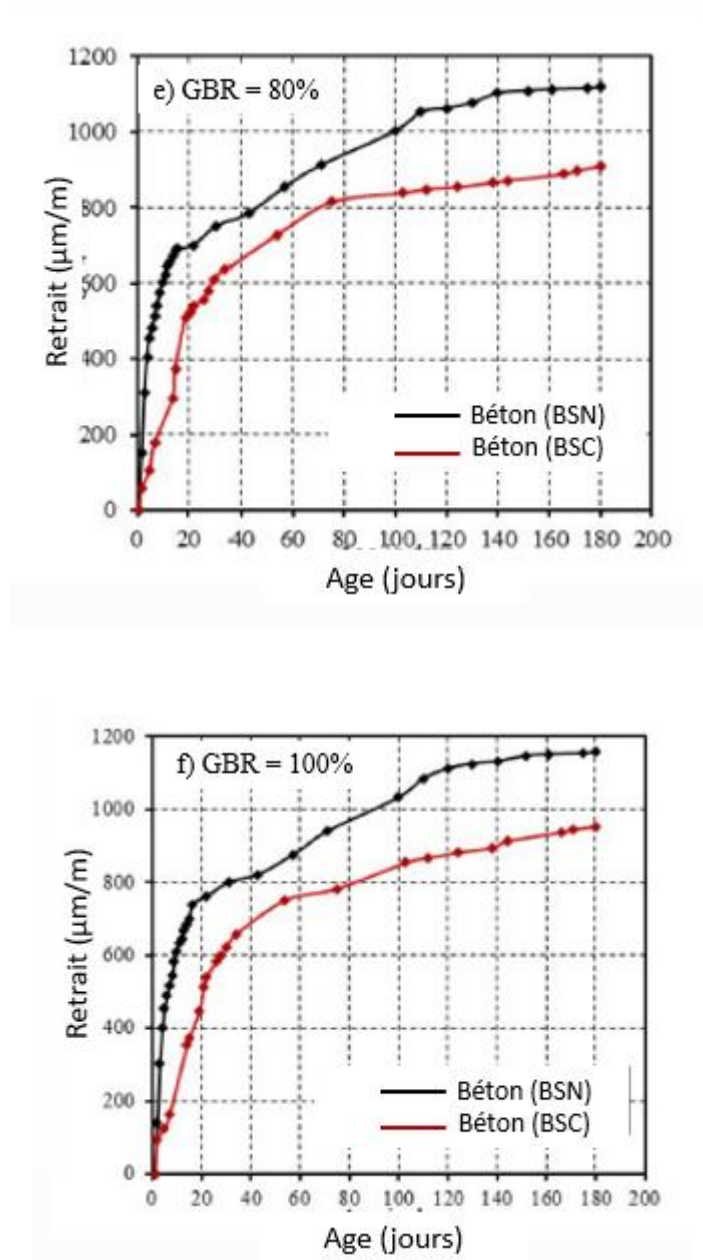


Figure 4.12. Résultats de retrait de séchage des bétons contenant différents taux de GBR avec deux types de sable.

4.7. Validation des résultats

Le béton à base de granulats recyclés est souvent produit avec du sable naturel. Le sable concassé est apparu récemment comme une alternative pour compenser la pénurie de sable SN et préserver les ressources naturelles. Pour une utilisation rationnelle de ce matériau, il est judicieux d'estimer la variation des performances lors de l'utilisation d'un sable plutôt qu'un autre. Pour y parvenir, les propriétés de ces deux bétons ont été comparées et des relations ont été déduites afin de tirer des conclusions pratiques. Il ressort clairement de ces relations que les performances d'un béton à base de sable SC peuvent

être estimées si seulement celles d'un béton à base de sable SN sont connues. Les coefficients de détermination sont élevés, ce qui encourage cet objectif.

4.7.1. Comparaison des besoins en superplastifiant

La figure 4.13 illustre la quantité de superplastifiant nécessaire pour les deux bétons à base de granulats recyclés. Il est évident que le béton contenant du sable SC nécessite moins de superplastifiant pour atteindre la consistance souhaitée. Selon la relation établie dans la figure 4.13, la quantité de superplastifiant nécessaire pour le béton à base de granulats recyclés contenant du sable SC est exprimée en fonction de celle du béton avec du sable SN comme suit :

$$Sp_{SC} = 1.23 (Sp_{SN})^{1.42} \quad (1)$$

Avec Sp_{SC} et Sp_{SN} représentant respectivement les quantités de superplastifiant nécessaires pour le béton avec du sable SN et celui contenant du sable SC. Pour maintenir la même ouvrabilité avec un béton à base de granulats recyclés fabriqué avec du sable SC, il est possible de réduire de **0,05 %** la quantité de superplastifiant lorsque le béton contient une faible proportion de granulats recyclés (GBR), et jusqu'à **0,08 %** lorsque le béton est entièrement composé de granulats recyclés (GBR).

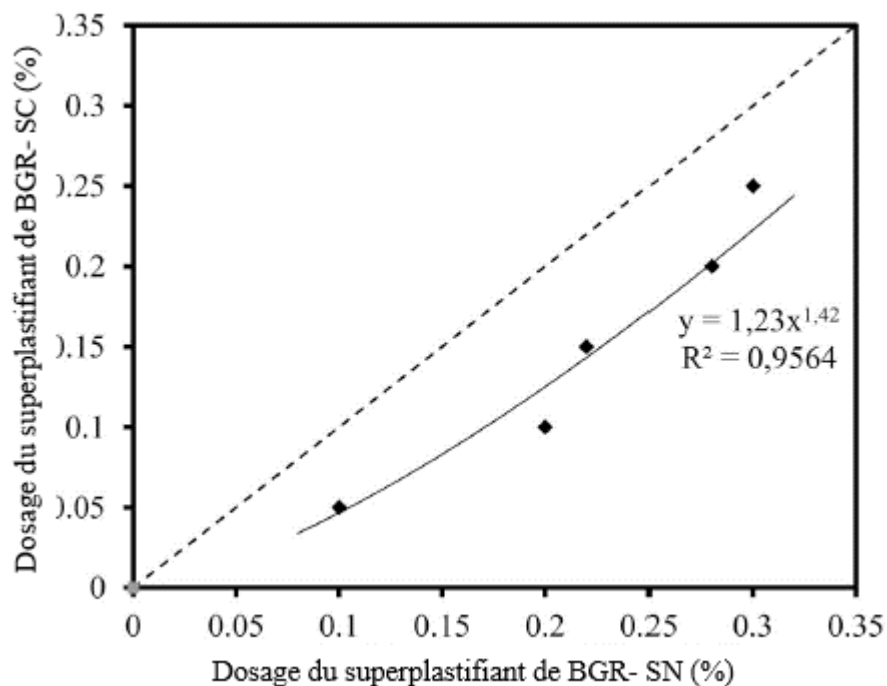


Figure 4.13. Comparaison des dosages de superplastifiant du béton BGR à base de sable SN avec celui à base de sable SC.

4.7.2. Comparaison des résistances à la flexion

En comparant les résultats de la résistance à la flexion des deux bétons, une relation est obtenue comme le montre la Figure 4.14. Il est très clair que le sable SC confère au béton une résistance à la flexion plus élevée par rapport à celle du béton contenant du sable SN. La relation puissance obtenue entre les résistances des deux bétons est exprimée comme suit :

$$S_{f\ SC} = 1.64 (S_{f\ SN})^{0.75} \quad (2)$$

Où $S_{f\ SN}$ et $S_{f\ SC}$ représentent respectivement les résistances à la flexion des deux bétons fabriqués avec du sable SN et du sable SC. La relation de puissance indique une augmentation de 40 % de la résistance au jeune âge, sans différence significative à long terme. Cela met en évidence l'effet important de la poudre de calcaire présente dans le sable SC, qui améliore le développement de la résistance du béton au jeune âge. A long terme, la résistance à la flexion avec les deux types de sable converge vers une même valeur de résistance.

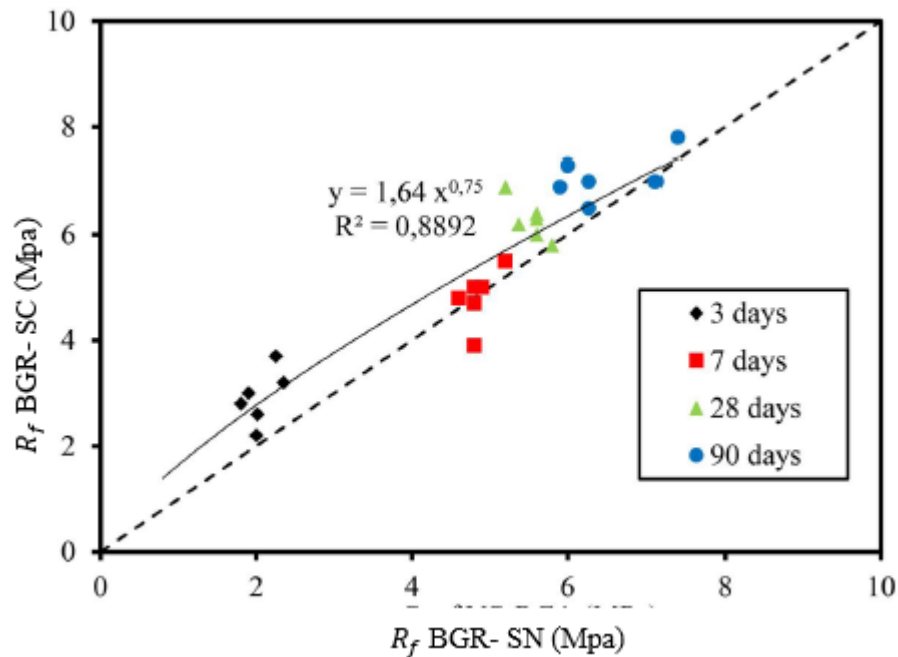


Figure 4.14. Comparaison entre la résistance à la flexion du BGR à base de SN et de SC.

4.7.3. Comparaison des résistances à la compression

La figure 4.15 fournit une prédiction des résistances à la compression du béton de granulats recyclés fabriqué avec du sable SC par rapport à celui fabriqué avec du sable SN. La relation exponentielle trouvée est simple, facile à utiliser et offre une précision acceptable, avec un coefficient de corrélation proche de l'unité. Une différence de 7 MPa est observée au jeune âge, qui diminue à seulement 3 MPa à long terme. Cette corrélation des résultats révèle que le sable QWS offre un gain de résistance considérable par rapport au sable NS, avec son effet maximal observé à un âge précoce. L'expression de cette relation est donnée par :

$$R_{C\ SC} = 13.5 e^{0.03R_{C\ SN}} \quad (3)$$

Où $R_{C\ SC}$ et $R_{C\ SN}$ représentent les résistances à la compression des bétons fabriqués respectivement avec du sable SN et du sable SC.

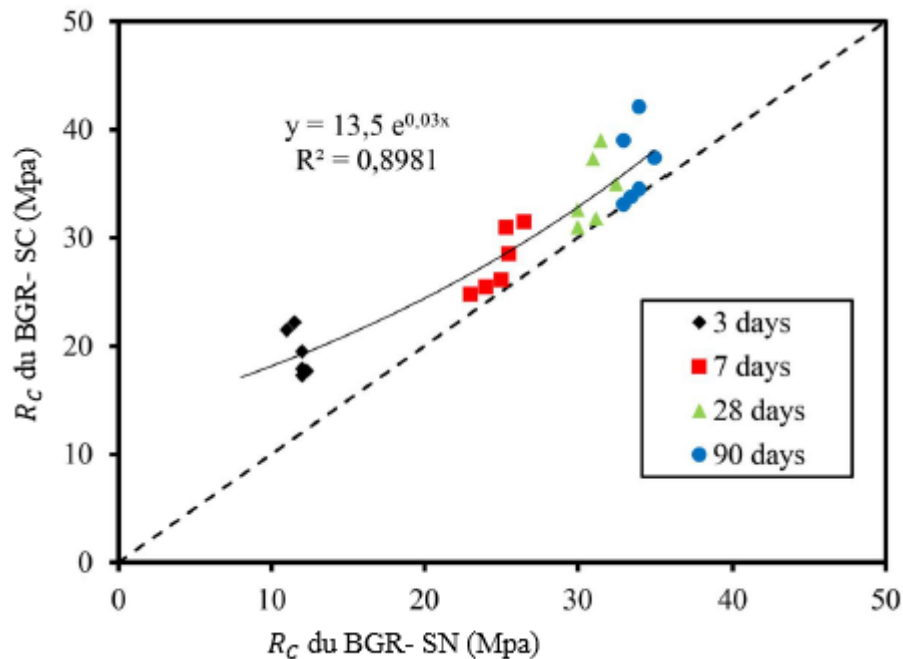


Figure 4.15. Comparaison entre la résistance à la compression du BGR à base de SN et de SC.

4.7.4. Comparaison de l'absorption d'eau

La figure 4.16 montre la variation de l'absorption d'eau du béton à granulats recyclés conçu avec du sable SC par rapport à celui conçu avec du sable SN. Une relation linéaire simple est déduite avec un bon coefficient de corrélation. Cela permet de prédire l'absorption d'eau dans le béton BGR à base de sable SC en utilisant l'équation suivante :

$$Abs_{SC} = 0.32 Abs_{SN} + 1.5 \quad (4)$$

Où Abs_{SN} et Abs_{SC} représentent l'absorption d'eau des deux bétons réalisés avec les sables SN et SC, respectivement. Il est évident que la présence de sable SC apporte une plus grande compacité et une pâte plus dense, ce qui entraîne une diminution de la pénétration de l'eau. Lorsque du sable SC est utilisé, l'absorption d'eau diminue de 45 % pour le béton ordinaire et de 48 % pour le béton contenant 100 % de GBR.

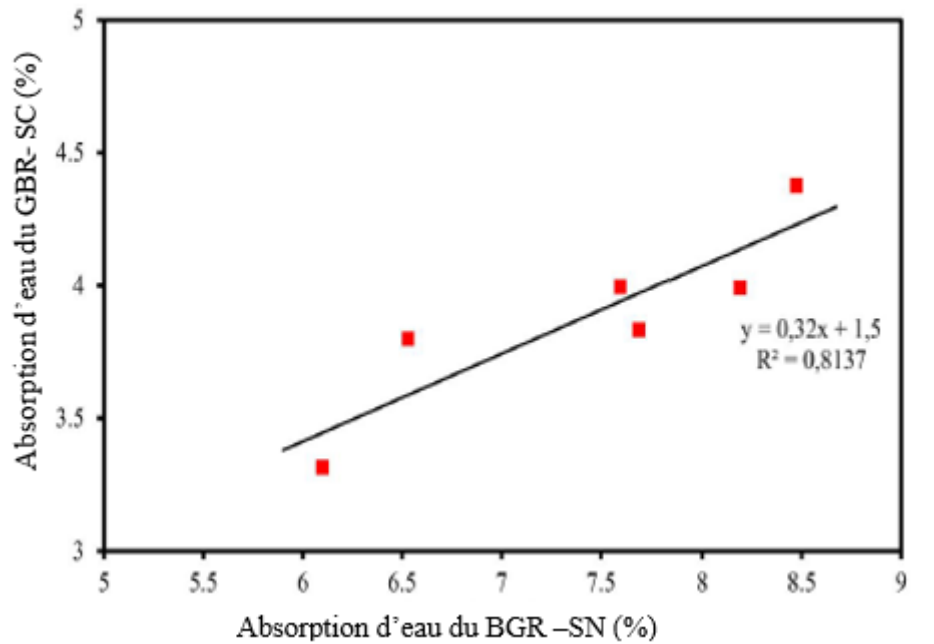


Figure 4.16. Comparaison entre l'absorption d'eau des BGR à base de sable SN et de SC.

4.7.5. Comparaison des retraits

La figure 4.17 montre une comparaison entre les valeurs de retraits des deux bétons à base de granulats GBR, l'un avec du sable SN et l'autre avec du sable SC. Les résultats indiquent clairement une diminution du retrait lors de l'utilisation du sable SC. La structure rugueuse du sable empêche la déformation libre du retrait, et sa teneur en fines densifie la matrice cimentaire, la rendant plus rigide. La relation entre les deux retraits peut être exprimée par une relation linéaire qui enregistre une différence de 280µm à sept jours, et converge vers 150µm à 180 jours. Cette relation s'exprime comme suit :

$$Rt_{SC} = 1.2 Rt_{SN} - 380 \quad (5)$$

Où Rt_{SN} et Rt_{SC} représentent la déformation par retrait des deux bétons fabriqués respectivement avec du sables SN et du SC.

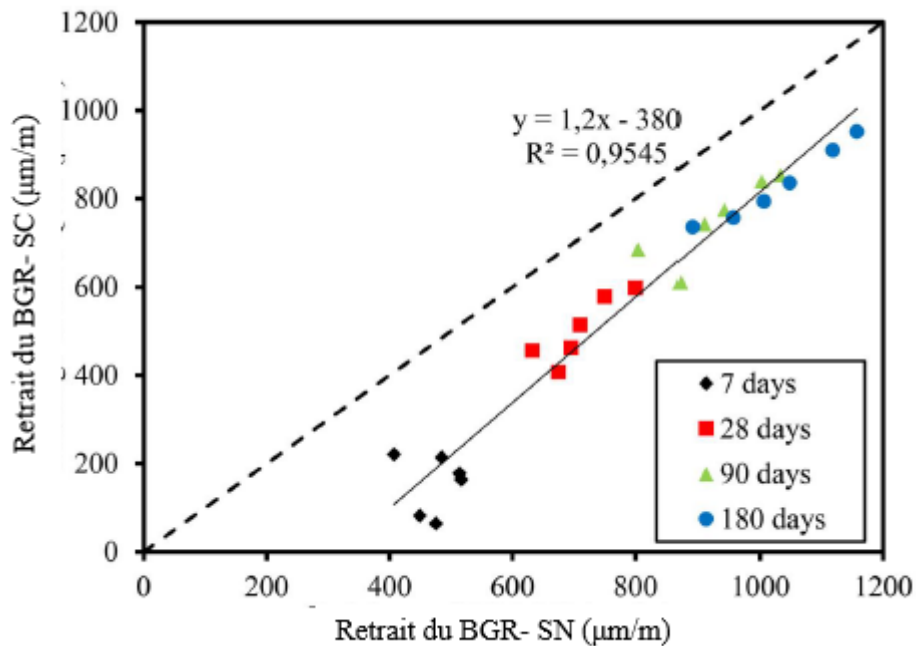


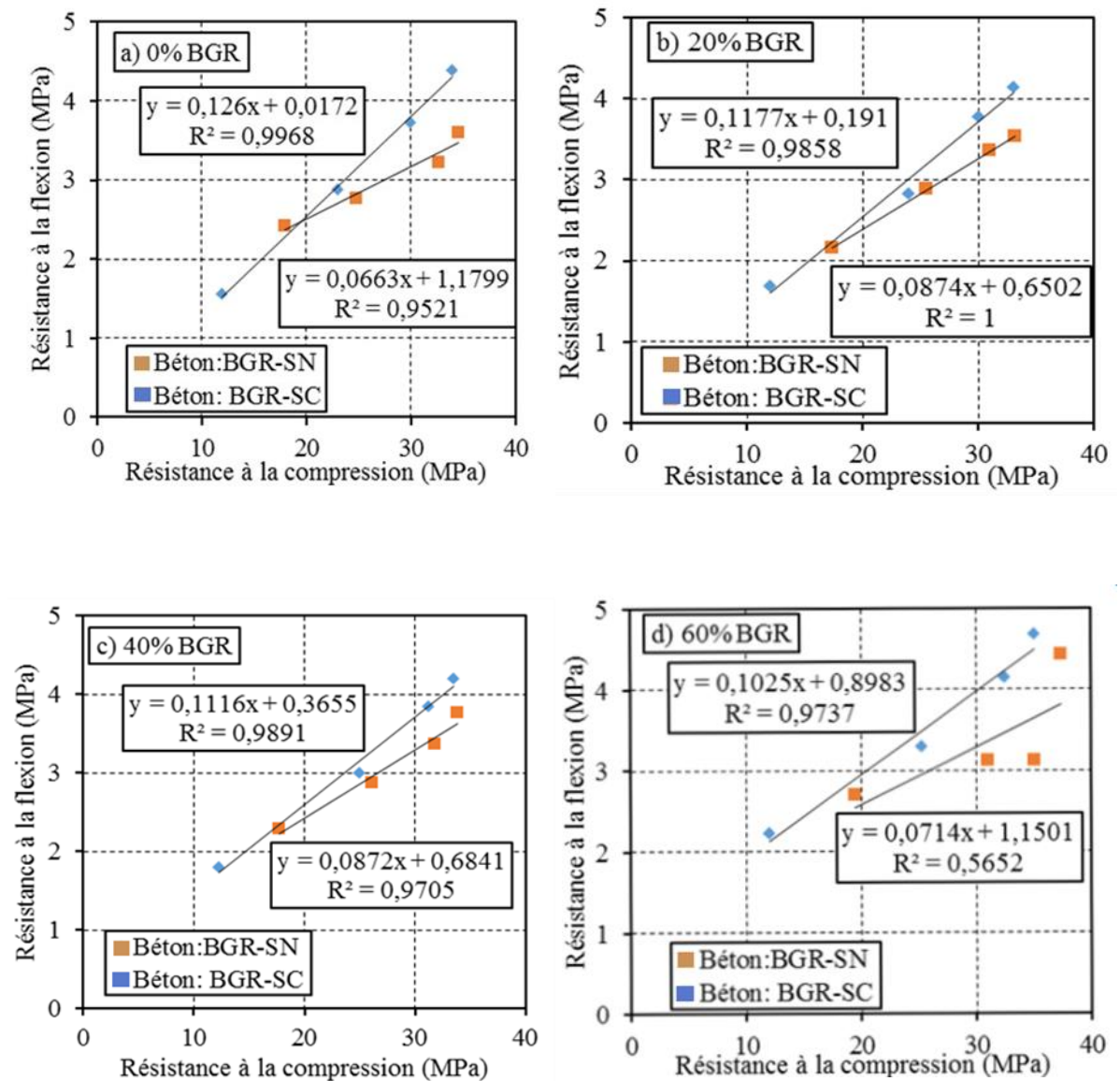
Figure 4.17. Comparaison entre les déformations du retrait des bétons BGR-SN et BGR-SC.

4.8. Corrélation de la résistance à la flexion

Pour une bonne maîtrise des performances d'un béton à base granulats recyclés, il est souhaitable d'étudier la variation de la résistance à la traction en fonction de celles à la compression. Pour cela, on doit convertir les résultats obtenus de la résistance à la flexion

par des résistances à la traction simple en les multipliant par un coefficient de 0,6 qui prend en compte la plasticité du béton dans la phase de rupture [44].

Pour le béton formulé avec un rapport eau sur ciment de 0,6, on trace pour chaque teneur en GBRR la variation des résistances à la traction en fonction de celles à la compression. La figure 4.18 illustre cette variation pour les douze bétons testés ; une partie avec un sable naturel et l'autre avec un sable concassé.



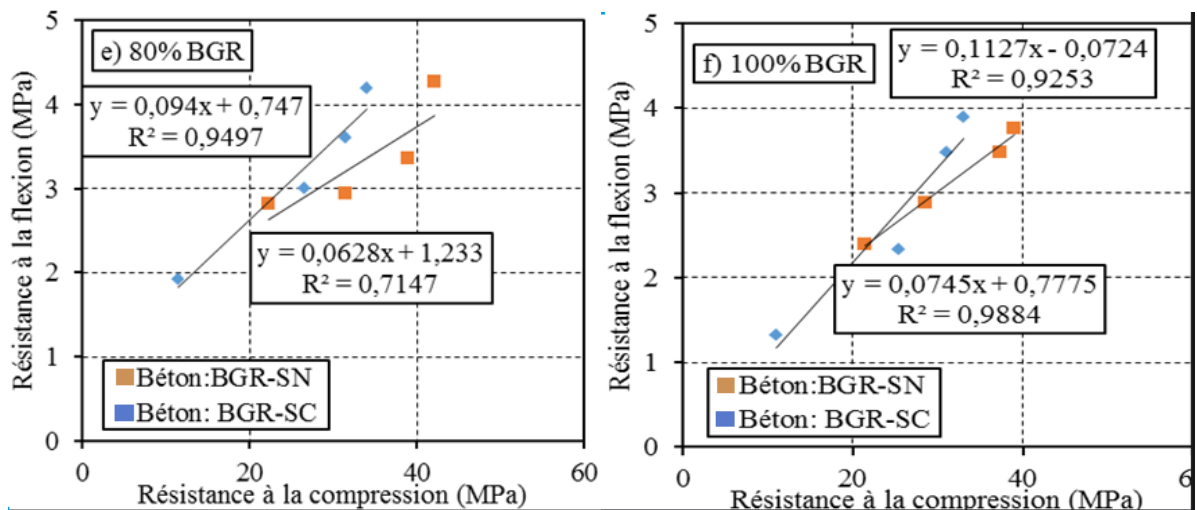


Figure 4.18. Variation des résistances à la traction en fonction de celles à la compression pour un béton à base de BGR-SN-SC.

Selon la gamme des résistances testées, il s'avère que la relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression reste linéaire donnant un coefficient de détermination très élevé et même très proche de l'unité. Des relations illustrées sur la figure 4.18, la présence du sable concassé donne un avantage considérable des résistances à la traction surtout pour des résistances à la compression dépassant les 20 MPa.

Pour mieux visualiser cet effet, on trace sur les figures 4.19 et 4.20 le rapport de la résistance à la traction des deux bétons conçus avec le sable naturel et le sable de concassage. Ce rapport peut être tracé en fonction de la variation de R_c (résistance à compression) et GBR (taux de granulats recyclés) conformément à la relation ci-dessous :

$$k = \frac{\text{Résistance à la traction (SC)}}{\text{Résistance à la traction (SN)}} = f(R_c) = f(\text{BGR})$$

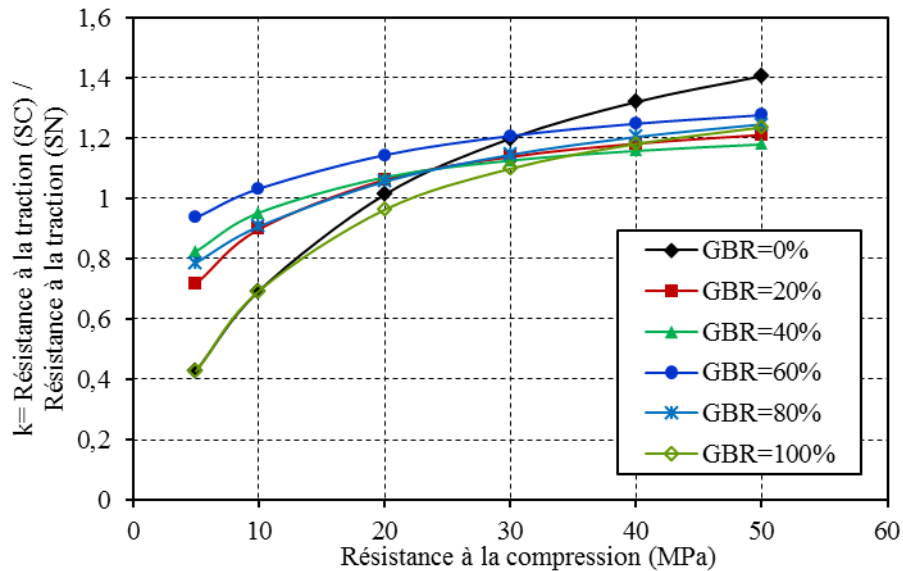


Figure 4.19. Variation du coefficient k en fonction de la résistance à la compression.

La variation du coefficient k en fonction de la résistance à la compression montre un effet croissant telle qu'au-delà de 20 MPa tous les bétons à base de sable concassé possèdent une résistance à la traction 20 à 40% supérieure à celle d'un béton avec le sable naturelle. Pour les bétons de faible résistance, le sable naturel génère des résistances à la traction nettement élevées et en particulier lorsque la teneur en GBR est faible.

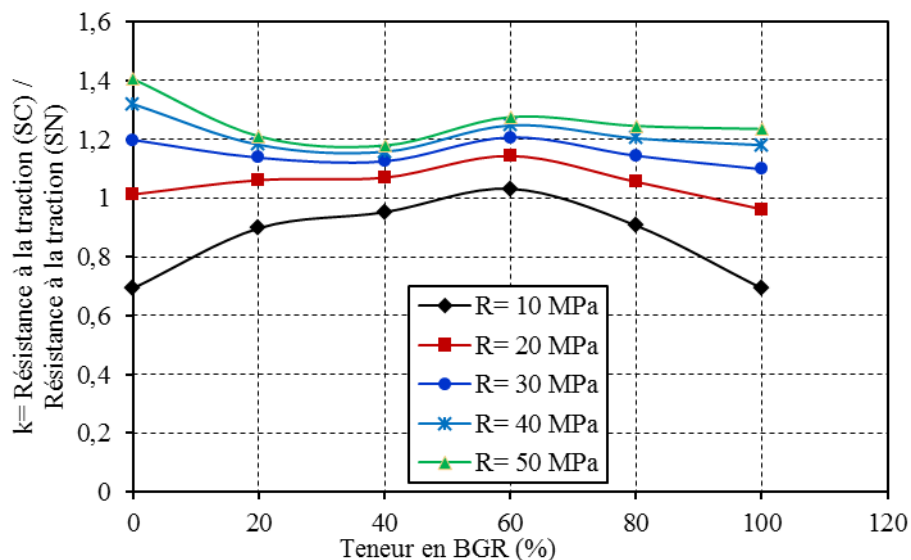


Figure 4.20. Variation du coefficient k en fonction de la teneur en GBR

La variation du coefficient k reste dépendante de la teneur en GBR où le taux de 60% semble procéder le plus grand avantage. Les bétons de plus de 20MPa de résistance à la

compression présente un rapport k optimale autour de 60% de GBR. Pour ce taux les effets de ce gravier GBR et du sable SC engendrent leur plus grande contribution.

4.9. Conclusion

Cette étude a mis en lumière l'effet du remplacement du sable naturel (SN) par du sable concassé (SC), dans un béton avec différents taux de granulats de béton recyclé (GBR). Les caractéristiques du béton à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (résistance à la flexion, résistance à la compression, absorption et retrait de séchage) ont été déterminées. Elle a également examiné l'impact du superplastifiant sur ces différents paramètres. Les résultats indiquent que la substitution du SN par le SC rend la baisse de performance du béton à base de GBR moins grave.

Les résultats obtenus montrent que la présence de sable concassé (SC) dans la formulation du béton améliore l'ouvrabilité tout en réduisant la teneur nécessaire en superplastifiant, grâce à la présence de fines calcaires dans le sable concassé (SC), ainsi qu'à la forme et à la texture de ce dernier, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à base de granulats recyclés (GBR) sont renforcées.

Conclusions générales

Conclusion générale

Cette étude a été réalisée afin d'évaluer la faisabilité d'utiliser des déchets de carrière comme granulats fins dans la formulation de bétons à base de granulats recyclés. Douze mélanges de béton ont été testés, combinant différents taux de granulats recyclés (GBR) et deux types de sable. L'objectif de cette étude expérimentale était d'analyser l'évolution de l'ouvrabilité, de la résistance mécanique, de l'absorption d'eau et du retrait pour deux séries de bétons. Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être formulées.

Le sable des déchets de carrière peut être récupéré et utilisé comme granulat fin dans le béton fabriqué. Ce sable, riche en poudre de calcaire, accélère considérablement l'hydratation du ciment et améliore sa matrice durcie. De plus, sa forme rugueuse résultant du concassage des roches favorise une forte adhésion avec la nouvelle pâte de ciment. De même, son utilisation dans le béton BGR rend les baisses de performances moins prononcées et non inquiétantes.

L'utilisation du sable SC comme granulats fins réduit le dosage de superplastifiant de 15 à 50 % par rapport au béton avec du sable SN. Pour une même ouvrabilité, les bétons fabriqués avec du sable SN et contenant 60 % et 80 % de granulats GBR nécessitent respectivement un dosage de 0,22 % et 0,28 % de superplastifiant. Si le sable SC remplace le sable SN dans la formulation des bétons, ces dosages sont réduits à seulement 0,15% et 0,2% pour les mêmes bétons.

À l'âge de 3 jours, la teneur en granulats GBR n'a aucun impact sur la résistance à la compression du béton lorsqu'il est combiné avec le sable SN. Cependant, cet effet devient significatif lorsque le sable SC est utilisé avec une teneur en GBR dépassant 60 %. Après 28 jours, on observe un effet limité du type de sable sur la résistance à la compression des bétons contenant moins de 50% de granulats GBR. Toutefois, à mesure que ce pourcentage augmente, l'influence du type de sable s'intensifie, et le béton formulé avec du sable SC atteint une résistance 1,2 fois supérieure à celle du béton utilisant du sable SN.

Pour le béton de référence (sans GBR), le sable SC améliore la résistance du béton avec une résistance à la flexion 1,3 et 1,15 fois supérieure à celle du béton avec du sable SN à 3 jours et 28 jours, respectivement. Lorsque le béton est réalisé avec 60 % de granulats GBR, la résistance à la flexion est respectivement 1,3 et 1,6 fois supérieure pour le béton réalisé avec du sable SC par rapport à celui réalisé avec du sable NS aux mêmes âges.

L'utilisation du sable SC au lieu du sable SN réduit la porosité du béton d'environ 44 %. De plus, 10% de granulats GBR qui se substituent aux granulats GGO entraînent une augmentation de l'absorption de 0,25% et 0,08% respectivement pour le sable SN et le sable SC.

Le sable SC à haute teneur en poudre de calcaire remplit les pores et conduit à une matrice plus compacte qui réduit le séchage du béton et donne un béton à faible retrait. Un béton à base de granulats GBR atteint un retrait total de 50 % en 10 jours lorsqu'il est formulé avec du sable SN, alors qu'il met 25 jours lorsque ses granulats fins sont à base de SC.

Plusieurs relations peuvent être déduites pour prédire certaines propriétés du béton à base de sable SC en fonction des propriétés du béton à base de SN. Ces relations se caractérisent par un coefficient de corrélation très élevé, permettant de quantifier le gain apporté par l'utilisation de ce sable. Bien que les équations proposées soient spécifiques aux résultats trouvés dans cette étude, elles indiquent un ordre de grandeur des variations de performances rencontrées lors de l'utilisation d'un sable SC au lieu d'un sable SN.

A la fin de ce travail, on suggère pour des futures recherches de continuer à valoriser les granulats de béton recyclé en faisant leur combinaison avec d'autres types de sable et d'autres additions minérale. L'effet synergique de combiner plusieurs types de matériaux contribue à minimiser le déficit souvent rencontré de ce type de béton (BGR).

De même, ce béton nécessite une recherche approfondie concernant son comportement dans un climat chaud et surtout vis-à-vis des chlorures, des sulfates et de la carbonatation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Adessina, Ayodele , Ben Fraj, Amor, Barthélémy, Jean-François. (2023). Improvement of the compressive strength of recycled aggregate concretes and relative effects on durability properties. *Construction and Building Materials*, 384, 131447.
- Adjoudj, M'hamed., Ezziane, Karim., Kadri, El Hadj., Ngo, Tien-Tung ., Kaci, Abdelhak. (2014), Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer, *Construction and Building Materials*, 70, 2014, 549-559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.111>
- Ait Mohamed Amer, Adem., Ezziane, Karim., Adjoudj, M'hamed. (2021), Evaluation of coarse recycled concrete aggregates effect on the properties of fresh and hardened concrete. *Asian J. Civ. Eng.*, 22(6), 1173–1184.
- Ait Mohamed Amer, Adem., Ezziane, Karim., Bougara, Abdelkader., Adjoudj, M'hamed., (2016), Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 123, 300–308.
- Al-Bayati, Hanaa Khaleel, Alwan., Das, Prabir Kumar., Tighe, Susan L., Baaj, Hassan., (2016), Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 112, 284-298.
- Aliabdo, Ali A., Abd Elmoaty, Abd Elmoaty M., Fawzy, Ahmed M. (2018), Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 193, 105–127.
- Alshahwany, Rana Burhan Abdurrahman. (2011), Effect of partial replacement of sand with limestone filler on some properties of normal concrete, *Al-Rafidain Eng. J.*, 19(3), 37-48.
- Aslam, Muhammad Shahzad., Huang, Beijia., Cui., Lifeng. (2020), Review of construction and demolition waste management in China and USA, *J. Env. Manag.*, 264, 110445.
- ASTM C -33. Standard Specification for Concrete Aggregates, 17aut 2023.
- ASTM C642-13 (2022), Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete; 3p. (13/1/2022)
- Bai, Guoliang., Liu, Chao Zhu Chao ., Liu, Biao. (2020), An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Constr. Build. Mater.*, 240, 117978.
- Beixing, Li , Guoju, Ke , Mingkai, Zhou. (2011), Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion, resistance of pavement cement concrete, *Constr. Build. Mater.*, 25(10), 2011, 3849-3853.
- Benabed, Benchaa., Kadri, El-Hadj., Azzouz., Lakhdar. Kenai, Said. (2012), Properties of self-compacting mortar made with various types of sand, Cement and Concrete Composites, V 34, pp:1167–1173.
- Bhat, Javed Ahmad., (2021), Effect of strength of parent concrete on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1462-1469.
- Bilan des activités minières, (2010), Direction générale des mines, ministères des l'énergie des Mines. 104p.

- Bouarroudj, Mohamed ElKarim., Remond, Sébastien., Michel, Frédéric., Zhao, Zengfeng., Bulsteel, David., Courard, Luc.. (2019). Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. *Materials and structures*, 52, 1-14.
- Boukhelkhal, A., (2012), *Rhéologie, Caractérisation Physico-Mécanique et Durabilité des Bétons Autoplaçants à Base de la Poudre de Marbre*, Doctoral Dissertation, Université de
- Boukhelkhal, Aboubakeur., Azzouz, Lakhdar., Said, Kenai., Kadri, El-Hadj., Benabed, Benchaâ. (2019). Combined effects of mineral additions and curing conditions on strength and durability of self-compacting mortars exposed to aggressive solutions in the natural hot-dry climate in North African desert region. *Construction and Building Materials*, 197, 307-318.
- Boundedjema, Yassine., Ezziane, Karim., Hallal, Ahmed., (2017), Variation of mechanical and rheological properties of mortar by replacement of natural sand with crushed sand, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(2), 182-201.
- Buck, Alan.D., (1977), Recycled concrete as a source of aggregate, *ACI Journal*, 74(5), 212–219.
- Çelik, Tahir , Marar, Khaled. (1996), Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(7), 1121–1130.
- Coussot, Philippe., (1993), *Rhéologie des boues et laves torrentielles - Etudes de dispersions et suspensions concentrées*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et *Etudes du Cemagref*, 182p.
- Da Silva, Sérgio Roberto., de Brito, Jorge., de Oliveira Andrade, Jairo José. (2023). Synergic effect of recycled aggregate, fly ash, and hydrated lime in concrete production. *Journal of Building Engineering*, 70, 106370.
- De Juan, Marta Sánchez., Gutiérrez, Pilar Alaejos. (2009), Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 23:872-877.
- Ding, Xinxin., Li, Changyong., Xu, Yangyang., Li, Fenglan., Zhao, Shunbo. (2016), Experimental study on long-term compressive strength of concrete with manufactured sand. *Constr. Build. Mater.*, 108, 67-73.
- Directives 2008/98/CE (2008), Directives du parlement européen et du conseil du 19/11/2008, Relative aux déchets.
- Domingo-cabo, Alberto, Lazaro, Carlos., Lopez Gayarre, Fernando., Serrano-López, M.A., Serna, P., Castaño-Tabares, J.O., (2009), Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23(7), 2545-2553.
- Duan, Zhen Hua., Poon, Chi Sun. (2014), Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Mater. Des.* 58:19-29.
- Eckert, Matthias., Oliveira, Miguel. (2017), Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology, *Constr. Build. Mater.*, 133, 416-424.
- EN 12350-2, Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement - Avril 2012.
- EN 12390-2, Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance - Avril 2012.

- EN 13057, Essais pour béton durci : mesure de l'absorption capillaire janvier 2022.
- EPA, (2018), Construction and Demolition Debris in USA, www.epa.gov.
- Etxeberria, Miren., Vázquez, E., Marí, A., Barra. M., (2007), Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Res.*, 37:735-742.
- Falek, K. A. K. K., Aoudjane, Keireddine., Kadri, El-Hadj. (2017), Effect of recycled aggregates on the mechanical and rheological properties of concrete, *Wulfenia journal*, Vol 24, No. 3;Mar 2017, 159-170
- Fate, Swapniel. S. (2014), Concrete with Smart Material (Manufactured Crushed Sand)-A Review, *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 27-29.
- Fonseca, N., De Brito, Jorge., Evangelista, Luis., (2011), The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637-643.212–219.
- Gesoglu, Mehmet., Güneyisi, Erhan.,Öz, Hatice.Öz., Taha, Ihsan., Yasemin, Mehmet.Taner. (2015), Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 98, 334-344.
- Güneyisi, Erhan., Gesoglu, Mehmet., Algin, Zeynep ., Yazıcı, Halit. (2016). Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 113, 622-630.
- He, Zhi.Hai., Hu, Hai.Bo., Casanova, Ignasi., Liang, Chaw.Feng., Du, Shi.Gui., (2020), Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*,254, 119312.
- Huang Yamei., Wang Lihua., (2017), Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete, *Procedia Engineering*, 210 (2017) 87–92, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.052>.
- Itim, Ahmed., Ezziane, Karim., Kadri, El-Hadj., (2011), Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 3603–3609, <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055>
- Kanellopoulos, Antonios ., Nicolaidis, Demetrios ., Petrou, Michael F. (2014), Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*,53, 253– 259.
- Kapoor, Kanish., Singh, S.P., Singh, Bhupinder. (2020), Permeability of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and Portland cement-fly ash-silica fume binder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 10(4), 213-239.
- Kapoor, Kanish., Singh, S.P., Singh, Bhupinder., (2021), Permeability of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and Portland cement-fly ash-silica fume binder. *Journal of Sustainable Cement- Based Materials*, 10(4), 213–239.
- Kazmi, Syed. Minhaj.Salim., Munir, Mohamed.Junaid., Wu, Yu.Fei., Patnaikuni, Indubhushan ., Zhou, Yingwu ., Xing, Feng., (2020), Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. *Constr. Build. Mater.*,264, 120284.
- Kenai, Said., Debieb, Farid., (2011), Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés abase de gros et fins granulats de briques et de béton concassés Characterization of the

- durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates. *Materials and structures*, 44, 815-824.
- Kim, Jeonghyun, (2022), Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr. Build. Mater.*, 328, 127071.
- Kou, Shi Cong., Poon, Chi Sun ., (2013), Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 37, 12–19.
- Kumar, N. Venkata Sairam., (2021), Crushed rock dust as filler material in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1714-1719.
- Kurda, Rawaz., de Brito, Jorge., Silvestre, José. D., (2018), Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios. *Magazine of Concrete Research*; 70:204-216.
- Lahmar, Nassira., Bouziadi, Farid., Boulekbache, Bensaid., Meziane, El-Hadj., Hamrat, Mostefa., Haddi, Abdelkader., Djelal, Chafika., (2020), Experimental and finite element analysis of shrinkage of concrete made with recycled coarse aggregates subjected to thermal loading *Constr. Build. Mater.*, 247, 118564.
- Le, Hoai Bao., Bui, Quoc Bao., (2020), Recycled aggregate concretes—a state-of-the-art from the microstructure to the structural performance. *Constr. Build. Mater.*, 257, 119522.
- Li, Beixing., Ke, Guoju., Zhou, Mingkai., (2011), Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete, *Constr. Build. Mater.*, 25(10), 3849–3853.
- Li, Chenzhi ., Jiang, Linhua ., Xu, Ning ., Jiang, Shaobo ., (2018), Pore structure and permeability of concrete with high volume of limestone powder addition. *Powder Technology*, 338, 416-424.
- Lohani, T.K., Padhi, M., Dash, K.P., Jena, S., (2012), Optimum utilization of quarry dust as partial replacement of sand in concrete. *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res*, 1(2), 391-404.
- Loi N° : 05-12/2005., (2005), Relative au l'utilisation de sable concassé dans le domaine du bâtiment. (Journal officiel de la république Algérienne N° 60.
- Lotfy, Abdurrahman., Al-Fayez, Mahmoud., (2015), Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 61, 36-43
- Ltifi, Mounir., Zafar, Idrees., (2022), Effect of total substitution of crushed limestone sand on concrete durability. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(1), 121-143.
- Mahakavi, P., Chithra, R., (2020), Effect of recycled coarse aggregate and manufactured sand in self compacting concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 21(1), 33-43.
- Mardani Aghabaglou, Ali., Felekoğlu, Burak., Ramyar, Kambiz., (2021), Effect of false set related anomalies on rheological properties of cement paste mixtures in the presence of high range water reducing admixture. *Structural Concrete*, 22, E619-E633.
- McNeil, Katrina., Kang, Thomas.H.K., (2013), Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 61–69.

- Medjigbodo, Sonagnon ., Bendimerad, Ahmed. Z., Rozière, Emmanuel ., Loukili, Ahmed. (2018), How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties?, *Cement and Concrete Composites*, 86(1), 2018,72-86.
- Meisuh, Bismark.K., Kankam, Charles. K., Buabin, Thomas. K., (2018), Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete. *Case studies in construction materials*, 8, 16-22.
- Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., Aït-Mokhtar, A., (2009), Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Constr. Build. Mater.*,23(2), 625-633.
- Meziane, El-Hadj., Ezziane, Karim., Kenai, Said., Kadri, Abdelkader, (2015), Mechanical, hydration, and durability modifications provided to mortar made with crushed sand and blended cements. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29(18), 1987-2005.
- Mistri, Abhijit., Bhattacharyya, Sriman Kumar ., Dhama, Navdeep ., Mukherjee, Abhijit., Barai, Sudhirkumar V., (2020), A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Constr. Build. Mater.*,233, 117894.
- Muduli, Rakesh., Mukharjee, Bibhuti Bhusan, (2020), Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach. *Constr. Build. Mater.*,233, 117223.
- Mundra, Sanjay ., Sindhi, P.R., Chandwani, Vinay., Nagar, Ravindra., Agrawal, Vinary., (2016), Crushed Rock Sand-An economical and ecological alternative to natural sand to optimize concrete mix, *Perspectives in Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.070>
- Nagataki S, Gokce A, Saeki T., (2000), Effects of recycled aggregate characteristics on performance parameters of recycled aggregate concrete. *ACI Special Publication*. 2000; 192: 53-72.
- Nedeljković, Marija., Visser, Jeanette ., Šavija, Branko., Valcke, Siska., Schlangen, Erik., (2021), Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102196.
- Omary, Safiullah ., Ghorbel, Elhem., Wardeh, George., (2016), Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Constr. Build. Mater.*,108, 163-174.
- Pacheco, J. de Brito, C. Chastre, L., (2019), Evangelista, Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 201 (2019) 110–120
- Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, Luis., (2014), Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Constr. Build. Mater.*,71, 141–151.
- Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, Luis., (2018), Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume, *Cem. Concr. Compos.* 93, 63-74.
- Pilehvar, Shima., Szczotok, Anna. M., Carmona, Manuel., Pamies, Ramon., Kjøniksen, Anna Lena., (2020), The effect of microencapsulated phase change materials on the rheology of geopolymer and Portland cement mortars. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(10), 5852-5869.

- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., (2004), Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.*, 34(1), 31-36.
- Prasad, Deepak., Pandey, Arunabh., Kumar, Brind., (2021), Sustainable production of recycled concrete aggregates by lime treatment and mechanical abrasion for M40 grade concrete. *Constr. Build. Mater.*, 268, 121119.
- Reis, Glaydson. Simoes. Dos., Quattrone, Marco., Ambrós, Wesley Monteiro., Grigore Cazaciu, Bogdan., Hoffmann Sampaio, Carlos. (2021). Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. *Materials*, 14(7), 1700.
- Safiddine, Salim., Amokrane, Kamel., Debieb, Farid., Soualhi, Hamza., Benabed, Benchaa., Kadri, El-Hadj., (2021), how quarry waste limestone filler affects the rheological behavior of cement-based materials. *Applied Rheology*, 31(1), 63-75.
- Sasanipour, Hossein., Aslani, Farhad., Taherinezhad, Javad. (2019). Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 227, 116598.
- Sasanipour, Hossein., Aslani, Farhad., (2020), Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 236, 117540.
- Singh, Jagdeep ., Mukherjee, Abhilash., Dhiman, Vishal Kumar., Deepmala ., (2021), Impact of crushed limestone dust on concrete's properties. *Materials Today: Proceedings*, 43, 341-347.
- Soni, Nancy., Shukla, Dharmendra Kumar ., (2021), Analytical study on mechanical properties of concrete containing crushed recycled coarse aggregate as an alternative of natural sand. *Constr. Build. Mater.*, 266, 120595.
- Sosa, I., Tamayo, P., Sainz-Aja, J. A., Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. (2021). Durability aspects in self-compacting siderurgical aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 39, 102268.
- Tabsh, Sami. W., Abdelfatah, Akmal. S., (2009), Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23(2), 1163–1167.
- Tam, Vivian WY, SOOMRO, Mahfooz, et EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building materials*, 2018, vol. 172, p. 272-292.
- Tam, Vivian Wy., Soomro, Mahfooz., Evangelista, Ana Catarina Jorge., (2018), A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Constr. Build. Mater.*, 172, 272-292.
- Tam, Vivian Wy., Soomro, Mahfooz., Evangelista, Ana Catarina Jorge., (2021), Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted. *Constr. Build. Mater.*, 288, 123066.
- UEPG 2022 (2022). Study on waste generated and treated in Europe, UEPG, www.uepg.eu. (29/01/2022)
- Upshaw, Matthew., Cai, C.S., (2020), Critical review of recycled aggregate concrete properties, improvements, and numerical models. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(11), 03120005.

- Valcuende, M., Marco, E., Parra, C., Serna, P., (2012), Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(4), 583-592.
- Wagih, Achraf. M., El-Karmoty, Hossam. Z., Ebid, Magda., Okba, Samir. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC journal*, 9(3), 193-200.
- Wang, Dehui., Shi, Caijun ., Farzadnia, Nima., Shi, Zhenguo ., Jia, Huangfei ., (2018), A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*, 192, 153-166.
- Wang, Qinghe ., Wang, Yu-Yin ., Geng, Yue., Zhang, Huan., (2021), Experimental study and prediction model for autogenous shrinkage of recycled aggregate concrete with recycled coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 268, 121197.
- Wang, Ruijun ., Yu, Ningning ., Li, Yang., (2020), Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 242, 118164.
- Xiao, Jianzhuang., Poon, Chi Sun., Wang, Yuyin., Zhao, Yuxi., Ding, Tao., Geng, Yue., Li, Taohua Ye Long., (2022), Fundamental behaviour of recycled aggregate concrete—overview I: strength and deformation. *Magazine of Concrete Research*, 74(19), 999-1010.
- Yang, Rui., Yu, Rui., Shui, Zhonghe ., Guo, Cheng., Wu, Shuo., Gao, Xu., Peng, Shu., (2019), The physical and chemical impact of manufactured sand as a partial replacement material in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*, 99, 203-213.
- Ying, Jingwei., Han, Zewen., Shen, Luming., Li, Wengui., (2020), Influence of parent concrete properties on compressive strength and chloride diffusion coefficient of concrete with strengthened recycled aggregates. *Materials*, 13(20), 4631.
- Yuan, Xiongzhou., Tian, Yuze., Ahmad, Waqas., Ahmad, Ayaz., Usanova, Kseniia Iurevna., Mohamed, Abdeliazim Mustafa., Khallaf, Rana., (2022), Machine learning prediction models to evaluate the strength of recycled aggregate concrete. *Materials*, 15(8), 2823.
- Zaben, Abdulrahman., Maslehuddin, Mohammed., Al-Amoudi, Omar.S. B., Al-Dulaijan, Salah. U., (2021), Influence of mix composition on the properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 22(5), 2939-2951.
- Zhan, Bao Jian., Xuan, Dong Xing., Poon, Chi Sun., Scrivener, Karen. L., (2020), Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared with carbonated modeled recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Res.*, 136, 106175.
- Zhan, Bao Jian., Xuan, Dong Xing., Zeng, Weilai., Poon, Chi Sun ., (2019), Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Compo.*, 104, 103360.
- Zhang, Mingming., Xu, Jin., Li, Meng., Yuan, Xiaosa., (2023), Influence of stone powder content from manufactured sand concrete on shrinkage, cracking, compressive strength, and penetration. *Buildings*, 13(7), 1833.