

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Par

BELABBAS Oualid

Thème

Propriétés physico-mécaniques des bétons à base de granulats multi-recyclés

Soutenue le 17/10/2024, devant le jury composé de :

AIT ATMANE Hassen	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
EZZIANE Karim	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examinateur
BOUGARA Abdelkader	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examinateur
DEBIEB Farid	Professeur	Université Yahia Fares de Médéa	Examinateur
BOULEKBACHE Bensaid	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Rapporteur
BOUZIADI Farid	MCA	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Co-rapporteur
CHEMROUK Mohamed	Professeur	USTHB Alger	Invité

Dédicace

A ma mère,

A mon père,

A mes frères,

A ma tante Lallia,

A toute la famille BELABBAS et ANTEUR.

Remerciements

Je remercie "**ALLAH**" le Tout-Puissant de m'avoir donné la force et le courage de finir ce modeste travail, qui est le fruit de mes années de savoir.

Je tiens à remercier tous particulièrement :

Mon directeur de thèse, **M. BOULEKBACHE Bensaid**, Professeur à l'Université de Chlef, pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir donné l'occasion de réaliser cette thèse dans les bonnes conditions. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité, sa sympathie, sa grande gentillesse, de ses encouragements, et de la confiance qu'il m'a accordée.

Mon co-directeur de thèse, **M. BOUZIADI Farid**, MCA à l'Université de Chlef, pour avoir partagé ses connaissances sur le sujet.

Le Professeur **AIT ATMANE Hassen** de l'Université de Chlef, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Le Professeur **EZZIANE Karim** de l'Université de Chlef, le Professeur **BOUGARA Abdelkader** de l'Université de de Chlef et le Professeur **DEBIEB Farid** de l'Université de Médéa, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'en être les examinateurs.

M. CHEMROUK Mohamed, Professeur à l'USTHB Alger, qui m'a partagé son savoir pour réaliser l'essai de fluage et interpréter les résultats trouvés.

M. HADDI Abdelkader, HDR à l'Université d'Artois, Béthune qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a donné l'opportunité de réaliser la partie numérique.

Je tiens à remercier également tous les enseignants du département de génie civil de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'UHB Chlef.

Je tiens à remercier l'ingénieur **OUALI Fouad** pour sa disponibilité durant la campagne expérimentale.

Mes remerciements vont aussi, à tous ceux qui m'ont aidé par leur présence ou par leur soutien dans la réalisation de cette thèse, en particulier mes collègues doctorants **MM. Y. NADOUR, S. BENSAHNOUNE, A. LAKHAL, et M^{le} I. MAROUF** pour leur inestimable aide lors de la réalisation des essais.

Je tiens à remercier l'équipe du laboratoire "**LSME**" pour l'ambiance de travail et avec qui j'ai eu le plaisir de faire cette thèse.

Résumé

Cette étude examine les propriétés physico-mécaniques, rhéologiques, et les déformations différées du béton fabriqué avec des granulats grossiers recyclés (GR) issus de plusieurs cycles de recyclage. Quatre types de bétons ont été testés : un béton témoin avec 100 % de gros granulat naturel d'une résistance à la compression de 38 MPa à 28 jours (BGN) et trois générations de béton de granulats recyclés (BGR) où le granulat naturel (GN) est remplacé par du GR avec des pourcentages volumiques de 50 % et 100 % pour chaque génération. De plus, de la fumée de silice a été utilisée pour améliorer les performances mécaniques du béton recyclé de la troisième génération avec 100 % GR. Tous les bétons ont le même rapport E/C.

Des expérimentations ont été menées sur le béton frais, impliquant la mesure de sa rhéologie et de sa densité. Par la suite, une analyse de la microstructure a été réalisée et des tests mécaniques ont été effectués pour évaluer les propriétés mécaniques. D'autre part, des essais sur les déformations différées ont été réalisés, comprenant le retrait sous trois températures de cure (20 °C, 40 °C et 60 °C) et le fluage en flexion. Enfin, une étude numérique a été effectuée dans laquelle le retrait total à différentes températures de cure a été prédit en combinant l'approche de la maturité avec une analyse par la méthode des éléments finis (MEF), en utilisant le logiciel ANSYS[®]. Une étude analytique a également été effectuée, où les résultats des déformations de retrait obtenus par les essais expérimentaux à 20 °C ont été comparés aux déformations de retrait obtenues à partir des modèles de prédiction théoriques.

Les résultats montrent que le multi-recyclage a un effet néfaste sur les propriétés mécaniques du béton. Les déformations différées augmentent avec l'augmentation du nombre de cycles, mais l'utilisation d'un taux de remplacement de 50 % de GR a moins d'effet sur la dégradation des bétons de différentes générations. De plus, l'élévation de la température de durcissement entraîne une augmentation du retrait total. D'autre part, l'utilisation de la fumée de silice améliore la microstructure, les performances mécaniques, et la résistance au fluage du BGR, bien qu'elle induise une augmentation de la déformation du retrait total. Enfin, la comparaison entre les données expérimentales et numériques montre que le modèle MEF, utilisant la méthode de maturité et le modèle en série à deux phases, peut donner une prédiction précise du retrait total du béton multi-recyclé. La comparaison entre les données expérimentales et analytiques montre que les modèles Eurocode2 et GL2000 ont donné les meilleurs résultats en termes de précision de la prédiction du retrait des bétons multi-recyclés.

Mots clés : Béton ; Granulats recyclés ; Multi-recyclage ; Propriétés mécaniques ; Retrait ; Fluage ; Méthode des éléments finis.

Abstract

This study examines the physico-mechanical, rheological, and deferred deformations of concrete made with recycled coarse aggregates (RCA) from several recycling cycles. Four types of concrete were tested: a control concrete with 100% natural coarse aggregate with a compressive strength of 38 MPa at 28 days (NAC) and three generations of recycled aggregate concrete (RAC) where natural coarse aggregate (NCA) is replaced by RCA with volume percentages of 50% and 100% in each generation. Furthermore, silica fume was used to improve the mechanical performances of the third-generation recycled concrete with 100% RA. All concretes have the same ratio W/C.

Experiments were conducted on fresh concrete, involving the measurement of its rheology and density. Subsequently, a microstructural analysis was carried out and mechanical tests were performed to evaluate the mechanical properties. In addition, deferred deformation tests were performed, including shrinkage at three cure temperatures (20 °C, 40 °C and 60 °C) and flexural creep. Finally, a numerical study was conducted where the total shrinkage at different curing temperatures was predicted by combining the maturity approach with a finite element method (FEM) analysis using ANSYS[®] software. An analytical study was also performed, comparing the shrinkage deformations at 20 °C obtained from experimental tests with those predicted by theoretical models.

The results reveal that multi-recycling has a detrimental effect on the microstructure and mechanical properties of concrete. The deferred deformations increase significantly with the increase in the number of cycles. However, using a 50% replacement rate of recycled aggregates (RA) has a lesser impact on the degradation of concretes from various generations. Moreover, the rise in the curing temperature results in an increase in total shrinkage. On the other hand, the use of silica fume improves the microstructure, mechanical performance and creep resistance of multi-recycled concrete, although it also induces an increase in deformation of the total shrinkage. Finally, the comparison between experimental and numerical data shows that the FEM model, using the maturity method and the two-phase serial model, can give a precise prediction of the total shrinkage of multi-recycled concrete and The comparison between experimental and analytical data shows that the Eurocode2 and GL2000 models produced the best results in terms of accuracy for predicting the shrinkage of multi-recycled concretes.

Keywords: Concrete; Recycled coarse aggregate; Multi-recycling; Mechanical properties; Shrinkage; Creep; Finite element analysis.

ملخص

تتناول هذه الدراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية والتشوهات المتأخرة للخرسانة المصنوعة من الحصى الخشن المعاد تدويره عدة مرات. تم اختبار أربعة أنواع من الخرسانة: خرسانة شاهدة تحتوي على حصى خشن طبيعي بنسبة 100% ذات قوة ضغط 38 ميجاباسكال عند 28 يوم وثلاثة أجيال من الخرسانة المعاد تدويرها حيث يتم استبدال الحصى الطبيعي بالركام المعاد تدويره بنسب حجمية 50% و100% في كل جيل. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام مسحوق السيليكا لتحسين الأداء الميكانيكي للجيل الثالث من الخرسانة المعاد تدويرها بنسبة 100% من الحصى المعاد تدويره. جميع أجيال الخرسانة كانت لها نفس النسبة الماء/الاسمنت.

تم إجراء التجارب على الخرسانة الطازجة، بما في ذلك قياس ريولوجيتها وكثافتها. بعد ذلك، تم إجراء التحليل المجهرى ثم الاختبارات الميكانيكية لتقييم الخواص الميكانيكية. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء اختبارات التشوه المتأخر، بما في ذلك الانكماش تحت ثلاث درجات حرارة معالجة (20 درجة مئوية، 40 درجة مئوية و60 درجة مئوية) وزحف الانثناء. أخيراً، تم إجراء دراسة رقمية حيث تم التنبؤ بالانكماش الكلي في درجات حرارة علاج مختلفة من خلال دمج نهج النضج مع تحليل طريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS®. كما تم إجراء دراسة تحليلية، حيث تمت مقارنة تشوهات الانكماش التي تم الحصول عليها من الاختبارات التجريبية مع تلك التي تم التنبؤ بها من النماذج النظرية.

أظهرت النتائج أن إعادة التدوير المتعددة لها تأثير ضار على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للخرسانة. تزداد التشوهات المتأخرة بشكل ملحوظ مع زيادة عدد الدورات لكن استخدام معدل استبدال قدره 50% من الحصى المعاد تدويره يمكن أن يبطئ التدهور بين الأجيال. بالإضافة إلى ذلك، زيادة درجة حرارة المعالجة يؤدي إلى زيادة في الانكماش الكلي. من ناحية أخرى، فإن استخدام مسحوق السيليكا يحسن البنية المجهرية والأداء الميكانيكي ومقاومة الزحف للجيل الثالث من الخرسانة المعاد تدويرها، على الرغم من أنه يؤدي أيضاً إلى زيادة في تشوه الانكماش الكلي. أخيراً، أظهرت المقارنة بين البيانات التجريبية والعددية أن نموذج العناصر المحدودة، باستخدام طريقة النضج ونموذج السلسلة ثنائية الطور، يمكن أن يعطي تنبؤاً دقيقاً للانكماش الكلي للخرسانة المعاد تدويرها عدة مرات والمقارنة بين البيانات التجريبية والتحليلية تظهر أن نماذج Eurocode2 و GL2000 قدّمت أفضل النتائج من حيث دقة التنبؤ بانكماش الخرسانة متعددة إعادة التدوير.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة؛ الحصى المعاد تدويره؛ إعادة التدوير المتعددة؛ الخواص الميكانيكية الانكماش؛ الزحف؛ تحليل العناصر المحدودة.

Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract	v
ملخص.....	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des abréviations.....	xii
Introduction générale.....	2
Chapitre 1 : Recyclage du béton	6
1.1. Introduction	6
1.2. Caractérisation de déchets de C & D.....	6
1.3. Historique	9
1.4. Processus de recyclage du béton	9
1.4.1. Méthode de recyclage ordinaire	10
1.4.2. Méthode de traitement thermique	11
1.4.3. Méthode de recyclage humide.....	12
1.5. Avantages de l'utilisation du BGR	12
1.6. Chiffres mondiaux	13
1.7. Applications structurelles des BGR	15
Chapitre 2 : Propriétés des granulats et des bétons multi-recyclés	20
2.1. Introduction	20
2.2. Propriétés des granulats multi-recyclés	21
2.2.1. Propriétés physiques.....	21
2.2.2. Propriétés mécaniques	26
2.2.3. Techniques d'amélioration des performances des GR.....	27
2.3. Propriétés des bétons multi-recyclés.....	29
2.3.1. Effet du multi-recyclage sur les propriétés du béton frais	29
2.3.2 Effet du multi-recyclage sur les propriétés du béton durci	33
2.4. Conclusion	48
Chapitre 3: Matériaux et matériel d'essai	51
3.1. Introduction	51
3.2. Matériaux utilisés.....	51
3.2.1. Ciment.....	51
3.2.2. Fumée de silice	52
3.2.3. Eau de gâchage	52
3.2.4. Sable	52
3.2.5. Graviers.....	52
3.3. Caractérisation des granulats	54
3.3.1. Analyse granulométrique.....	54
3.3.2. Quantité de mortier attaché aux GR	55
3.3.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats	56
3.3.4. Absorption d'eau des granulats	57
3.4. Formulation des bétons.....	58

3.5. Essais sur les bétons frais	61
3.5.1. Masse volumique.....	61
3.5.2. Ouvrabilité	62
3.5.3. Rhéologie	62
3.6. Essais sur les bétons durcis.....	64
3.6.1. Masse volumique du béton durci	64
3.6.2. Analyse de la microstructure des bétons	65
3.6.3. Résistance à la compression	66
3.6.4. Résistance à la traction par fendage	67
3.6.5. Module d'élasticité.....	68
3.6.6. Essai d'auscultation dynamique.....	69
3.6.7. Retrait total.....	71
3.6.8. Fluage en flexion	72
3.7. Conclusion	76
Chapitre 4 : Interprétation des résultats expérimentaux	78
4.1. Introduction	78
4.2. Propriétés du béton frais.....	78
4.2.1. Masse volumique.....	78
4.2.2. Rhéologie	79
4.3. Propriétés du béton durci.....	80
4.3.1. Masse volumique.....	80
4.3.2. Analyse d'image	81
4.3.3. Résistance à la compression	86
4.3.4. Courbes contraintes-déformations en compression.....	90
4.3.5. Résistance au fendage.....	91
4.3.6. Corrélation entre la résistance au fendage et à la compression	93
4.3.7. Module d'élasticité.....	96
4.3.8. Essai des ondes ultrasoniques.....	99
4.3.9. Retrait total.....	102
4.3.10. Fluage en flexion	106
Chapitre 5 : Etude numérique et analytique du retrait.....	115
5.1. Etude numérique du retrait.....	115
5.1.1 Introduction	115
5.1.2. Méthode de maturité	115
5.1.3. Caractéristiques thermiques du béton.....	119
5.1.4. Propriétés mécaniques des bétons	119
5.1.5. Retrait numérique	120
5.1.6. Analyse par éléments finis	120
5.1.7. Validation du modèle des éléments finis	121
5.2. Etude analytique du retrait.....	123
5.2.1. Introduction	123
5.2.2. Modèles de prédiction utilisés.....	123
5.2.3. Résultats et discussion.....	126
Conclusion générale et perspectives	132
Bibliographie.....	137

Liste des figures

Figure 1.1. Déchets de démolition de logements vétustes à Ténès (Algérie).	7
Figure 1.2. Débris de bombardements contre la bande de Gaza (Palestine) en 2024.	7
Figure 1.3. Représentation schématique du processus de recyclage ordinaire [22].	10
Figure 1.4. Représentation schématique de la méthode de traitement thermique [22].	12
Figure 1.5. Gestion des déchets de C & D dans différentes régions du monde en 2020 [34].	14
Figure 1.6. Mode de fissuration en flexion de poutres en BGN et BGR avec 100 % GR [44].	17
Figure 2.1. Composition d'un granulats recyclé [18].	21
Figure 2.2. Morphologie des granulats : (a) GN; (b) GR1; (c) GR2; (d) GR3 [59].	22
Figure 2.3. Morphologie de GR avant et après traitement avec 33 % HCl [66].	23
Figure 2.4. Analyses granulométrique de GN et trois générations de GR [61].	24
Figure 2.5. Absorption d'eau des GR en fonction du temps [60].	26
Figure 2.6. Relation entre les paramètres rhéologiques et le nombre de cycles [75].	33
Figure 2.7. Micrographies par MEB (grossissement : 50x, 100x, 500x et 1500x) [62].	34
Figure 2.8. Influence de la qualité des GR sur la résistance à la compression du BGR.	36
Figure 2.9. Résistance à la traction par fendage des bétons multi-recyclés à 28 jours [61].	39
Figure 2.10. Module d'élasticité statique et dynamique de bétons multi-recyclés [150].	42
Figure 2.11. Module d'élasticité en fonction du taux de GR à chaque cycle de recyclage [59].	42
Figure 2.12. Evolution de la déformation du retrait en fonction du temps [60].	43
Figure 2.13. Différence entre le retrait autogène et par dessiccation de BGR et BGN [157].	44
Figure 2.14. Effet de la qualité des GR sur le retrait par dessiccation du BGR [164].	45
Figure 2.15. Effet de la résistance à la compression du béton parent sur le retrait de dessiccation du BGR [137].	46
Figure 2.16. Fluage du BGR avec différents taux de GR [167].	47
Figure 3.1. Processus de production des GR.	53
Figure 3.2. Différents types de graviers utilisés.	54
Figure 3.3. Analyse granulométrique des granulats.	55
Figure 3.4. Méthode de traitement thermique des GR.	56
Figure 3.5. Absorption d'eau des granulats.	58
Figure 3.6. Elimination de l'eau adsorbée des GR pré-saturés.	59
Figure 3.7. Vibration du béton.	60
Figure 3.8. Conservation des éprouvettes.	61
Figure 3.9. Mesure de la masse volumique du béton frais.	61
Figure 3.10. Essai d'affaissement.	62
Figure 3.11. Rhéomètre ICAR.	63
Figure 3.12. Essai de courbe d'écoulement.	64
Figure 3.13. Mesure de la masse volumique du béton durci.	65
Figure 3.14. Essai de microscopie électronique à balayage.	66
Figure 3.15. Essai de compression simple.	66
Figure 3.16. Essai de traction par fendage.	68
Figure 3.17. Dispositif de mesure du module d'élasticité.	68
Figure 3.18. Surfaçage mécanique des éprouvettes cylindriques.	69

Figure 3.19. Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion.....	70
Figure 3.20. Conservation des éprouvettes dans une étuve.	71
Figure 3.21. Ferrailage des poutres (dimensions en mm).	72
Figure 3.22. Procédé de fabrication des poutres.	73
Figure 3.23. Essai de fluage en flexion.	74
Figure 3.24. Mesure de fluage.	75
Figure 3.25. Schéma du protocole expérimental.	76
Figure 4.1. Effet de multi-recyclage sur la masse volumique du béton frais.	79
Figure 4.2. Paramètres rhéologique des bétons frais.....	80
Figure 4.3. Masse volumique des bétons durcis.	81
Figure 4.4. Macrographie des béton testés.	82
Figure 4.5. Effet de multi-recyclage sur la microstructure du béton.....	84
Figure 4.6. ITZ4 du BGR3-100 avant et après traitement avec la fumée de silice à 90 jours	85
Figure 4.7. Microstructure du BGR3-100 avant et après traitement avec la fumée de silice à 90 jours.	86
Figure 4.8. Variation de la résistance à la compression des bétons testés avec le temps.	88
Figure 4.9. Variation de la résistance à la compression avec le nombre de cycles de recyclage.	89
Figure 4.10. Courbes contraintes-déformations en compression des bétons testés.	90
Figure 4.11. Résistance au fendage des bétons testés.	92
Figure 4.12. Variation de la résistance au fendage avec le nombre de cycles de recyclage.	93
Figure 4.13 : Résistances au fendage en fonction de celles à la compression.	94
Figure 4.14 : Relation entre les résistances au fendage et à la compression.	96
Figure 4.15 : Erreur intégrale absolue des différentes prédictions.....	96
Figure 4.16. Module d'élasticité statique des bétons testés.	97
Figure 4.17. Variation du module d'élasticité avec le nombre de cycles de recyclage.	98
Figure 4.18. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques des bétons testés	100
Figure 4.19. Module d'élasticité dynamique des bétons.	101
Figure 4.20. Effet de multi-recyclage sur le retrait total du béton	103
Figure 4.21. Effet de température de cure sur le retrait total.	105
Figure 4.22. Effet du multi-recyclage sur le fluage en flexion du béton.	107
Figure 4.23. Evolution de la flèche différée des bétons testés.	110
Figure 4.24. Vitesse de fluage.	111
Figure 4.25. Coefficients de fluage des bétons testés.	112
Figure 4.26. Relation entre le coefficient de fluage expérimentale et numérique.	113
Figure 5.1. Retrait des bétons testés en fonction de T et de t_{eq}	118
Figure 5.2. Comparaison des valeurs expérimentales et numériques du retrait total.	121
Figure 5.3. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par CEB-FIP MC90.....	127
Figure 5.4. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par EC2.	128
Figure 5.5. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par GL2000.	128
Figure 5.6. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par B3.	129

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Valeurs du coefficient de Los Angeles de différentes générations de GR.	26
Tableau 3.1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.	51
Tableau 3.2. Composition chimique (%) de la fumée de silice.	52
Tableau 3.3. Quantité de mortier attachée au GR (%).	56
Tableau 3.4. Caractéristiques des granulats utilisés.	57
Tableau 3.5. Formulation des bétons testés (kg/m ³).	59
Tableau 3.6. Charges appliquées aux poutres dans l'essai de fluage.	74
Tableau 4.1. Valeurs relatives de la résistance à la compression des bétons testés.	88
Tableau 4.2. Valeurs relatives de la résistance au fendage des bétons testés.	92
Tableau 4.3 : Prédiction de la résistance au fendage en fonction de celle à la compression	95
Tableau 4.4. Valeurs relatives de module d'élasticité des bétons testés.	98
Tableau 4.5. Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [212].	99
Tableau 4.6. Valeurs relatives des vitesses de propagation des ondes des bétons testés.	100
Tableau 5.1. Demi- âge (t_{50}) et énergie d'activation (E_a) pour les différentes températures de durcissement des bétons testés.	117
Tableau 5.2. Caractéristiques thermiques et mécaniques des bétons pour le modèle MEF.	120
Tableau 5.3. Erreurs résiduelles des valeurs numériques du retrait total des bétons.	122
Tableau 5.4. Paramètres requis dans les modèles de prédiction.	124
Tableau 5.5. Performance des modèles de prédiction de retrait.	130

Liste des abréviations

BGR1 :	Béton à base de granulat recyclé du premier cycle
BGR2 :	Béton à base de granulat recyclé du deuxième cycle
BGR3 :	Béton à base de granulat recyclé du troisième cycle
C & D :	Construction de démolition
CH :	Portlandite
C-S-H :	Calcium de silicates hydratés
E/C :	Rapport Eau/Ciment
E/L :	Rapport Eau/Liant
FS :	Fumée de silice
GR1 :	Granulat recyclé du premier cycle
GR2 :	Granulat recyclé du deuxième cycle
GR3 :	Granulat recyclé du troisième cycle
ITZ :	Zone de transition interfaciale
Φ :	Coefficient de fluage
S :	Ecart type
VR :	Valeur relative
IAE :	Erreur intégrale absolue
RMSE :	Racine d'erreur quadratique linéaire

Introduction générale

Introduction générale

1- Mise en contexte et problématique

Le béton nous entoure partout ; c'est le matériau manufacturé le plus consommé dans le monde après l'eau, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics. Le développement économique et l'augmentation de la population et des zones urbaines ont mené au redécoupage des villes et à la réalisation des nouvelles routes, et le grand besoin des constructions a causé une grande augmentation de l'utilisation du béton, qui étant estimée à environ 11 milliards de tonnes par an dans le monde en 2021. Cela correspond à une consommation moyenne d'environ 1.9 tonne par habitant et par an [1].

L'industrie du béton nécessite des quantités importantes de granulats. L'extraction mondiale des ressources a connu une croissance spectaculaire, entre 1900 et 2015, où les quantités extraites sont passées de 7 à 89 Gt. En Algérie, des millions de tonnes de mètres cubes de granulats sont utilisés dans le domaine de la construction. Cette quantité ne peut être disponible sans avoir recours à l'exploitation de gisements importants de carrières de production de granulats et qui feront disparaître des montagnes toutes entières. Cette exploitation se fera sans doute au détriment de l'équilibre écologique, avec des conséquences néfastes sur notre environnement.

Au même temps, des catastrophes, naturelles (séisme de Turquie du février 2023) ou causées par l'être humain (guerre Russie-Ukraine en 2022 et les bombardements contre la bande de Gaza en 2023), provoquent des destructions importantes dans le patrimoine bâti. Selon l'ONU, la guerre contre la bande de Gaza en 2023 a provoqué 42 millions de tonnes de débris.

De 1900 à 2010, le monde a connu une augmentation considérable du taux de production de déchets solides, passant de moins de 0.3 Mt par jour à plus de 3.5 Mt par jour. On prévoit qu'il doublera d'ici 2025 et triplera d'ici 2100 [2]. Les débris de démolition qui en résultent de toutes ces situations polluent l'environnement et constituent des obstacles insurmontables à tout développement durable pour les générations futures.

Par conséquent, nous aurons deux problèmes majeurs : le premier est la pénurie de matières premières nécessaires pour produire de nouveau béton, le second est de savoir comment se débarrasser des déchets de démolition et de construction (C & D) ; et c'est d'ici

que l'idée du recyclage et la de réutilisation des déchets de C & D dans la production de nouveau béton est apparue.

Les États-Unis et le Japon sont les pionniers des premiers essais sur le recyclage du béton à la fin des années 1970. L'idée était de convertir les blocs de béton en matériaux valorisables utilisés dans les travaux publics. Ce processus implique le concassage du béton, similaire à l'extraction de gravier à partir de roches, pour obtenir un matériau appelé "granulat recyclé".

Dans les dernières années, les propriétés des granulats recyclés et leurs effets sur le béton ont attiré l'attention de nombreux scientifiques. Malgré les avantages évidents pour l'environnement et l'économie, ce matériau possède des propriétés distinctes de celles des granulats naturels qui ont entravé leur utilisation fréquente.

La principale différence entre un granulat naturel (GN) et un granulat recyclé (GR) est la pâte de ciment attachée à la surface de ce dernier, qui est l'une des principales raisons de perte des qualités des GR.

De nos jours, le recyclage du béton est devenu une tendance mondiale qui reçoit une grande attention, en particulier dans les pays développés, qui ont parcouru un long chemin dans le processus de recyclage et la réutilisation des déchets de C & D dans la production de nouveau béton en raison de leurs grands avantages sur l'économie des ressources naturelles, la protection de l'environnement et la réduction de la consommation d'énergie.

En Algérie, cette question n'a pas reçu suffisamment d'attention jusqu'à présent. Souvent ces déchets sont enfouis dans des terrains bas ou s'accumulent illégalement sur des terrains vacants et dans des décharges. Malgré de nombreuses études de recherche pour une éventuelle utilisation dans des formulations de nouveaux bétons, les granulats recyclés trouvent peu d'application en tant que granulats de béton.

La réutilisation des GR comme remplacement des GN dans la fabrication de béton est restée encore limitée malgré son impact sur l'environnement à cause de quelques facteurs : des problèmes techniques ; les obstacles commerciaux ; l'assurance de la qualité et les problèmes de contrôle, l'absence de la réglementation adaptée et de l'expérience.

Dans le futur lointain, quand tout le béton est du béton recyclé (BGR), il sera nécessaire de recycler le BGR. Or, il est bien connu que le recyclage du béton implique une perte de ses caractéristiques ; cela nous amène à nous demander combien de fois il est possible de recycler un béton ? Quelles sont les propriétés qui sont affectées par le multi-recyclage ? Est-il possible d'utiliser le béton multi-recyclé dans l'industrie du bâtiment ?

2- Objectifs du projet de recherche

Les propriétés du BGR ont été étudiées par de nombreux chercheurs à travers le monde, mais très peu d'auteurs se sont intéressés à la problématique du multi-recyclage de ce matériau. C'est dans ce sens que nous nous proposons de travailler sur un béton fait de granulats multi-recyclés à partir des débris de béton. Le travail expérimental aura pour but de caractériser des bétons formulés à partir de granulats multi-recyclés préparés au laboratoire, de manière à s'assurer que ces bétons présentent des propriétés rhéologiques, physico-mécaniques, et des déformations différées satisfaisantes pour une utilisation dans l'industrie du bâtiment. Les travaux ont été réalisés au niveau du laboratoire des Sciences des Matériaux en Environnement (LSME) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.

3- Organisation de la thèse

La thèse est structurée en trois parties :

La première partie consiste en une revue de littérature composée de deux chapitres. **Le premier chapitre** aborde une vue d'ensemble sur le recyclage du béton. Tandis que **le deuxième chapitre** présente les propriétés des granulats et bétons multi-recyclés.

La deuxième partie est une étude expérimentale composée de deux chapitres. **Le troisième chapitre** exhibe les divers matériaux utilisés dans la production des bétons testés, ainsi que les méthodes d'essai utilisées conformément aux normes internationales. **Le quatrième chapitre** expose l'analyse et la discussion des résultats issus des divers essais réalisés, dans le but de mettre en évidence l'effet de recyclage multiple sur les caractéristiques physico-mécaniques, la microstructure et les déformations différées (retrait et fluage) du béton multi-recyclé.

La troisième partie inclut **le chapitre 5** consacré à une analyse numérique et à l'estimation de la contrainte thermique, de la déformation thermique et du retrait total du béton soumis aux différentes températures de cure. Cette analyse est effectuée en combinant l'approche de maturité avec le logiciel ANSYS, qui repose sur la méthode des éléments finis (MEF), et une étude analytique où les résultats des déformations de retrait obtenus par les essais expérimentaux sont comparés aux déformations de retrait obtenues à partir des modèles de prédiction théoriques.

Une conclusion générale rappelant les principaux résultats trouvés dans cette thèse.

Chapitre 1 : Recyclage du béton

Chapitre 1 : Recyclage du béton

1.1. Introduction

Les problèmes liés à l'environnement, recouvrant tout autour de l'homme et qui est l'un des éléments indispensables pour assurer la durabilité de la vie, augmentent de plus en plus et deviennent un cas menaçant la nature ainsi que l'humanité. Nos ressources naturelles diminuent de jours en jours, en raison de l'accroissement de la population mondiale et de l'évolution des habitudes de consommation. Les changements climatiques mondiaux posent des problèmes environnementaux au cours des dernières années, ainsi que la décroissance rapide des ressources naturelles.

C'est pourquoi il est impératif de réduire la consommation des matériaux, et d'utiliser efficacement les ressources naturelles à l'aide du recyclage des déchets qualitatifs à évaluer. Par conséquent, le recyclage est extrêmement important en termes de protection, également pour l'utilisation efficace des ressources naturelles.

La construction est l'un des secteurs où la matière première est la plus consommée. Le domaine de la construction cherche à minimiser les rentrées des procès de fabrication, ainsi qu'à diminuer autant que possible la consommation de matière première, la consommation de l'énergie, les émissions et l'utilisation de l'espace.

Les premières étapes de nombreux projets de construction impliquent la démolition de fondations en béton, de trottoirs, d'allées et d'autres structures en béton, ce qui peut laisser une grande quantité de déchets lourds et denses à traiter. Heureusement, le béton peut être recyclé et réutilisé de plusieurs façons.

1.2. Caractérisation de déchets de C & D

La composition des déchets de C & D peut être influencée par plusieurs facteurs tels que les techniques architecturales, les matériaux utilisés et les procédures de C & D. Néanmoins, le béton, le mortier et la céramique rouge constituent les principaux éléments du C & D, représentant plus de 70 % de son poids [3]. Les figures 1.1 et 1.2 montrent un tas de déchets provenant de la démolition de logements vétustes à Ténès (Algérie) et de la guerre contre la bande de Gaza du 07.10.2023.



Figure 1.1. Déchets de démolition de logements vétustes à Ténès (Algérie).



Jabalia en juillet 2024

Khan Younis en aout 2024.

Figure 1.2. Débris de bombardements contre la bande de Gaza (Palestine) en 2024.

En 2002, le CONAMA (Conseil national brésilien pour l'environnement) a classé les déchets de C & D en quatre classes :

- Classe A : briques, tuiles, panneaux de revêtement de sol, mortier et béton ;
- Classe B : plastique, verre, carton, papier, bois et métal ;
- Classe C : matériaux sans technique de recyclage économiquement réalisable (gypse) ;
- Classe D : déchets dangereux (solvant, huile, peinture et matériaux contenant de l'amiante).

Aux États-Unis, la classification des déchets de C & D comprend les matériaux mentionnés précédemment, ainsi que les éléments de construction récupérés, tels que les portes, les fenêtres et la plomberie, ainsi que le sol et les roches provenant des sites de défrichage.

Parmi ces matériaux, le béton concassé et la maçonnerie concassée constituent les principaux éléments des déchets de C & D, qui peuvent être transformés en différents types de GR, comme cela est décrit ci-dessous [4] :

- Granulats recyclés : composés d'au moins 90 % en poids de fragments à base de ciment Portland.
- Granulats de maçonnerie recyclés : composés d'au moins 90 % en poids de briques céramiques, de tuiles de toiture et de mortier de revêtement.
- Granulats recyclés mixtes : composés de matériaux à base de maçonnerie et de fragments à base de ciment Portland, ces derniers représentant moins de 90 % en poids.

En complément du béton et des matériaux à base de maçonnerie, le verre et le plastique peuvent également être utilisés en remplacement du sable. Lorsque les particules de verre sont de taille inférieure à 38 μm et qu'elles sont utilisées en substitution jusqu'à 30 %, un effet de remplissage se produit. Cet effet de remplissage améliore la résistance à la compression du béton ainsi que certaines propriétés à long terme telles que la perméabilité et la résistance à la pénétration des ions chlore. Si le verre est broyé encore plus finement, on s'attend à ce que l'activité pouzzolanique soit considérablement améliorée [5-7].

Lorsque des granulats plastiques sont utilisés dans le béton, les propriétés mécaniques diminuent à mesure que le taux de remplacement augmente, en raison d'une faible liaison entre les granulats plastiques et la pâte de ciment, et du fait que les granulats plastiques présentent une faible résistance et un faible module d'élasticité [8, 9]. Néanmoins, le béton contenant des granulats plastiques en substitution aux granulats fins peut être utilisé comme sous-couche pour les chaussées autoroutières et pour des applications à faible résistance. De plus, en raison de l'augmentation de l'absorption d'eau, les granulats fins recyclés peuvent être utilisés dans les terrains de sport et les chaussées où un bon drainage de l'eau est nécessaire [10].

Cependant, lors du traitement des GR, il est nécessaire de faire tous les efforts possibles pour réduire au maximum le pourcentage d'éléments incrustés (comme le bois, le plastique et le verre). La faible liaison entre ces composants et les matrices cimentaires peut entraîner un béton présentant des caractéristiques insuffisantes [11, 12].

1.3. Historique

De nombreuses études sur la réutilisation des débris de béton concassés sous forme de granulats dans un nouveau béton ont été menées à la fin des années 1970 en Europe, aux États-Unis et au Japon. De plus, l'expérience a été acquise grâce à un certain nombre de projets pilotes. L'un des projets les plus significatifs utilisant du BGR en Belgique a été la construction de la zone d'exclusion "Berendrecht" près du port d'Anvers en 1989, à proximité de l'ancienne prison "Zandvliet", il a été décidé de construire une nouvelle prison plus grande [13]. Les déchets de démolition de l'ancienne prison ont été convertis en GR 4/28 pour être utilisés dans la construction d'une partie des murs grondants de la nouvelle prison. Ces granulats ont été utilisés à la place des GN pour produire un béton d'une résistance à la compression de 42 MPa. Cependant, il est important de noter que les gravats provenant d'un chantier de démolition bien connu étaient de bonne qualité [14].

Une recommandation spécifique pour l'utilisation de GR a été formulée pour la première fois aux États-Unis et au Danemark à la fin des années 1980 par le centre néerlandais de recherche sur le droit civil et la société danoise du béton. Au début de l'année 1992, un groupe de travail mis en place par le ministère belge des infrastructures a été chargé de créer un cahier de charge d'utilisation des GR dans le béton. Ces premières tentatives ont fait l'objet d'une attention particulière lorsque les travaux d'élaboration des spécifications des GR ont été repris par le RILEM TC 121-DRG. Les travaux de la RILEM s'achevaient avec succès en 1992 avec la recommandation du "Béton à base de granulats recyclés" [14].

1.4. Processus de recyclage du béton

Le processus de recyclage des déchets de C & D transforme les matériaux démolis en une fraction de taille réduite dans des installations de recyclage mobiles ou fixes. Le nombre d'étapes de recyclage et les différents types de broyage influencent les caractéristiques des GR. En raison des effets de collision et d'écaillage, le processus de broyage mécanique améliore la forme des granulats, conduisant à des particules plus rondes et moins tranchantes [4, 15, 16]. Dans ce processus, un engrenage excentrique en rotation à grande vitesse provoque un effet de vibration roulante qui pulvérise le mortier attaché [17]. Différentes méthodes de recyclage peuvent être appliquées en fonction de la taille maximale et de la qualité souhaitée du produit final.

L'étape la plus cruciale dans la production de GR à partir de déchets de C & D est le concassage. Différents types de concasseurs sont utilisés dans cette opération, tels que les

concasseurs à percussion, les concasseurs au cône et les concasseurs à mâchoire [18]. Parfois, un seul concassage est utilisé (concassage primaire) et d'autres fois, plusieurs concasseurs sont utilisés pour produire des granulats de haute qualité [19]. Pour la production de béton, les concasseurs peuvent assurer une bonne répartition granulométrique des GR [20]. Selon Tam et al. [21], si les déchets de béton étaient préalablement broyés avec un concasseur à mâchoires primaire, suivi d'un passage à travers un séparateur magnétique et un concasseur à cône, le GR produit serait de bonne qualité et pourrait être utilisé pour diverses applications.

1.4.1. Méthode de recyclage ordinaire

Le processus de recyclage ordinaire comprend différentes étapes de concassage, de criblage et de tri pour éliminer les contaminants tels que les barres d'armature, le plastique et le verre. Dans cette méthode, les déchets de C & D passent d'abord par un concasseur primaire à mâchoires, capable de traiter les barres d'armature résiduelles et les gros morceaux de béton. Ensuite, les débris de fer sont éliminés à l'aide d'un séparateur magnétique et le matériau restant passe à travers des tamis. Ainsi, les particules de taille supérieure à 20 mm sont concassées à nouveau dans un concasseur secondaire. Le concassage secondaire (concasseur à percussion ou rotatif) peut être répété si nécessaire. La figure 1.3 montre une représentation schématique du processus de recyclage ordinaire [22].

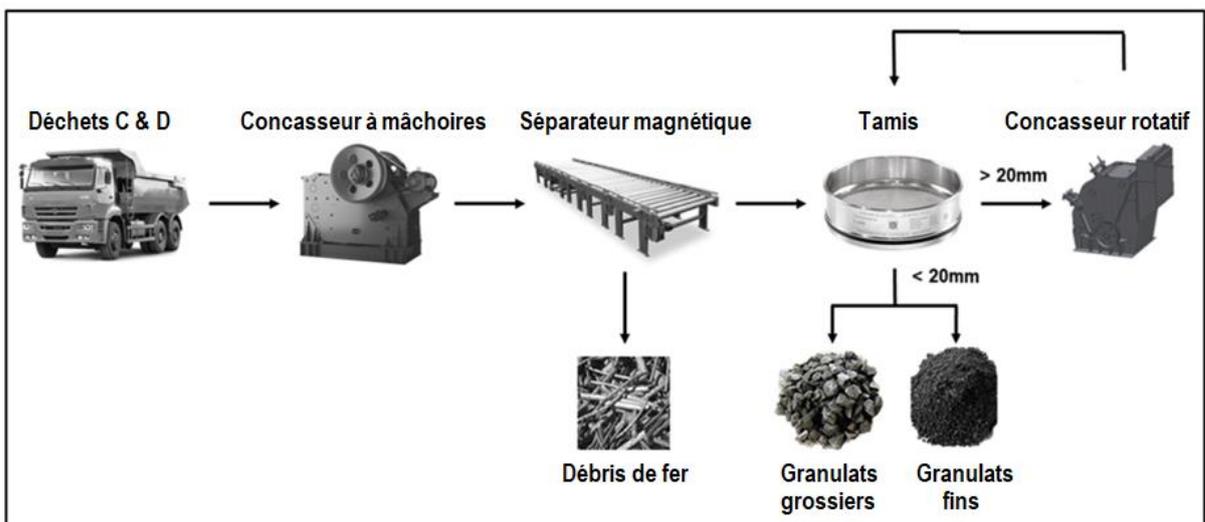


Figure 1.3. Représentation schématique du processus de recyclage ordinaire [22].

1.4.2. Méthode de traitement thermique

Néanmoins, d'autres méthodes mécaniques permettent d'obtenir des GR de meilleure qualité avec des caractéristiques similaires aux GN. Dans ces méthodes, le concasseur à percussion ou rotatif est remplacé par un rotor excentrique, un concasseur à vis ou un concasseur à mâchoires amélioré [23]. Au cours de cette méthode mécanique plus complexe, le matériau d'entrée est mieux traité, éliminant le mortier collé et réduisant la taille des granulats par un frottement continu entre eux.

De plus, il est également possible de chauffer les GR, affaiblissant ainsi le mortier attaché. La haute température lors du processus thermique génère des fissures dans le mortier attaché, entraînant une diminution de sa résistance mécanique et facilitant son détachement de la surface d'origine du GR. Par exemple, la méthode "Chauffage et Tri" produit des GR avec seulement 2 % de mortier attaché après un traitement thermique jusqu'à 700 °C dans un four rotatif [24]. En 2005, une méthode connue sous le nom de "Chauffage et Frottement" a été présentée. Dans cette méthode, les morceaux de béton grossièrement concassés de moins de 40 mm sont d'abord chauffés à environ 300 °C dans un four à kérosène pendant 40 à 60 minutes, puis concassés et frottés dans un broyeur tubulaire [25].

Ce processus a été amélioré en 2011 en utilisant un concasseur à percussion et un four à micro-ondes spécial au lieu d'un four à kérosène [26]. Avec cette nouvelle technique, le matériau est chauffé pendant 2 minutes, ce qui réduit la consommation d'énergie. La figure 1.4 montre une représentation schématique de cette méthode thermique. Le prétraitement d'affaiblissement par micro-ondes est efficace quelle que soit la nature des granulats utilisés dans le béton, même lorsque le matériau est exposé à une faible énergie de chauffage par micro-ondes [22]. En général, le mortier attaché est facilement retiré à une température plus élevée. Cependant, les propriétés du GR peuvent être dégradées lorsque la température dépasse 500 °C. Néanmoins, les bons résultats du broyage thermique conduisent malheureusement à la consommation d'une grande quantité d'énergie et génèrent des émissions supplémentaires de CO₂.

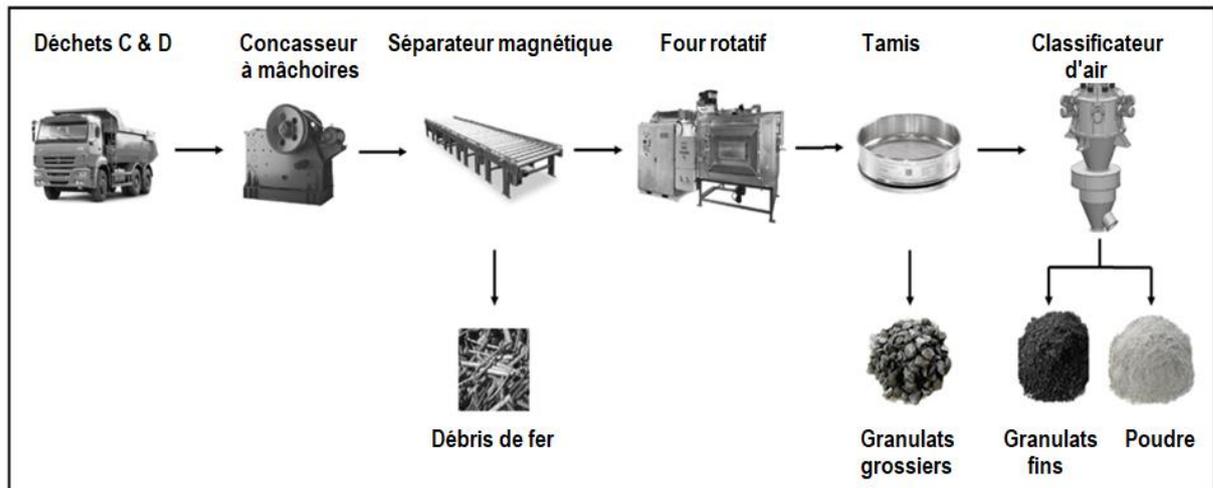


Figure 1.4. Représentation schématique de la méthode de traitement thermique [22].

1.4.3. Méthode de recyclage humide

En ce qui concerne l'utilisation de l'eau, l'expansion thermique est une technique de recyclage humide avancée. Dans cette méthode, les déchets de C & D sont immergés dans l'eau pendant 2 heures afin de saturer totalement le mortier attaché. Ensuite, les échantillons sont séchés à environ 500 °C pendant 2 heures, puis plongés dans de l'eau froide. Lorsque le chauffage induit la formation de vapeur d'eau dans le mortier attaché saturé, le refroidissement rapide provoque des contraintes et par conséquent, des fissures dans le mortier attaché, qui peut être facilement retiré des granulats [27].

Les techniques de recyclage humide incluent également le nettoyage autogène, où les GR entrent en collision les uns avec les autres dans un tambour d'un broyeur rotatif. Ensuite, le matériau est nettoyé à l'eau et séché pour éliminer toutes les fines restantes et les impuretés [28]. Cependant, bien que cette méthode de recyclage humide élimine efficacement le mortier attaché, elle nécessite une demande significative en eau, ce qui rend le processus plus coûteux.

1.5. Avantages de l'utilisation du BGR

Le BGR présente de nombreux avantages, du point de vue écologique et économique.

Le recyclage permet de réduire les déchets de construction : comme le béton peut être recyclé, les bâtiments abandonnés peuvent être en partie recyclés.

Les GR peuvent se substituer aux GN, ceci diminuerait l'épuisement des ressources naturelles et le réemploi de ce matériau dans la fabrication du béton, ce qui contribuerait à la

diminution des coûts de transports des granulats et des déchets de C & D. Cette diminution constitue un enjeu économique principal, parce que les granulats ne sont pas toujours disponibles à proximité des chantiers de construction.

En 2008, Tam [29] a mené une étude économique où il a comparé les coûts et les avantages de deux méthodes de production de granulats : la méthode classique et la méthode de recyclage. Les résultats mettent en évidence que la méthode de recyclage du béton présente plus d'avantages que la méthode classique. L'analyse a montré que les GR s'avèrent économiquement plus avantageux à long terme que les GN, bien que leur disponibilité puisse influencer la viabilité de cette approche. En effet, la méthode de recyclage génère un bénéfice net positif d'environ + 30 916 000 \$ par an, tandis que la première méthode entraîne un bénéfice net négatif d'environ – 44 076 000 \$ par an.

Néanmoins, la disponibilité des ressources naturelles constitue l'un des facteurs déterminants pour la pérennité des producteurs de GR.

1.6. Chiffres mondiaux

La population mondiale a doublé pour atteindre environ 8 milliards de personnes en 2023. Depuis 1950, le nombre de personnes dans les zones urbaines a quadruplé pour atteindre environ 4.4 milliards en 2022.

Les prévisions de l'Organisation des Nations Unies indiquent qu'environ 2.5 milliards de personnes rejoindront les zones urbaines au cours des trois prochaines décennies. Cette augmentation équivaut à l'ajout annuel de huit villes de la taille de New York [30]. Avec l'augmentation de la population urbaine, les zones urbaines s'étendent dans presque toutes les villes au fil du temps. Les activités de construction dans ces zones, nécessaires pour la création de logements et de l'infrastructure et le maintien du fonctionnement de la société, entraînent d'énormes quantités de matériaux de construction. Cela conduit également à la génération sans précédent de déchets de C & D.

La production mondiale de déchets de C & D s'élève à environ 3 milliards de tonnes par an [31]. Parmi ces déchets, les débris de béton représentent généralement entre 40 à 60 % de leur poids [3], ce qui en fait le composant dominant des déchets de C & D. De 1970 à 2022, on prévoit une production mondiale d'environ 361 milliards de tonnes de béton pour les constructions, ce qui équivaut à environ 8.6 % de toutes les émissions de CO₂ d'origine

humaine [32]. Ces matériaux deviennent des déchets de démolition une fois qu'ils ont atteint leur durée de vie prévue.

Malgré la disponibilité théorique et pratique du recyclage des déchets de C & D, les taux de recyclage restent encore faibles dans la plupart des pays du monde. Cela est particulièrement vrai dans les pays en développement à forte croissance et à construction intensive, où de grandes quantités de déchets sont générées, mais finissent dans des décharges publiques [33]. La Chine est le plus grand contributeur mondial de déchets de béton, avec un taux de recyclage moyen inférieur à 10 % (Figure 1.5).

Des taux élevés de génération de déchets et de faibles taux de recyclage sont également observés dans des économies émergentes similaires, telles que l'Inde. L'industrie mondiale du recyclage des déchets de béton est inégalement développée, avec des taux de recyclage élevés concentrés dans les pays développés (Figure 1.5).

Dans d'autres régions asiatiques telles que l'Indonésie, le Bangladesh et le Pakistan, malgré une population nombreuse, on constate une production de déchets de C & D et de débris de béton relativement faible en raison de niveaux de productivité et de développement plus bas.

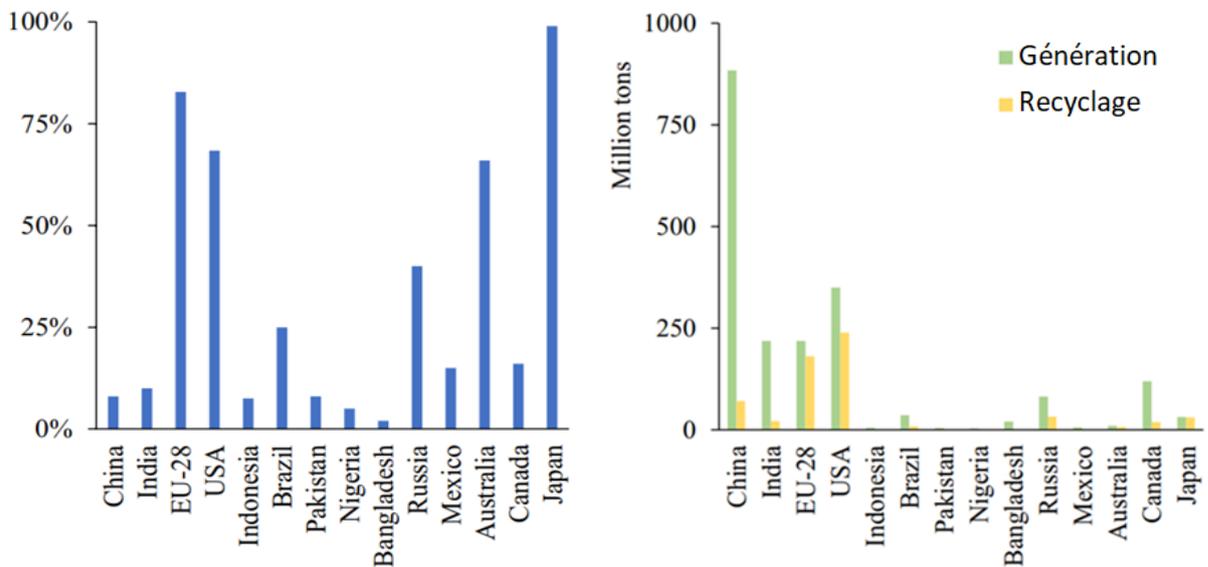


Figure 1.5. Gestion des déchets de C & D dans différentes régions du monde en 2020 [34].

En Europe, le secteur de la construction est le principal moteur de la consommation de ressources et de la génération de déchets, représentant la moitié de l'extraction de ressources

et un tiers de tous les déchets. Par conséquent, les déchets de C & D ont été identifiés comme le principal flux de déchets concernant la gestion des déchets par l'Union européenne [35]. Leur conversion totale en GR correspond à environ 11 % de la demande totale de granulats de construction au sein des 28 Etats membres de l'Association européenne de libre-échange.

Au Royaume-Uni, la production de GR a augmenté au fil du temps, ils sont utilisés dans une large gamme d'applications de construction. L'utilisation annuelle estimée de GR en 1980 était de 20 millions de tonnes ; cette estimation est passée à 71 millions de tonnes en 2015 [36].

Les statistiques spécifiques concernant la gestion des déchets de C & D en Algérie ne sont pas détaillées dans les sources disponibles. Cependant, selon le ministère de l'environnement et des énergies renouvelables, la gestion globale des déchets montre qu'en 2020, il y a eu environ 36 kg de déchets de C & D ménagers par habitant, avec une production totale d'environ 11 millions de tonnes de déchets. L'Algérie fait face à d'importants défis concernant la gestion des déchets de C & D, et leur transformation en une ressource économique à moindre coût, ainsi que le nettoyage des environnements naturels et urbains de ces débris qui s'accumulent partout. A l'exception de quelques sites de décharges réglementaires et sauvages, le secteur des déchets de C & D en Algérie continue de susciter des préoccupations parmi les défenseurs de l'environnement et de la santé, et soulève de nombreuses questions sérieuses pour ceux qui s'intéressent au développement de l'économie nationale et à la recherche de ressources durables à moindre coût pour protéger les ressources minières nationales de l'épuisement continu. Chaque jour, les Algériens se débarrassent de milliers de tonnes de débris de construction composés de divers matériaux et métaux recyclables tels que le ciment, le bois, les gravats, le sable, l'acier d'armature, les briques, le cuivre, le fer, le plâtre, l'aluminium, la céramique, et d'autres matériaux qui sont des éléments essentiels de l'architecture moderne.

1.7. Applications structurelles des BGR

Malgré les nombreuses études sur les BGR menées depuis plusieurs années, leurs applications actuelles se limitent principalement à des utilisations peu exigeantes, telles que l'aménagement paysager et les chaussées [37]. Cette situation peut s'expliquer par l'approvisionnement inconstant en matériaux recyclés, des normes ou spécifications limitées, un manque de preuves d'utilisation en service, des incitations financières et un soutien

gouvernemental insuffisant, ainsi que la perception générale que le BGR est de moindre qualité que le BGN [38].

Généralement, les normes internationales limitent l'utilisation des GR dans les bétons structurels. Le contenu acceptable de GR dans le béton dépend de la résistance souhaitée et de ces caractéristiques, telles que la composition, la densité sèche, l'absorption d'eau et le pourcentage de contaminants.

Par exemple, au Brésil, jusqu'en 2020, les GR étaient limités à des applications non-structurelles. Cependant, une révision de la norme brésilienne ABNT NBR 15116 [39], publiée en 2021, autorise désormais l'utilisation jusqu'à 20 % de GR dans le béton structurel de n'importe quelle classe de résistance. Cependant, les granulats doivent présenter des caractéristiques spécifiques telles qu'une absorption d'eau ne dépassant pas 7 %, une teneur en SO_4 et Cl inférieure à 0.1 %, et une teneur en contaminants inférieure à 1 %.

L'augmentation du contenu autorisé en GR s'accompagne généralement d'une réduction de la capacité d'absorption d'eau permise et du pourcentage de contaminants, comme dans les normes allemandes [40]. Pour les GR issus des déchets de béton, l'utilisation jusqu'à 90 % de GR est autorisée si l'absorption d'eau est inférieure à 10 % et la teneur en contaminants jusqu'à 0.2 % ; tandis que, pour les GR issus des déchets de démolition, la teneur en GR est limitée à 70 %, tandis que les limites pour la capacité d'absorption d'eau et le pourcentage de contaminants augmentent respectivement à 15 % et 0.5 %. Une situation similaire se produit au Portugal et en Australie.

En revanche, en Italie, la limitation ne concerne que la classe de résistance du béton et le type de GR. Les GR peuvent remplacer jusqu'à 30 % des GN pour le béton de classe de résistance jusqu'à C30/37.

Pour évaluer l'applicabilité des GR à l'échelle structurelle, de nombreux auteurs ont étudié la performance structurelle de poutres en béton armé avec différents taux de GR. La littérature [41-44] démontre que lorsque les poutres sont conçues pour présenter un comportement ductile, les moments fléchissants et les déformations en service ne sont pas significativement affectés, même avec des pourcentages plus élevés de GR, ce qui s'explique par l'influence limitée des propriétés du béton sur le comportement en flexion des poutres. De la même manière, et en raison de la conception ductile de l'armature en acier, le comportement en déformation et en rupture du BGR est similaire à celui du BGN. Cependant, les auteurs ont également observé que les BGR présentent généralement une faible résistance

et une fissuration précoce que le BGN, attribuée à la moindre angularité des GR, au retrait plus élevé et à une résistance à la traction inférieure des BGR.

Ignjatović et al. [43] ont observé une similarité entre le BGR et le BGN concernant la fissuration. Lorsqu'ils ont été soumis à des essais de flexion quatre points, les poutres en BGR et en BGN ont montré un comportement similaire, la progression des fissures a commencé avec l'apparition de fissures de flexion dans la région du moment maximal, puis des fissures de flexion supplémentaires sont apparues entre les régions de charge et d'appuis. A mesure que la charge augmente, certaines fissures inclinées de flexion-cisaillement apparaissent, bien que la plupart des fissures de flexion soient développées verticalement. Un comportement similaire a été remarqué par d'autres auteurs [41, 45, 46]. La figure 1.6 montre une poutre en BGN et une autre en BGR à 100 % GR soumises à un essai de flexion quatre points [44].

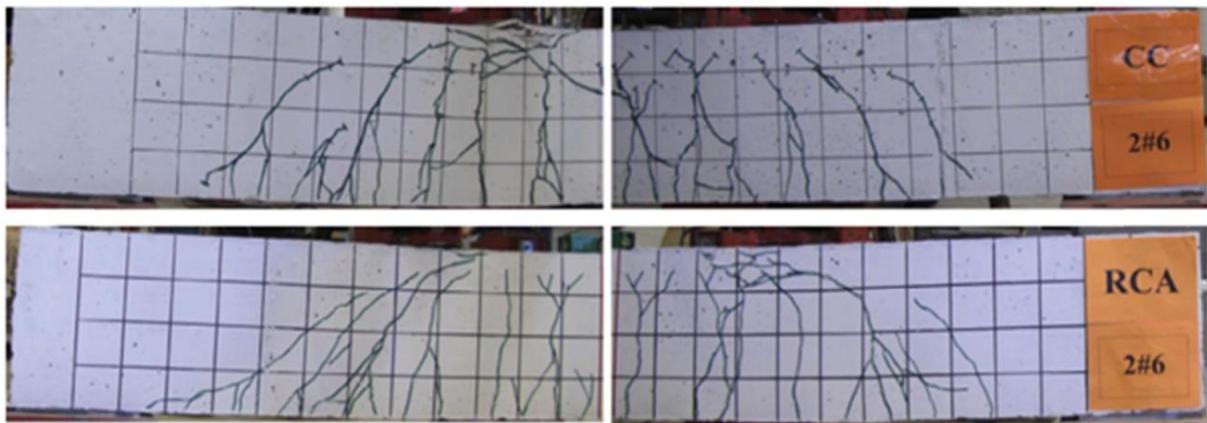


Figure 1.6. Mode de fissuration en flexion de poutres en BGN et BGR avec 100 % GR [44].

Ignjatovic et al. [43] et Kang et al. [47] ont constaté que la fissuration des poutres en BGR est similaire à celle des poutres en BGN, même pour un taux de remplacement de GR supérieur à 50 %. En revanche, Seara-Paz et al. [41], Arezoumandi et al. [44], et Bai et Sun [48] ont observé une diminution de l'espacement entre les fissures et une augmentation de la largeur des fissures dans les poutres avec un pourcentage plus élevé de GR. Les différences dans les espacements et des largeurs des fissures peuvent être liées au taux d'armature adopté par chaque auteur. Ainsi, il peut être considéré que la méthode d'analyse en flexion existante peut très bien prédire la résistance à la flexion et les déformations des poutres en BGR, mais il convient de prêter attention à l'espacement et à la largeur des fissures.

Zhang et Zhao [49] ont utilisé des jauges de contrainte pour surveiller des poutres en BGR dans un bâtiment récemment construit en Chine. Les poutres n'avaient pas présenté de

fissures, et la tendance de développement des contraintes montrait qu'elles seraient probablement maintenues en sécurité à long terme, ce qui indique la faisabilité de l'utilisation du BGR dans des projets d'ingénierie réels.

Concernant le comportement au cisaillement des poutres en BGR, les auteurs ont observé que le motif de fissuration est similaire à celui du BGN, bien que la résistance au cisaillement soit inférieure en raison de la résistance à la traction plus faible du BGR [50-54]. De plus, l'analyse à l'échelle macroscopique a montré que les ruptures en cisaillement des poutres en BGR se produisaient à travers les GR et non à l'interface entre le mortier et les granulats, comme c'est habituellement le cas pour le BGN [22].

Tošić et al. [55] ont compilé 217 résultats expérimentaux et ont créé une base de données sur la résistance à la flexion et au cisaillement des poutres en BGR armé, puis ont évalué l'applicabilité aux dispositions de l'Eurocode 2. En résultat, ils ont observé que les prédictions de l'Eurocode 2 concernant la résistance à la flexion sont précises, mais les prédictions de la résistance au cisaillement pour les poutres avec étriers ne le sont pas. Cependant, la plupart des expériences considèrent les taux de renforcement transversal minimaux dans les poutres en BGR. Ainsi, les auteurs ont proposé davantage d'expériences sur des poutres en BGR présentant des taux de renforcement transversal supérieurs au minimum requis. Des résultats similaires ont été obtenus par Pacheco et al. [56].

Malgré certaines incertitudes, il est également possible de trouver des références à des éléments en BGR dans des applications réelles. En 2004, le bâtiment "Shanghai Ecological Building" a été construit en Chine en utilisant 388 m³ de béton avec 100 % de GR. Ce bâtiment a été le premier ouvrage construit avec une grande quantité de GR. Les résultats des propriétés mécaniques et de durabilité d'échantillons choisis au hasard ont indiqué que le BGR répond généralement aux exigences existantes pour le béton conventionnel [57].

En raison du manque de GN locaux de bonne qualité et de la demande croissante pour des projets d'infrastructures pour la Coupe du monde 2020, le gouvernement du Qatar a mis en place un programme de laboratoire et un essai de construction à grande échelle pour évaluer l'aptitude du BGR dans les applications structurales [58]. Les excellents résultats ont permis des modifications dans l'édition 2014 des spécifications de construction du Qatar pour permettre un taux maximum de remplacement des GR de 20 % dans les bétons structurels jusqu'à une résistance de 30 MPa.

*Chapitre 2 : Propriétés des granulats
et des bétons multi-recyclés*

Chapitre 2 : Propriétés des granulats et des bétons multi-recyclés

2.1. Introduction

Les granulats multi-recyclés sont des matériaux obtenus à partir du recyclage multiple de béton. Ils présentent plusieurs propriétés intéressantes en termes d'efficacité et de durabilité.

Formuler des bétons à partir de granulats multi-recyclés nécessite une bonne connaissance de leurs propriétés. Ils se distinguent des granulats naturels par la présence d'une quantité de mortier résiduel d'ancien béton qui augmente à chaque cycle de recyclage. Ils ne peuvent pas être considérés comme inertes, ils peuvent en effet influencer le processus d'hydratation et modifient la texture du béton.

L'introduction des granulats multi-recyclés dans le béton peut altérer ses propriétés physico-mécaniques en raison des différences notables en termes de taille, de forme et de texture par rapport aux GN. Ces changements peuvent influencer la résistance et la durabilité du béton, en modifiant également sa porosité. Il est donc impératif de prendre en compte ces effets lors de la fabrication du béton.

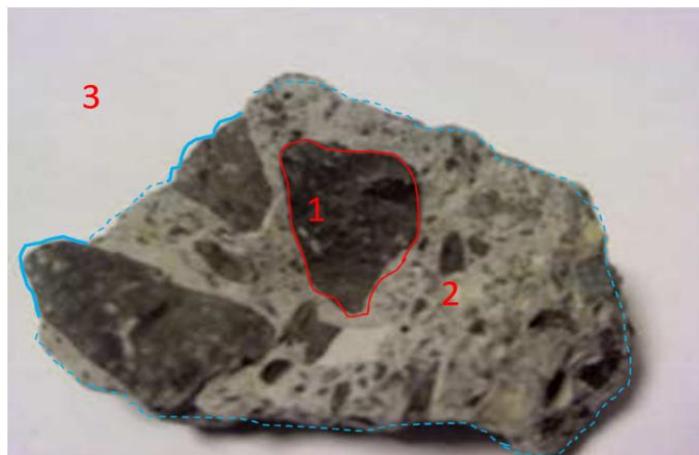
Néanmoins, des études ont révélé que l'utilisation de ces granulats peut apporter des avantages significatifs, tels que la réduction des déchets de construction envoyés en décharge [59-64]. Ainsi, il est crucial de comprendre l'impact précis de ces derniers sur le béton afin de prendre des décisions éclairées pour la construction de bâtiments durables.

Ce chapitre offre une revue de la littérature portant sur les caractéristiques des granulats dérivés de plusieurs cycles de recyclage, tout comme les différentes méthodes de traitement appliquées sur ces granulats. Par la suite, une analyse détaillée examine comment le multi-recyclage affecte les propriétés du béton dans ses états frais et durcis, ainsi que l'effet de ces granulats sur sa microstructure et ses déformations différées.

2.2. Propriétés des granulats multi-recyclés

2.2.1. Propriétés physiques

Lors du processus de concassage du béton, le mortier s'attache au granulat d'origine. Cependant, la pâte de ciment adhérente est plus poreuse, ce qui a un impact négatif sur les propriétés du GR. Cette dernière est incluse dans le mortier global de BGR, conduisant ainsi à une proportion totale de mortier supérieure à celle du BGN. La figure 2.1 montre les composants inclus dans le GR.



- 1- Granulat naturel 2- Mortier attaché 3- Nouveau mortier
— Ancienne ITZ entre granulat naturel et mortier attaché
— Nouvelle ITZ entre granulat naturel et nouveau mortier
- - - Nouvelle ITZ entre ancien mortier attaché et nouveau mortier

Figure 2.1. Composition d'un granulat recyclé [18].

2.2.1.1. Quantité de mortier attaché

Le mortier attaché présent dans les GR est responsable des propriétés physico-mécaniques de ces granulats (une densité plus faible, une absorption plus élevée, et une abrasion de Los Angeles accrue). Ces caractéristiques ont un impact négatif sur la qualité du BGR, affectant principalement ses propriétés liées à la déformation (retrait et fluage), ainsi que sa durabilité et ses résistances mécaniques [27]. La réduction de la qualité des GR dépend de la quantité de mortier attaché.

En raison de la nature des matériaux qui composent le béton fabriqué avec des GR, les caractéristiques de ces derniers sont dégradées lors du processus du multi-recyclage. En effet, le procédé de concassage fragmente les GN présents dans la matrice des GR en petits morceaux, créant ainsi des GR constitués de particules de GN plus petites et d'une plus grande

quantité de mortier attaché. Selon Thomas et al. [62], la quantité de mortier attaché aux GR augmente progressivement avec le nombre de cycles jusqu'à ce que la présence de GN d'origine devienne négligeable, ce qui est censé se produire après le quatrième cycle de recyclage.

Des résultats similaires ont été obtenus par Zhu et al. [65] qui ont souligné qu'une plus grande quantité de mortier attaché donne un matériau plus poreux qui facilite la pénétration des fluides.

2.2.1.2. Morphologie

La morphologie des GR est différente de celle des GN. Les GR présentent souvent des particules anguleuses avec une rugosité de surface significative. Cette morphologie a une influence considérable sur les propriétés rhéologiques et sur le comportement des bétons à l'état frais. Cette influence est peu exploitée dans la littérature.

Abreu et al. [59] ont constaté que les GR présentent une qualité inférieure à celle du GN et cette qualité diminue avec l'augmentation du nombre de cycles. Cela est principalement dû à l'augmentation de la quantité du mortier attaché au GN à chaque cycle, comme illustré dans la figure 2.2. Cependant, ils ont souligné que cette accumulation de mortier devient de moins en moins importante d'un cycle à l'autre, ce qui permet d'établir une limite de chaque propriété.



Figure 2.2. Morphologie des granulats : (a) GN; (b) GR1; (c) GR2; (d) GR3 [59].

L'utilisation des méthodes d'élimination du mortier attaché pourrait entraîner des modifications dans la morphologie des GR. Gomes et al. [66] ont souligné que les traitements tels que le broyage et les attaques chimiques sur la surface des GR impliquent des changements dans leur morphologie, qui peut tendre vers une forme plus sphérique ou plus allongée. Cela pourrait contribuer à améliorer leur répartition granulométrique (Figure 2.3).



Figure 2.3. Morphologie de GR avant et après traitement avec 33 % HCl [66].

2.2.1.3. Granulométrie

La taille des granulats recyclés varie en fonction de la qualité du béton d'origine. Lorsque le béton est de mauvaise qualité, il contient une importante quantité de particules fines après son concassage [67].

Des chercheurs ont démontré que la taille des particules des GR présente de légères variations par rapport à celle des GN. Sagoe-Crentsil et al. [68] et Shayan et Xu [69] ont constaté que les courbes de distribution granulométrique des GR se situent dans la plage de référence spécifiée. Ces résultats suggèrent que la taille des particules du GR est conforme aux normes en vigueur, ne nécessitant ainsi aucun ajustement. Eckert et Oliveira [70] ont conclu que les GR peuvent tous présenter une distribution de taille régulière et continue.

Dans une étude menée par Huda et Alam [61], les GN ont été entièrement remplacés par différentes générations de GR pour produire du béton contenant des GR multi-recyclés. La figure 2.4 présente les résultats de l'analyse granulométrique de GN et de trois générations de GR selon la norme de l'Association canadienne de normalisation (CSA : Canadian Standards Association). A partir de cette figure, on peut observer que toutes les générations de GR se situent dans la plage acceptable définie par la norme CSA.

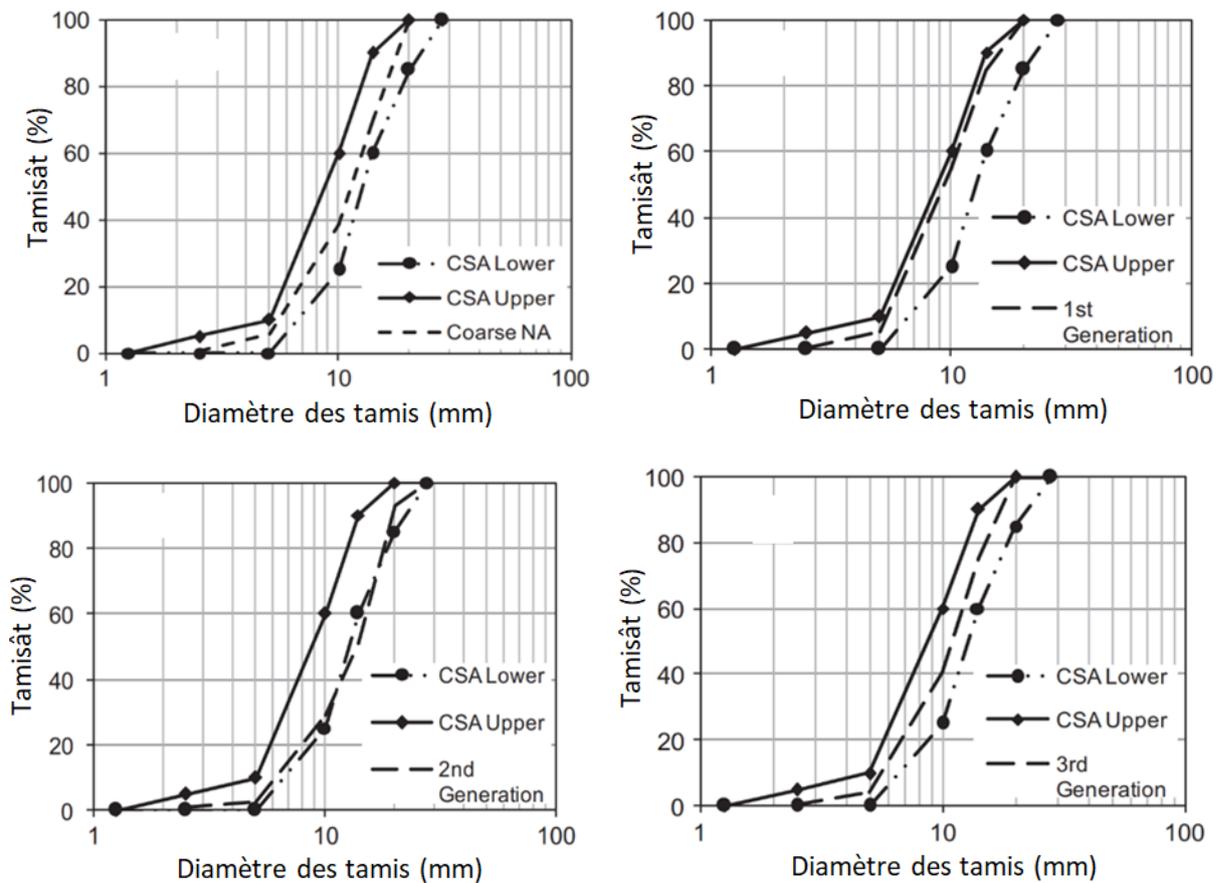


Figure 2.4. Analyses granulométrique de GN et trois générations de GR [61].

2.2.1.4. Densité

La densité absolue est une mesure du volume du matériau solide sans prendre en compte les pores. On peut la définir comme le rapport entre la masse du matériau solide et la masse d'un volume équivalent d'eau distillée sans gaz.

Salesa et al. [71] ont observé une baisse de la densité des GR à mesure que le nombre de cycles augmente. Pour le premier, le deuxième et le troisième cycle, cette réduction atteignait respectivement 2.38 g/cm^3 , 2.28 g/cm^3 et 2.22 g/cm^3 , alors que le GN présentait une densité de 2.54 g/cm^3 . Cette diminution est due à la pâte de ciment attaché qui reste sous forme de résidus sur le GN après le processus de recyclage.

Selon Abreu et al. [59], la densité des GR diminue au fur à mesure que le nombre de cycles augmente, avec des baisses de 11 %, 17 % et 19 % pour les GR1, GR2 et GR3 respectivement.

De même, Silva et al. [60] ont trouvé une réduction allant jusqu'à 6 %, 10 % et 11 % de la densité des GR pour la première, la deuxième et la troisième génération, respectivement. Ils

ont conclu qu'il existe une valeur minimale des densités des GR, quel que soit le nombre de cycles de recyclage.

Cet effet sur la densité n'est pas un inconvénient, mais plutôt un avantage, car il permet d'alléger le poids du béton dans lequel les GR sont incorporés. Ce facteur pourrait même être pris en compte dans les codes. Cependant, il est important de le considérer attentivement lors du calcul du volume dans le béton, car une même masse de GR occupe un volume plus élevé que celle des GN lors de la formulation d'un BGR [72].

2.2.1.5. Absorption d'eau

En général, les granulats possèdent une certaine porosité qui permet l'accès de l'eau. Les GR se distinguent par leur capacité d'absorption d'eau élevée. Les études confirment de manière unanime que l'absorption d'eau des GR dépasse largement (près de trois fois) celle des GN en raison de leur porosité élevée [70, 73].

Huda et Alam [61] ont souligné que la valeur d'absorption d'un GR multi-recyclé est une expression de sa porosité. Dans leurs études, les capacités d'absorption de GR1, GR2 et GR3 étaient respectivement de 5.2 %, 7.1 % et 9.4 %, tandis que la capacité d'absorption des GN n'était que de 1.2 %, ce qui était bien inférieure à tous les GR. Les valeurs d'absorption élevées des GR multi-recyclés augmentent principalement en raison de la présence du résidu de pâte de ciment qui restait encore attaché à la surface du GN après concassage. Par conséquent, l'absorption des GR augmente considérablement lorsque le nombre de cycles augmente.

Selon Abreu et al. [59], l'absorption d'eau des GR augmente avec le nombre de cycles. Ils ont trouvé que l'absorption augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne 9.6 % pour les GR3. Alors qu'elle est de 1.1 % pour le GN. Ces changements peuvent être dus à la quantité de mortier attaché au GR, rendant ainsi la saturation totale des granulats plus difficile.

De manière similaire, les recherches de Salesa et al. [66] ont démontré que l'absorption d'eau des GR augmente avec le nombre de cycles. Alors que l'absorption des GN est de 1.1 %, ils ont observé que celle-ci atteignait 5.2 % pour les GR1 et 6.2 % pour les GR2.

De même, Silva et al. [60] ont constaté que l'absorption d'eau des GR augmente à chaque cycle. La figure 2.5 met en évidence cette augmentation et semble indiquer que plus le nombre de cycles augmente, plus le temps nécessaire pour atteindre un certain niveau d'absorption d'eau s'accroît.

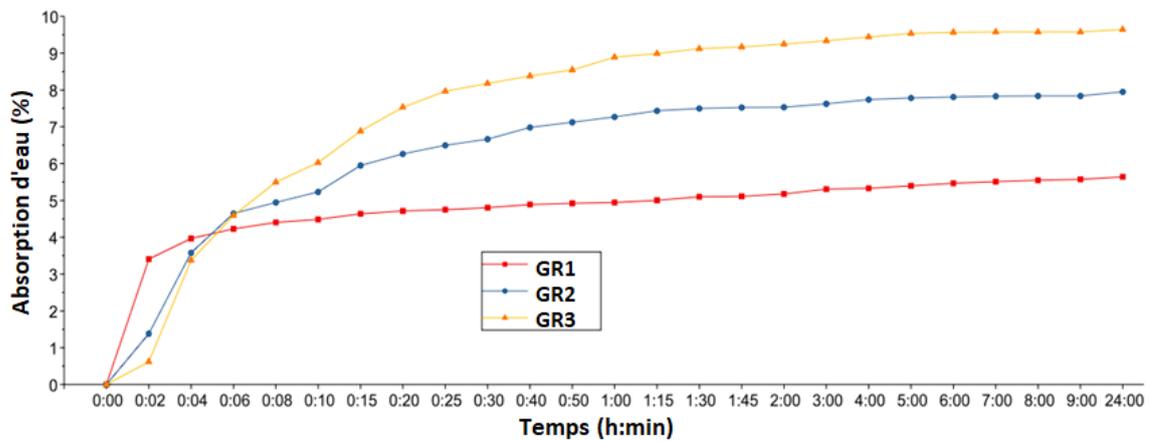


Figure 2.5. Absorption d'eau des GR en fonction du temps [60].

2.2.2. Propriétés mécaniques

Les GR présentent des performances mécaniques inférieures à celles des GN. Cela se manifeste par des valeurs plus élevées pour le test de Los Angeles. Le tableau 2.1 présente les résultats d'une comparaison des résultats trouvés par divers chercheurs concernant les valeurs d'abrasion de Los Angeles entre les différentes générations des GR et les GN. D'après le tableau, on constate que la plupart des chercheurs ont trouvé une augmentation du coefficient de Los Angeles avec l'augmentation du nombre de cycles de recyclage.

Conformément à la norme espagnole pour le béton structural EHE [74], les granulats doivent avoir un coefficient de Los Angeles inférieur à 40. Selon Azzaz Rahmani et al. [75], tous les GR présentaient un coefficient de Los Angeles nettement inférieur à cette limite, même après le deuxième cycle de recyclage. Par ailleurs, selon les études menées par Abreu et al. [59] et Silva [60] et al., les coefficients de Los Angeles des GR2 et des GR3 ont dépassé cette limite. Spaeth et Tegguer [76] ont rapporté que la présence de mortier attaché sur les particules de GR réduit la résistance à l'abrasion et conduit inévitablement à un béton de qualité inférieure à celle du béton parent.

Tableau 2.1. Valeurs du coefficient de Los Angeles de différentes générations de GR.

Auteur	Dimension des granulats (mm)	Coefficient de Los Angeles (%)			
		GN	GR1	GR2	GR3
Abreu et al. [59]	4 – 22.4	27.9	38.8	41.1	40.9
Silva et al. [60]	4 – 22.4	27.9	38.8	41.2	/
Azzaz Rahmani et al. [75]	3 – 15	24	34	38	/

2.2.3. Techniques d'amélioration des performances des GR

Il est bien connu que le mortier attaché constitue la principale faiblesse des GR. Par conséquent, certaines études se sont concentrées sur le traitement des GR, soit en améliorant leurs propriétés à l'aide d'additions minérales [77, 78], soit en séparant le mortier attaché en utilisant des méthodes mécaniques, chimiques ou physiques [79, 80]. Ces différentes techniques reposent sur les différences de propriétés entre le GN et le mortier attaché, qui présente une zone de transition interfaciale (ITZ) plus faible [81].

2.2.3.1. Séparation du mortier attaché

Montgomery [82] a utilisé un procédé d'élimination du mortier à l'aide d'un broyeur à boulets afin d'améliorer la qualité des GR et par la suite, un broyage à chaud a été utilisé.

Tateyashiki et al. [83] et Ma et al. [84] ont obtenu des GR de haute qualité en utilisant un procédé de chauffage suivi de broyage. Cependant, les performances des GR ont été altérées, en raison de la formation de microfissures durant le processus de broyage.

Katz [85] a opté pour un nettoyage à l'eau par ultrason afin de retirer le mortier attaché. Cette méthode s'est avérée adaptée pour séparer le mortier présentant une faible adhérence, mais elle ne fonctionne pas aussi bien pour le mortier ayant une forte adhérence.

Tam et al. [86] ont choisi une immersion dans une solution acide pour éliminer le mortier attaché à la surface des GR. Cependant, cette approche entraîne une augmentation de la teneur en acide dans les GR, ce qui implique des coûts élevés et une faisabilité limitée.

2.2.3.2. Renforcement du mortier attaché

Des ajouts minéraux ont été employés pour traiter les GR afin de renforcer le mortier attaché. De plus, le dépôt de poudre de *calcaire/carbonate de calcium* peut combler les microvides à l'intérieur du mortier attaché. Certains matériaux de traitement peuvent former un revêtement hydrofuge à la surface des GR. Le principal objectif est de combler les zones fragiles et de développer des ITZ plus solides sur les GR.

Kou et al. [87] ont souligné que le traitement des GR avec une solution de polymère alcool polyvinylique (PVA) pourrait augmenter leurs propriétés mécaniques. Wan et al. [88] ont examiné les effets d'un traitement des GR avec une solution de PVA à 1 % et ont observé une amélioration de la résistance à la compression et de la maniabilité du BGR. D'autres études ont démontré que les polymères hydrofuges à base de silicone ont un impact significatif sur la qualité des GR [76, 89].

En général, les polymères imperméables à base de PVA et de silicone peuvent améliorer efficacement la qualité des GR et la maniabilité du BGR, mais ils ne peuvent pas augmenter ni diminuer la résistance à la compression du BGR [90].

Les GR ayant un impact défavorable sur la durabilité de BGR. Cependant, ce problème peut être atténué en incorporant une certaine quantité d'ajouts minéraux, tels que les cendres volantes [91].

Si les GR sont pulvérisés ou immergés dans une solution de matériau pouzzolanique, en particulier celle contenant de la fumée de silice, cette solution peut remplir les pores et les vides à l'intérieur du mortier attaché, puis réagir avec la portlandite pour former des CSH. Le traitement avec la fumée de silice pourrait améliorer la microstructure des ITZ dans le BGR [85, 92].

Tam et Tam [93] ont également remplacé 20 % du ciment par la fumée de silice lors de la procédure de pré-mélange. La réaction pouzzolanique et l'effet de remplissage de la fumée de silice se sont révélés efficaces en raison de sa surface spécifique élevée. Ainsi, la microstructure du BGR était beaucoup plus dense et les ITZ étaient évidemment améliorées par l'ajout de la fumée de silice.

Shayan et Xu [69] ont trempé les GR dans une solution contenant de la chaux et de la fumée de silice, montrant ainsi que la fumée de silice avait un impact plus bénéfique sur les propriétés des GR.

Kou et al. [94] ont démontré que l'ajout de cendres volantes dans le BGR pouvait réduire sa perméabilité au chlorure, mais aussi diminuer sa résistance.

Otsuki et al. 2003 [95] et Tam et al. [92] ont démontré que les GR peuvent être enrobés de mortier composé de ciment, de sable fin et d'un faible rapport E/C, ce qui permet d'améliorer les propriétés du BGR en termes des résistances mécaniques, de la résistance à la pénétration des chlorures et de la résistance à la carbonatation.

2.3. Propriétés des bétons multi-recyclés

2.3.1. Effet du multi-recyclage sur les propriétés du béton frais

2.3.1.1. Ouvrabilité

L'incorporation des GR dans la composition du béton a suscité un intérêt particulier quant à son influence sur l'ouvrabilité du matériau. Les propriétés des granulats issus de cycles de recyclage multiples peuvent engendrer des variations notables dans la consistance et la maniabilité du béton. Cette interaction entre les granulats multi-recyclés et la capacité de mise en forme du béton constitue un aspect essentiel à explorer pour garantir des résultats optimaux dans la construction durable.

Plusieurs recherches ont démontré que, pour une même proportion E/C, l'incorporation des GR réduit l'affaissement du BGR par rapport au BGN [71, 96].

Selon une étude menée par Salesa et al. [71], la valeur de l'affaissement du BGN est la plus élevée, atteignant 69 mm. En revanche, les BGR1 et BGR2 présentent des affaissements respectifs de 55 mm et 50 mm. Cette observation indique une réduction de l'ouvrabilité ou des valeurs d'affaissement pour les BGR en comparaison avec le BGN. Comme la valeur d'affaissement du BGR1 est supérieure à celle de BGR2, les chercheurs ont conclu qu'il existe une tendance à une diminution de la maniabilité à chaque cycle de recyclage. Ils ont justifié ce comportement par la plus grande rugosité et l'angularité des GR par rapport aux GN. De plus, les GR ont une plus grande capacité d'absorption d'eau que les GN, et cette capacité augmente également avec le nombre de cycles. Ces facteurs combinés contribuent à une diminution de l'ouvrabilité des BGR à chaque cycle de recyclage. Des résultats similaires ont été obtenus par Marie et Hisham [97] et Huda et Alam [61].

Salas et al. [98] ont étudié les effets des GR sur les propriétés du béton frais pour son application aux chaussées rigides d'aérodrome en utilisant la méthode de mélange en deux étapes (TSMA). Divers mélanges de béton avec différents pourcentages de GR et d'ajouts minéraux ont été testés. Les GR ont été maintenus dans des conditions d'humidité d'environ 80 % de leur capacité d'absorption. L'eau de mélange a été ajustée en fonction de l'absorption d'eau du GR. Les résultats ont montré que la TSMA peut être une méthode efficace pour améliorer les propriétés du BGR. La valeur d'affaissement du BGR a donné des résultats similaires par rapport au BGN. Ainsi, la TSMA avec une humidité initiale absorbée plus

élevée a réduit les effets négatifs de maniabilité associés au GR. De plus, les BGR avec de la fumée de silice ou des fibres ont eu une ouvrabilité réduite.

L'état d'humidité des GR est un paramètre majeur qui influence la maniabilité des BGR. Les GR séchés en surface contiennent de l'humidité dans les pores du mortier attaché, ce qui augmente la teneur en eau unitaire du béton. Cela réduit la contrainte de cisaillement du mélange, entraînant une valeur d'affaissement élevée [99].

De même, Yang et Kim [100] ont utilisé des GR à l'état saturé pour le mélange de béton. Les taux de remplacement étaient de 30 %, 50 %, 70 %, et 100 %, et le même rapport E/C a été appliqué pour tous les mélanges. Il a été observé que le rapport E/C réel du béton a augmenté à mesure que le taux de remplacement augmentait, dû à l'humidité dans les pores du mortier attaché.

Wardeh et al. [101] ont rapporté qu'il était possible de maintenir une valeur d'affaissement constante (180 ± 10 mm) malgré l'augmentation des taux de remplacement de GR saturé de 30 %, 65 % et 100 % en ajoutant de l'eau de gâchage au béton pendant le processus de mélange. Cependant, par comparaison avec les GR à l'état saturé en surface et séchés à l'air, le béton comportant des GR à l'état sec diminue rapidement la quantité d'eau libre dans le mélange en raison de son absorption d'eau importante. Cela conduit à une perte d'affaissement plus rapide au fil du temps [102].

D'autre part, la maniabilité du BGR est influencée par la texture et la forme du GR [103]. Dans une étude réalisée par Butler et al. [104], le BGR nécessitait 3.1 à 9.4 % d'eau de mélange supplémentaire pour atteindre des niveaux de maniabilité similaires à ceux du BGN. Les auteurs ont attribué cela au frottement intergranulaire accru dû à la forme plus angulaire et à la texture de surface rugueuse des GR.

Au contraire, dans l'étude de Bae et al. [105], dans laquelle des GR de forme ronde ont été utilisés, le pourcentage de superplastifiant nécessaire pour atteindre un affaissement de 150 ± 25 mm à des taux de remplacement de 10 %, 30 % et 50 % a été réduit de 0.6 % pour le BGN à 0.5 %, 0.45 % et 0.4 %, respectivement. En effet, les particules de granulats de forme ronde ont une tendance à augmenter la maniabilité du béton en raison de l'effet de roulement à billes [106]. Cependant, il a été souvent rapporté qu'il est possible d'atteindre un affaissement cible indépendamment de la qualité de GR et du taux de remplacement en utilisant des additifs chimiques et des GR pré-saturés [107, 108].

2.3.1.2. Teneur en air

La teneur en air du béton est mesurée en pourcentage du volume d'air emprisonné dans le mélange. Il est important de noter que la teneur en air du BGR peut être influencée par divers facteurs, notamment la granulométrie des GR, la qualité du ciment utilisé, les pratiques de mélange et de compactage, ainsi que les méthodes de contrôle de la qualité.

Huda et Alam [61] ont observé une augmentation de la teneur en air à mesure que le nombre de cycles augmente. Les bétons contenant des granulats multi-recyclés semblent présenter une légère augmentation de la teneur en air par rapport au BGN, bien que la même quantité d'entraîneur d'air a été utilisée à chaque fois. Cependant, la raison de cette augmentation n'est pas claire, bien qu'elle soit probablement due à l'augmentation de la quantité de mortier attaché avec les cycles. La masse volumique des GR diminue progressivement avec les cycles par rapport au GN. C'est une autre raison pour laquelle le BGR3 présente une teneur en air la plus élevée, compte tenu de sa masse volumique plus faible.

Une étude réalisée par Katz [109] a également démontré que la teneur en air du BGR était élevée d'environ 4 à 5.5 % par rapport au BGN. En revanche, les recherches menées par Salesa et al. [71] n'ont relevé aucune disparité significative entre le BGN et les BGR, ni entre les diverses générations de BGR.

2.3.1.3. Rhéologie

Bien que l'essai au cône d'Abrams soit l'essai le plus utilisé dans le monde pour sa simplicité, il reste une mesure statique ne mesurant qu'un seul paramètre et ne donnant pas une bonne indication sur la rhéologie du béton. Par exemple, deux bétons de formulations différentes peuvent avoir le même affaissement au cône d'Abrams sans qu'ils aient la même rhéologie.

Pour le maître d'œuvre, le comportement du béton frais est très important, car il va conditionner le déroulement du chantier et la qualité finale de l'ouvrage. La tendance actuelle conduit à l'utilisation de bétons de plus en plus fluides.

La rhéologie, créée en 1929 aux Etats-Unis par Eugène Cook Bingham, est une science qui traite l'écoulement des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées.

La caractérisation rhéologique du béton permet de quantifier l'écoulement du mélange, en étudiant les relations entre la déformation, la vitesse de cisaillement, la contrainte et le temps.

La rhéologie du béton frais, influencée par les constituants du mélange (teneur en ciment, rapport eau/ciment, ratio entre les granulats grossiers et fins, teneur en superplastifiant, etc.), peut être caractérisée par le modèle de Bingham (c'est-à-dire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique). Ce modèle est considéré comme capable de décrire approximativement le comportement du béton frais [110], bien que d'autres modèles ont également été proposés pour expliquer la non-linéarité du comportement d'écoulement.

Les matériaux fluides sont caractérisés par deux paramètres rhéologiques : le seuil de cisaillement τ_0 (Pa) et la viscosité plastique μ (Pa.s). La viscosité d'un fluide est la propriété qui exprime sa résistance à un cisaillement, tandis que le seuil de cisaillement est la contrainte en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas possible.

Dans le cas du BGR, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, en plus d'être affectés par les mêmes facteurs que ceux rencontrés dans le BGN, ils sont principalement influencés par l'état d'humidité des GR, leur forme irrégulière et leur rugosité due au mortier attaché [111]. Alors que l'utilisation de GR secs conduit à l'absorption de l'eau de gâchage dans des mélanges, provoquant une augmentation à la fois du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, la plus grande rugosité des GR entraîne une plus grande friction inter-particules et donc un seuil de cisaillement plus élevé.

Azzaz Rahmani et al. [75] ont mené une étude pour examiner l'impact du multi-recyclage (2 cycles de recyclage) sur les caractéristiques rhéologiques du béton avec un rapport E/C de 0.6. Dans le cas d'utilisation des GR à l'état sec, ils ont observé que pour un béton composé de 100 % de GR, le seuil de cisaillement a augmenté de 21 % et 37 % pour le premier et le deuxième cycle, respectivement. De manière similaire, la viscosité a suivi la même tendance, avec une augmentation de 37 % et 46 % pour les BGR1 et BGR2, respectivement (Figure 2.6). Cela peut être dû à la capacité d'absorption d'eau plus élevée des GR par rapport aux GN. En revanche, ils ont observé une légère élévation des caractéristiques rhéologiques lorsque les GR étaient utilisés à l'état saturé.

L'augmentation des paramètres rhéologiques est attribuée à l'augmentation de la quantité de mortier attaché aux GN. Ce dernier contient un volume important de pores qui favorisent l'absorption de l'eau, conduisant à la réduction de l'effet de lubrification du BGR [112].

Kenai et al. [113] ont indiqué que la substitution de 50 % ou 100 % de GN par des GR conférait au BGR d'excellentes propriétés rhéologiques comparables à celles du BGN, tout en réduisant la stabilité au ressuage.

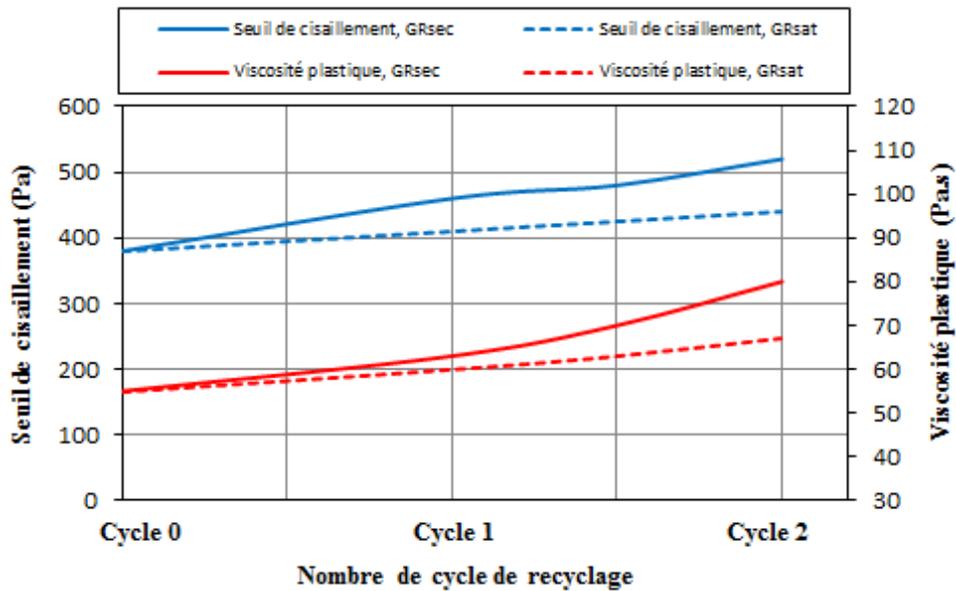


Figure 2.6. Relation entre les paramètres rhéologiques et le nombre de cycles [75].

2.3.2 Effet du multi-recyclage sur les propriétés du béton durci

2.3.2.1. Microstructure

L'analyse de la microstructure du béton multi-recyclé joue un rôle vital permettant d'optimiser la composition du béton, d'ajuster les proportions des matériaux, d'évaluer la durabilité et les performances mécaniques. Cela offre également des bases éclairées pour la conception et la réalisation d'infrastructures durables. Toutefois, malgré cette importance, le nombre d'études se penchant sur ce sujet demeure limité.

Thomas et al. [62] ont analysé l'impact de l'utilisation des GR de différentes générations sur les caractéristiques du béton. L'objectif était de comparer les performances des trois générations de BGR avec le BGN, tout en explorant l'évolution des micropropriétés du béton à l'aide d'une MEB à mesure que les granulats sont recyclés à plusieurs reprises. Les séquences de micrographies à électrons secondaires à 50, 100, 500 et 1500 fois d'agrandissement des mélanges BGN, BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100 sont présentées dans la figure 2.7. L'analyse microstructurale révèle une présence de fissures dues au retrait du béton. Une plus grande quantité de mortier dans les bétons multi-recyclés entraîne l'apparition d'un plus grand nombre de fissures de retrait. Cependant, la taille des fissures est similaire dans tous les mélanges de béton. De plus, aucune fissure générée dans une interface de pâte de ciment ancienne-nouvelle n'a été observée. Toutes les fissures sont générées dans l'interface pâte de ciment-GN, indépendamment de leur origine.

Medina et al. [114] ont rapporté qu'une teneur plus élevée en pâte de ciment dans les GR et la réduction de la taille du GN ont des effets négatifs sur la microstructure du BGR.

Poon et al. [115] ont examiné la microstructure de l'ITZ entre les GR et le mortier dans le BGR à l'aide d'un MEB. Les observations ont révélé que l'ITZ entre les GN et le mortier dans le BGN était principalement composée d'hydrates lâches et poreux. La microstructure de l'ITZ dans le BGR semblait jouer un rôle important dans le développement de sa résistance. Il était anticipé que les propriétés mécaniques du BGR pourraient être améliorées en ajustant les propriétés de surface et la structure poreuse des GR.

RILEM TC 159-ETC [116] a souligné que l'ITZ ne doit pas être considérée comme un matériau bien défini, mais plutôt comme un système dont les propriétés dépendent de la composition globale ainsi que de la méthode de fabrication du composite cimentaire. La microstructure de l'ITZ dépendrait dans une large mesure de la distribution granulométrique du liant et de sa capacité à se tasser efficacement à la surface du granulat. Bentz [117] a déclaré que la microstructure de l'ITZ entre la pâte de ciment et le granulat dépendait de la nature du granulat, en particulier de sa porosité et de son absorption d'eau.

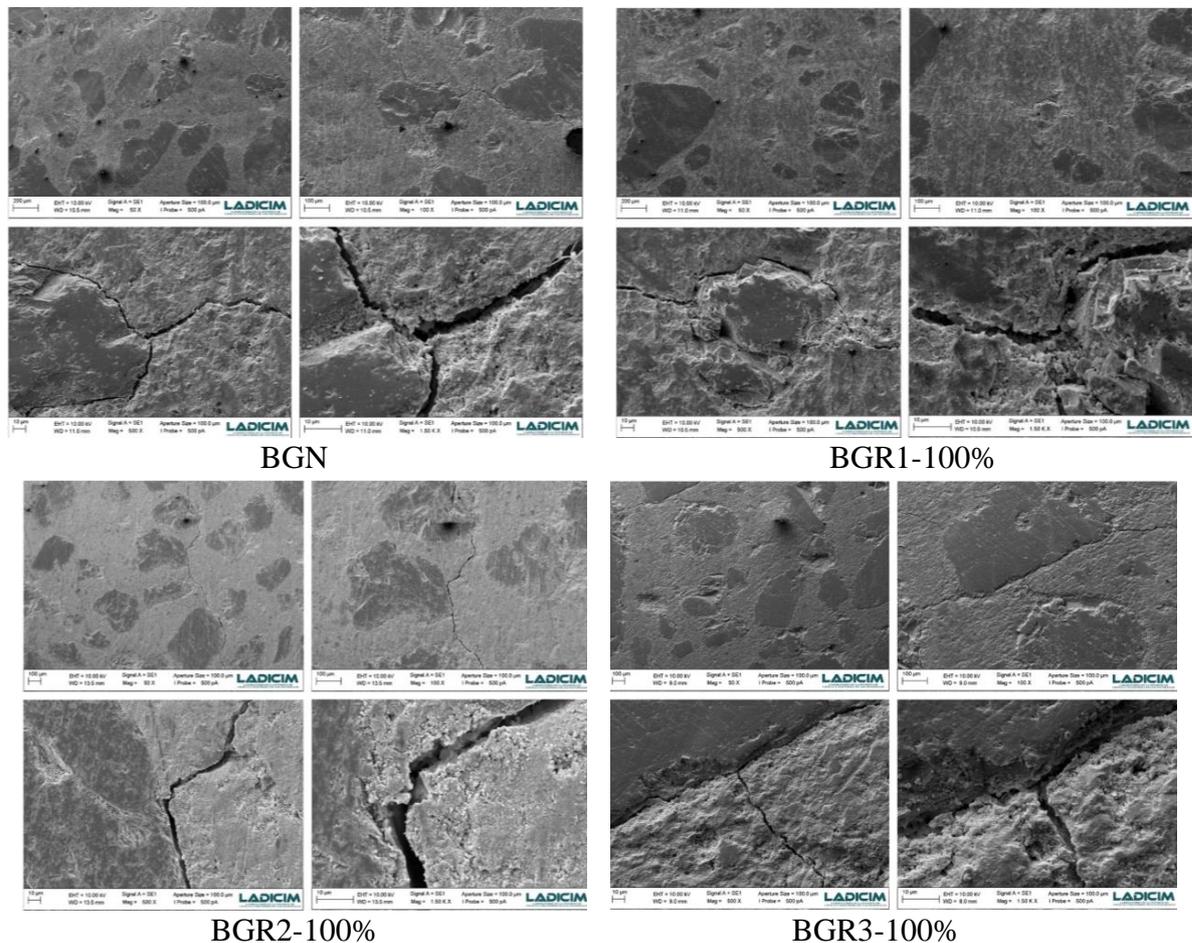


Figure 2.7. Micrographies par MEB (grossissement : 50x, 100x, 500x et 1500x) [62].

2.3.2.2. Propriétés mécaniques

a) Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus fondamentale et la plus représentative qui est à la base d'autres propriétés du béton telles que sa durabilité.

Plusieurs études ont montré que la résistance à la compression des BGR diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de recyclage [59, 118]. Ces tendances sont dues au fait que les BGR ont une structure plus poreuse, ce qui affaiblit leurs performances mécaniques [119, 120]. Au contraire, Poon et al. [121], Pavon et al. [122], et Etxeberria et al. [123] ont démontré que l'utilisation des granulats grossiers 100 % multi-recyclés n'entraîne aucune baisse de la résistance à la compression du BGR par rapport au BGN.

La faible densité apparente du BGR3, la grande quantité de mortier attaché et la faible ITZ sont les principales raisons de la dégradation significative de la résistance à la compression du BGR3 [124, 125].

Selon Malesev et al. [126], la résistance à la compression du béton dépend principalement de la qualité des GR. Si des GR de bonne qualité obtenus en concassant du BGN de classes de résistance plus élevées sont utilisés pour la fabrication d'un BGR, l'utilisation de ces derniers n'a aucun impact sur la résistance à la compression du BGR, quel que soit le taux de substitution. Cela indique que les propriétés du béton parent ont un effet important sur la qualité du BGR obtenu.

Dans son étude, Kim [127] a classé la qualité des GR en quatre catégories en se basant sur la densité et l'absorption d'eau pendant 24 heures.

- GR de haute qualité (HGR),
- GR de qualité moyenne (MGR),
- GR de faible qualité (LGR),
- GR de qualité non conforme (NGR) s'ils ne répondent pas aux critères de qualité minimale spécifiés par la norme japonaise (JIS).

La figure 2.8 illustre la résistance à la compression relative des bétons fabriqués avec différentes qualités de GR en fonction des taux de substitution reportée par plusieurs auteurs.

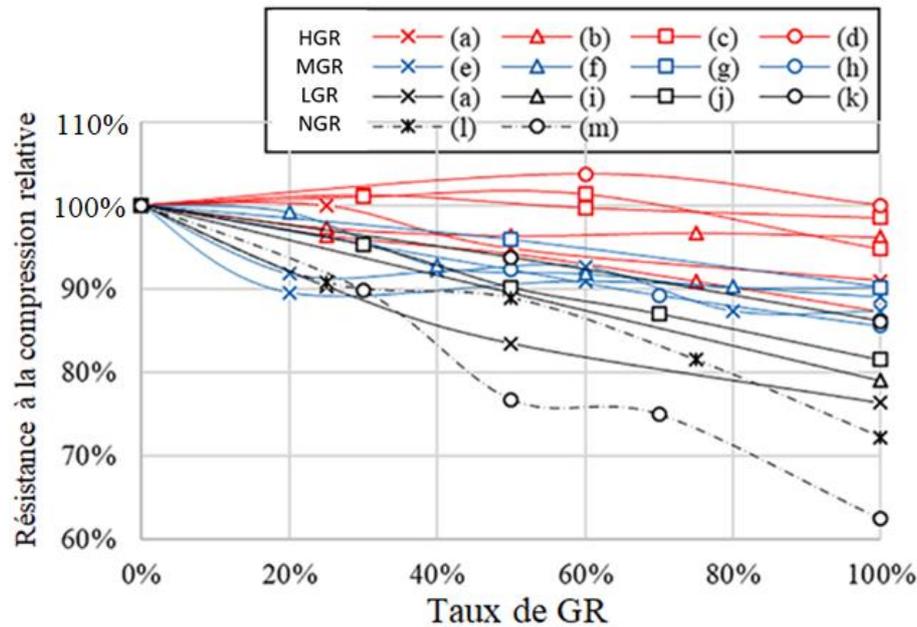


Figure 2.8. Influence de la qualité des GR sur la résistance à la compression du BGR.

Kim et al. [128] ont obtenu des HGR d'une densité de 2.5 g/cm^3 et une absorption d'eau de 2.87% et des LGR d'une densité de 2.26 g/cm^3 et une absorption d'eau de 6.07 % à partir d'une même source de BN, en appliquant différentes techniques de concassage. Les BGR ont été produits, respectivement avec deux GR (HBGR et LBGR). Avec des taux de remplacement de 25 %, 50 % et 100 %, la résistance à la compression du HBGR était de 30.9 MPa, 29.3 MPa et 28.1 MPa, soit 0.5 % et 9 % de moins que celle du BGN. Alors que la résistance à la compression du LBGR a diminué de 10 %, 17 %, et 24 %, indiquant qu'il existe une forte corrélation entre la qualité des GR et la résistance à la compression du béton.

Cho et al. [129] ont ensuite traité HGR1 avec une densité de 2.54 g/cm^3 et une absorption d'eau de 2.26 % pour obtenir HGR2 avec une densité de 2.58 g/cm^3 et une absorption d'eau de 1.52 %. Selon la norme JIS, ces deux GR entrent dans la catégorie de haute qualité, mais il est clair que HGR2 est de meilleure qualité. Par conséquent, comme prévu, à un niveau de remplacement de 100 %, la résistance à la compression du HBGR1 a diminué d'environ 13 % par rapport à celle du BGN, tandis que celle de HBGR2 a diminué d'environ 4 %. Une tendance similaire est observée dans d'autres études [130, 131].

Pour le béton (MBGR) formulé avec des MGR, la diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation du niveau de remplacement semble être supérieure à celle du HBGR. Hamad et Dawi [107] ont réalisé deux MBGR. La diminution de la résistance à la compression observée était de 92 % et 87 % pour 60 %, et 100 % de GR, respectivement.

Dans des études utilisant des LGR [128, 132, 133], la résistance à la compression des LBGR a diminué de 76–86 % de celle du BGN à un taux de remplacement de 100 % de LGR.

L'utilisation des NGR entraîne une réduction plus importante de la résistance à la compression [134]. La résistance à la compression du NBGR, présentant une densité apparente de 2.18 g/cm³ et une absorption d'eau de 8.01 %, a diminué respectivement d'environ 10 %, 23 %, et 37 % par rapport au BGN aux taux de remplacement de 30 %, 50 %, et 100 %, respectivement [135].

Butler et al. [104] ont observé qu'il est possible d'atteindre la résistance à la compression visée même en utilisant des LGR. Dans leur étude, les résistances à la compression des BGR utilisant le MGR et le LGR étaient de 44 MPa et 37 MPa, respectivement, dépassant la résistance ciblée de 30 MPa.

Andreu et Miren [136] ont produit trois BGR fabriqués avec des GR obtenus à partir de bétons avec différentes résistances à la compression de 40 MPa, 60 MPa et 100 MPa. Les GR obtenus étaient des LGR et MGR, et les taux de remplacement étaient de 20 %, 50 %, et 100 %. Pour le LBGR utilisant du LGR obtenu à partir d'un béton de base de 40 MPa, la résistance à la compression a été réduite de 89 % par rapport à celle du BGN, et la résistance à la compression du MBGR fabriqué avec du MGR à partir de béton de 60 MPa variait de 99 % à 101 % à chaque taux de substitution par rapport à celle du BGN. Le MBGR fabriqué à partir de béton de base de 100 MPa a des résistances comprises entre 103 et 106 %. Cela peut être attribué à la résistance plus élevée du GR produit à partir du BHP [137].

Il a été rapporté que l'ITZ entre le granulat d'origine et le mortier attaché de GR produit à partir de béton de haute résistance est plus forte que celle de GR produit à partir de béton à faible résistance. Une autre raison possible est que le mortier attaché contient du ciment non hydraté, ce qui contribue à une augmentation de la résistance [109].

Le tableau 2.2 synthétise les conclusions des diverses études concernant la résistance à la compression du béton, en tenant compte du nombre de cycles de recyclage, ainsi que du taux de substitution de GR.

Tableau 2.2. Variation de la résistance à la compression (f_c) en fonction du nombre de cycles et du taux de GR.

Référence	f_c du BGN (MPa)	Taux de GR (%)	f_c du BGR (MPa)		
			Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
Abreu et al. [59]	63.5	25	65	58	62.5
		100	60	57	56
Thomas et al. [62]	55.88	25	59.7	55.8	55.9
		100	54.2	53.3	48.7
Salesa et al. [71]	50.93	100	54.4	54.73	/
Marie et Quiasrawi [97]	33	20	26.4	29	/
Huda et Alam [61]	50	100	47	48	45
Silva et al. [60]	63.8	25	65	60.7	62.7
		100	59	57.6	56.2

b) Résistance à la traction

Les BGR présentent une résistance à la traction inférieure à celle du BGN, mais dans certains cas, les BGR affichent une résistance comparable ou légèrement supérieure. Cette tendance peut être expliquée par la qualité des GR utilisés [138].

Abreu et al. [59] ont découvert que le recyclage répété avec un taux d'incorporation de 100 % de GR entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Cela correspond à une perte de performances de 9.1 %, 11.5 %, et 15.1 %, pour le premier, le deuxième et le troisième cycle, respectivement.

La résistance à la traction est très dépendante de la liaison développée entre les granulats et la pâte de ciment durcie. Dans le cas du BGR, le mortier de ciment, qui recouvre partiellement ou totalement la surface des particules de GN, peut perturber la bonne liaison entre le GR et la pâte de ciment du nouveau béton [75].

Feng et al. [118] ont constaté qu'il existait une légère différence de la résistance à la traction par fendage entre le BGR1 et le BGR2. Avec l'augmentation du nombre de cycles de recyclage, la résistance à la traction par fendage des BGR a légèrement diminué pour ensuite se stabiliser progressivement. En outre, plus le taux de remplacement des GR était élevé, plus la résistance à la traction par fendage des BGR était faible.

D'après l'étude de Huda et Alam [61], la résistance à la traction par fendage du BGR1 et du BGR2 est supérieure de 3 à 4 % à celle du BGN, tandis que pour le BGR3, elle est

significativement inférieure à celle du BGN (Figure 2.9). Cela est attribué à la capacité d'absorption plus élevée du GR1 et du GR2. De plus, les différentes générations de GR utilisés dans cette étude étaient humides, ce qui signifie que ceux-ci avaient une teneur en humidité initiale. Le rapport E/C était plus faible dans l'ITZ en raison de l'absorption plus élevée. Cela a influencé la formation d'une liaison améliorée et efficace entre le mortier attaché à la surface des GR et la nouvelle pâte de ciment.

Ce phénomène a également été trouvé dans d'autres études où il a été découvert que la résistance à la traction par fendage du BGR était supérieure à celle du BGN [19, 126, 139].

D'autre part, il a été constaté que la résistance à la traction par fendage du BGR3 était significativement inférieure à celle du BGR1 et du BGR2. Cela est dû à la porosité plus élevée et à la qualité dégradée de GR3. Plusieurs couches d'ITZ peuvent également contribuer à cette réduction pour le BGR3 [61].

Yang et Jeong [140] ont affirmé que la résistance à la traction par fendage du BGR ne montrait pas de diminution significative par rapport au BGN dans les cas de taux de substitution des GR allant jusqu'à 30 %. De manière similaire, Bui et al. [135] ont noté que la baisse de la résistance à la traction avec l'augmentation du taux de remplacement des GR n'était pas aussi marquée que celle de la résistance à la compression.

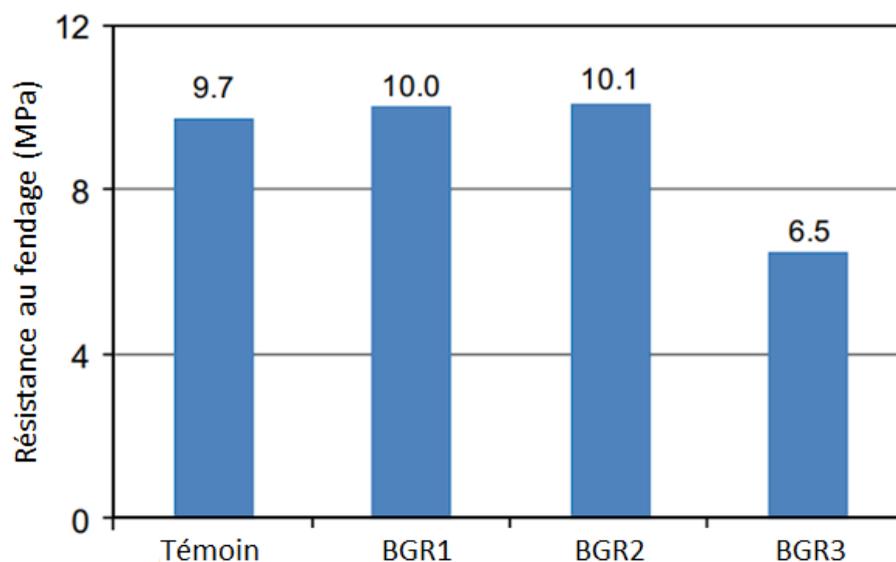


Figure 2.9. Résistance à la traction par fendage des bétons multi-recyclés à 28 jours [61].

Selon Marie et Quiasrawi [97], la résistance à la flexion de BGR1 et BGR2 a montré une réduction de 12 % et 8 % par rapport au BGN. Tous les mélanges de béton ont pu atteindre la résistance cible, à l'exception de BGR3, qui n'a pas pu atteindre cette résistance même après 56 jours de durcissement, en raison de la présence de plusieurs ITZ dans sa structure.

Des chercheurs ont signalé que la résistance à la flexion du BGR dépend des propriétés de surface des GR plutôt que du taux de substitution de ces derniers. La texture des GR est rugueuse, ce qui a un effet positif sur la résistance à la flexion du BGR [141].

De plus, Kou et al. [142] ont signalé que les GR amélioreraient de manière significative les ITZ à long terme du BGR grâce aux effets d'auto-cimentation à long terme du mortier attaché et à l'interaction entre l'ancien et le nouveau mortier.

c) Module d'élasticité

Le module d'élasticité est l'une des principales propriétés mécaniques qui indiquent la rigidité du béton. Lorsque les GN sont remplacés par des GR, le module d'élasticité du BGR est généralement réduit [143]. Des réductions du module d'élasticité allant de 10 % à 20 % du BGR par rapport au BGN, ont été rapportées dans la littérature [100, 107, 136]. Le module d'élasticité dépend de la déformabilité des éléments en béton ; il est donc normal que les bétons recyclés et multi-recyclés aient une plus grande déformabilité en raison de la présence de mortier attaché dans les granulats recyclés.

Huda et Alam [61] ont remarqué une diminution du module d'élasticité à mesure que le nombre de cycles augmente. Ils ont constaté que la valeur la plus élevée du module d'élasticité a été enregistrée pour le BGN, atteignant 27.9 GPa, ce qui représente respectivement une augmentation de 3 %, 8 % et 13.9 % par rapport au BGR1, BGR2 et BGR3.

Feng et al. [118] ont constaté que le module d'élasticité diminue à mesure que le nombre de recyclage augmente, avec des diminutions moyennes de 5 % et 7 % pour le BGR1 et le BGR2, respectivement. Pour les BGR contenant des GR issus de bétons de résistances plus faibles, comme B25 et B30, la rupture s'est avérée être beaucoup plus ductile que pour les bétons utilisant des GR de bétons de résistances plus élevées. Cependant, le module d'élasticité des BGR utilisant des GR issus de bétons de résistance de 60 MPa était supérieur ou proche de celui du BGN de résistance de 30 MPa. Cela démontre qu'il était envisageable d'utiliser des GR provenant de bétons de résistance plus élevée afin d'atteindre un module d'élasticité élevé pour les BGR.

Xiao et al. [144] ont trouvé une diminution de 45 % du module d'élasticité avec un taux de substitution de 100 % des GR, tandis que Dimitriou et al. [145] ont rapporté une réduction de 12 à 33 % au même niveau de substitution. Ces pertes sont attribuées à l'impact négatif de l'augmentation de la teneur en GR sur le module d'élasticité, en raison de la faible densité, de la nature poreuse, ainsi que de la liaison fragile entre les anciennes et nouvelles ITZ, résultant d'une plus grande présence des pores capillaires et de fissures dans les GR [146]. Par conséquent, il est envisageable que les GR à faible teneur en mortier attaché aient moins d'effet sur le module d'élasticité du BGR.

Kim [147] a utilisé des HGR et des LGR obtenus à partir d'une même source de BN. Pour le béton fabriqué avec des HGR et avec des taux d'incorporation de 25 %, 50 % et 100 %, les valeurs de module d'élasticité trouvées étaient de 22.7, 22.4 et 23.6 GPa, respectivement. Tandis que le LBGR a montré des valeurs de 20.6, 19.3 et 17.4 GPa, indiquant une baisse plus marquée.

De manière similaire, des travaux antérieurs [129, 131] ayant utilisé des HGR ont démontré une baisse progressive du module d'élasticité avec l'augmentation du taux d'incorporation.

Tijani et al. [134] ont observé une réduction d'environ 33 % du module d'élasticité du BGR par rapport au BN à un taux de GR de 25 %.

Concernant les bétons formulés avec des LGR, les réductions varient de 16 % à 26 % [59, 132, 140, 148]. Tandis que le module d'élasticité du béton formulé avec des NGR a chuté de 22 % à 55 % [101, 134, 135]. Comme prévu, les bétons mélangés avec des GR de basse qualité ont montré une plus grande perte de module que ceux avec d'autres qualités de GR.

Tout comme la résistance à la compression, le module d'élasticité du BGR est influencé par les caractéristiques du béton parent. Andreu et Miren [136] ont fabriqué des BGN avec trois résistances à la compression différentes : 40, 60 et 100 MPa, en utilisant un seul type de GN, et ont obtenu des GR de chaque BGN. Les valeurs du module d'élasticité des BGR fabriqués à partir de GR concassés à partir de BGN de 40, 60 et 100 MPa étaient respectivement de 37.2, 40.1 et 46.1 GPa.

Gholampour et Ozbakkaloglu [149] ont également constaté que le module d'élasticité du béton fabriqué avec des GR obtenus à partir de BHP (110 MPa) était d'environ 30 % et 39 % plus élevé que celui du béton fabriqué avec des GR produits à partir de béton ayant une résistance à la compression de 20 MPa et 40 MPa.

Salesa et al. [150] ont étudié l'influence du multi-recyclage sur le module d'élasticité statique et dynamique du béton autoplaçant (figure 2.10). Dans leur étude, le module d'élasticité statique du béton témoin est de 34.1 GPa, dépassant celui de BGR1 et BGR2 de 11.2 %, et celui de BGR3 de 17.2 %. Pour le module d'élasticité dynamique, le béton témoin présente également une valeur supérieure de 4.5 %, 8.1 %, et 16.1 % à celles de BGR1, BGR2, et BGR3, respectivement.

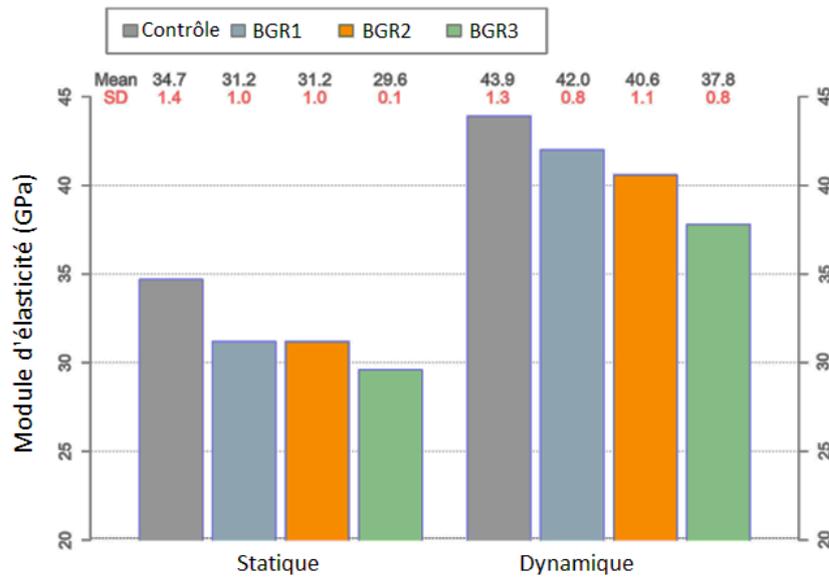


Figure 2.10. Module d'élasticité statique et dynamique de bétons multi-recyclés [150].

De manière similaire, Abreu et al. [59] ont souligné que le module d'élasticité du béton diminue à chaque cycle et avec l'augmentation du taux d'incorporation de GR (Figure 2.11).

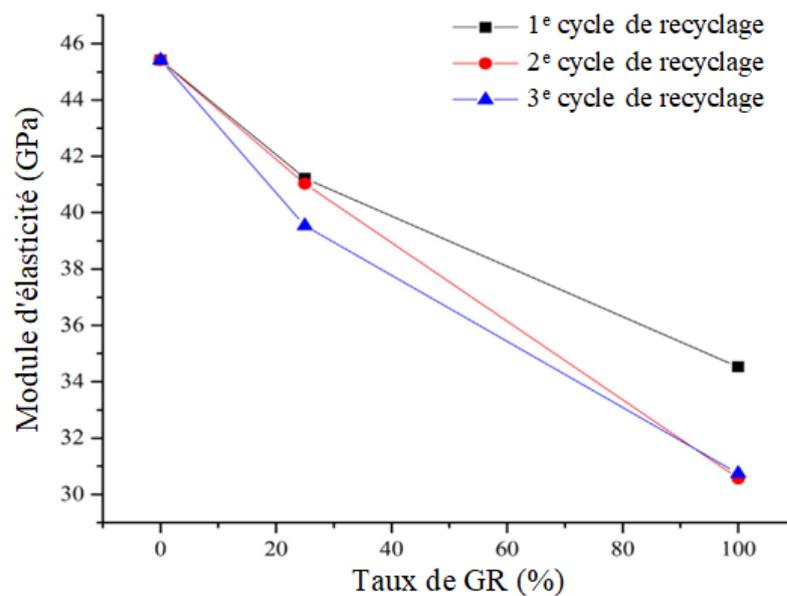


Figure 2.11. Module d'élasticité en fonction du taux de GR à chaque cycle de recyclage [59].

2.3.2.3. Retrait

Il existe plusieurs types de retrait, tels que le retrait de dessiccation, le retrait autogène et le retrait plastique, mais parmi eux, le retrait de dessiccation peut être considéré comme la partie la plus importante [151].

Des retraits excessifs limitent le développement et l'application du BGR. Ceci s'explique principalement par deux raisons majeures. Premièrement, les éléments structuraux en béton massif sont plus sensibles aux déformations. Deuxièmement, des déformations excessives liées au retrait pourraient compromettre la sécurité de la structure, car le retrait du béton joue un rôle significatif dans la conception de l'état limite de service des éléments structuraux [132, 152]. De plus, un retrait plus important peut entraîner la formation de fissures. Cela aura un impact sur les performances globales du béton et favorisera la pénétration d'agents agressifs, pouvant entraîner la corrosion de l'armature du béton structural [153].

Silva et al. [60] ont constaté que les mélanges avec un pourcentage plus élevé de substitution de GR présentent une déformation de retrait plus élevée. Cela peut s'expliquer par la faible rigidité des GR [71, 148, 154]. En effet, plus la quantité de mortier attaché est grande, moins celui-ci a une bonne rigidité, donc moins de résistance à la déformation. Ceci explique les résultats obtenus par les mélanges avec des GR issus d'un nombre plus élevé de cycles de recyclage (Figure 2.12).

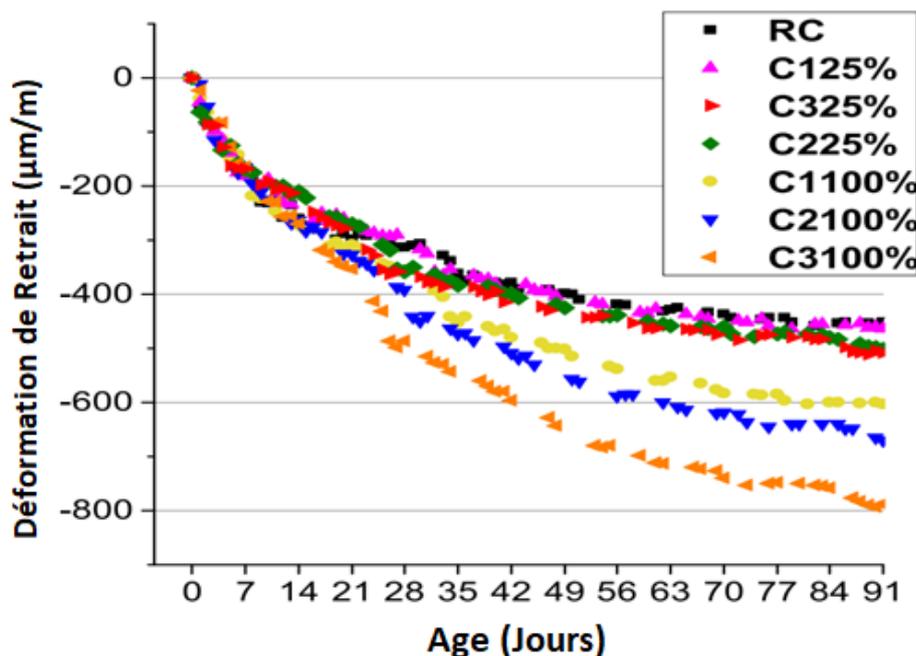


Figure 2.12. Evolution de la déformation du retrait en fonction du temps [60].

Les données provenant d'un grand nombre d'études suggèrent qu'il existe des différences significatives entre le retrait autogène et de dessiccation du BGR par rapport à celui du BGN.

Abate et al. [155], Gonzalez et Etxeberria [156], et Zhang et al. [157] ont signalé que le BGR présente des valeurs de retrait autogène inférieures à celles du BGN d'environ 66 % à 83 %. La réduction du retrait autogène est due à l'effet de cure interne des GR. L'efficacité de la cure interne des GR dépend de leurs propriétés [151].

Le retrait de dessiccation représente environ 80 % du retrait total du BGN [158]. Cette proportion est encore plus élevée dans le cas du BGR. Zhang [159] a rapporté que le retrait par dessiccation représente environ 90 % du retrait total du BGR produit à partir de 100 % de GR. De plus, Corinaldesi [160], Kou et al. [80], Kou et al. [91], Nassar et Soroushian [161], et Zhang et al. [157] ont souligné que le retrait par dessiccation du BGR est d'environ 15 % à 80 % plus élevé que celui du BGN (Figure 2.13).

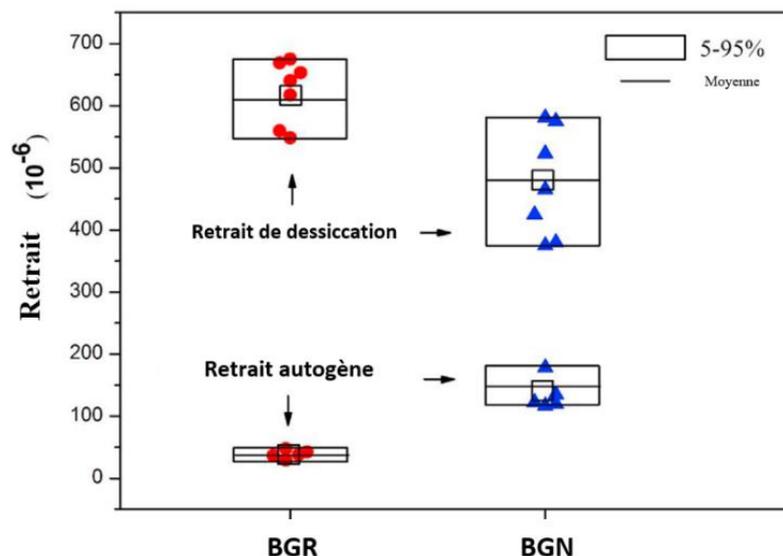


Figure 2.13. Différence entre le retrait autogène et par dessiccation de BGR et BGN [157].

Kirthika et Singh [162] et Zhang et al. [157] ont déclaré que la progression des retraits autogènes et par dessiccation du BGR accuse un retard par rapport au BGN. Zhang et al. [157] et Zhang et al. [132] ont constaté que le temps nécessaire pour atteindre 80 % de la valeur finale du retrait autogène et du retrait par dessiccation du BGR produit à partir de 100 % de GR est deux fois et trois fois plus long que celui du BGN, respectivement. L'effet retardé des GR sur le développement du retrait par dessiccation est dû à leurs pores plus petits (50 nm) et à une perte d'eau moins précoce que dans le cas du GN.

L'augmentation du retrait des BGR s'explique par la forte absorption d'eau des GR qui sont poreux et contenant une ancienne pâte de ciment. Brand et al. [163] ont étudié le retrait avec trois niveaux de pré-saturation de GR : saturés, partiellement saturés (80 %) et séchés au four. Les auteurs ont observé que pendant les premières 24 heures, la pré-saturation n'avait aucun effet sur le retrait. Cependant, à long terme, le BGR avec des GR pré-saturés avait moins de retrait que celui du BGR avec granulats séchés au four.

Yanweerasak et al. [164] ont fabriqué des BGR en utilisant des granulats HGR, MGR et LGR avec quatre valeurs du rapport E/C (0.3, 0.45, 0.6 et 0.75). Une augmentation de la contrainte de retrait par dessiccation avec l'augmentation du rapport E/C a été couramment observée dans les GR de chaque qualité, mais la déformation de retrait était particulièrement élevée dans les LBGR. Comparée au MBGR et au HBGR, la déformation de retrait du LBGR est la plus importante pour tous les rapports E/C, à l'exception du LBGR avec un rapport E/C de 0.3. Le HBGR a un retrait légèrement plus faible que le MBGR, à l'exception du rapport E/C de 0.6 (Figure 2.14).

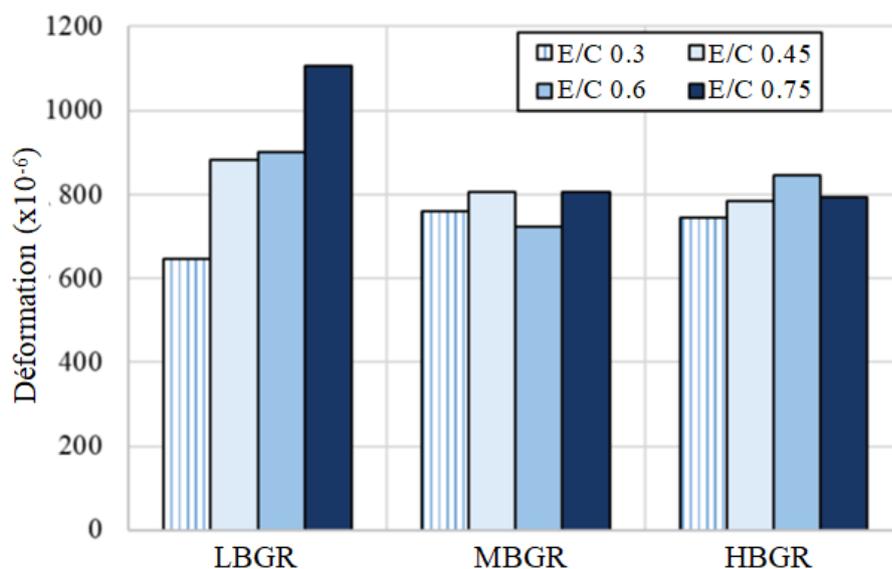


Figure 2.14. Effet de la qualité des GR sur le retrait par dessiccation du BGR [164].

Le retrait du BGR est influencé par la résistance du béton parent [137]. La figure 2.15 montre la relation entre la résistance à la compression du béton parent et le retrait par dessiccation du BGR. Le BGR30 désigne le béton fabriqué avec du GR obtenu à partir du béton parent avec une résistance à la compression de 30 MPa. On peut observer que toutes les BGR présentaient un retrait au séchage plus élevé que le BGN, mais à mesure que la résistance du béton parent augmentait, le retrait par dessiccation avait tendance à diminuer.

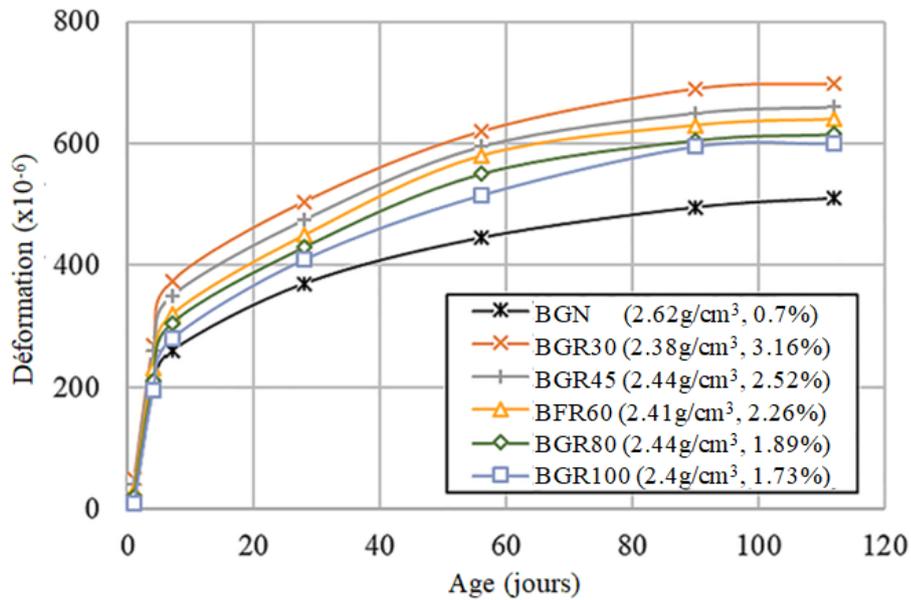


Figure 2.15. Effet de la résistance à la compression du béton parent sur le retrait de dessiccation du BGR [137].

2.3.2.4. Fluage

Les GR ont des effets significatifs sur le fluage du BGR. Plusieurs études ont montré que le fluage du BGR augmentait avec l'augmentation du taux de substitution des GR [165-168].

La figure 2.16 présente les résultats de l'étude de Gomez-Soberon [167] pour le fluage sous une contrainte constante de 40 % de la résistance à la compression. Le fluage du BGR ayant des taux de remplacement des GR de 20 % et 100 % est supérieur de 35 % et 51 %, respectivement, comparé à celui du BGN. Le fluage propre n'est pas significativement affecté par le remplacement des GR, tandis que le fluage de séchage est clairement affecté, particulièrement lorsque le taux de remplacement dépasse les 30 %. Fan et al. [169] ont montré que les caractéristiques de l'ancien mortier attaché sont à l'origine de cette augmentation du fluage.

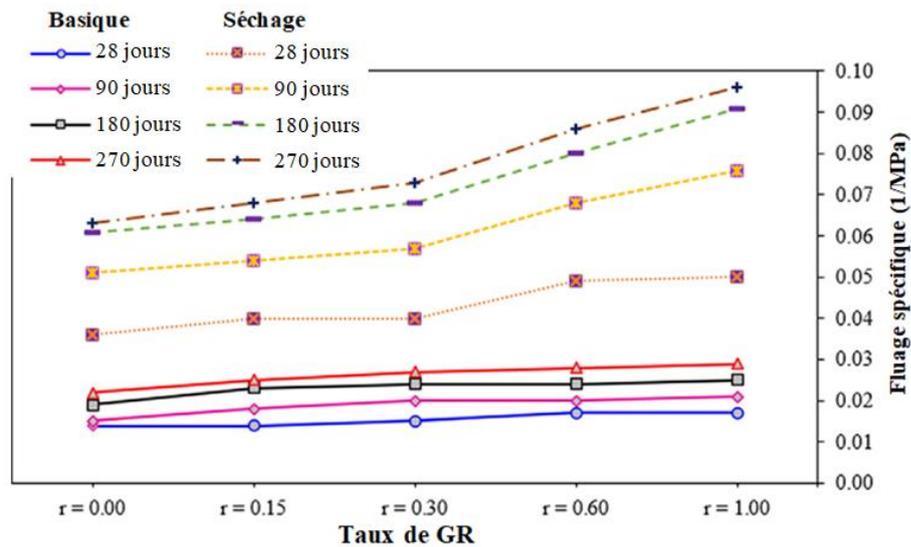


Figure 2.16. Fluage du BGR avec différents taux de GR [167].

Le fluage du BGR s'avère proportionnel à la quantité de GR, car une quantité plus élevée de GR augmente le degré de fluage potentiel [67, 170].

Sri Ravindrarajah et Tam [171] ont trouvé que le fluage du BGR était de 30 % à 60 % supérieur à celui du BGN. Ce phénomène est dû au volume plus élevé de la pâte du BGR par rapport au BGN, car le fluage est proportionnel à la quantité de mortier dans le béton.

Kou et Poon [91] ont rapporté que la déformation de fluage du béton fabriqué avec du GR atteignait plus de 600 1/MPa, comparativement à moins de 500 1/MPa pour le BGN.

Ye [172] a rapporté que la déformation par fluage du BGR avec des GR de haute qualité était évidemment réduite par rapport à celle du BGR avec des GR issus de la technologie de recyclage traditionnelle.

Domingo-Cabo et al. [165] ont révélé que la déformation de fluage du BGR était similaire à celle d'un BGN, bien que certains résultats aient montré une influence du pourcentage de remplacement des GR sur le fluage du BGR après une période de 180 jours.

Selon Mehta et al. [173] et He et al. [174], le comportement au fluage du béton résulte principalement de l'eau physiquement absorbée par les C-S-H et dans les capillaires. Sous une pression externe, une grande quantité d'eau absorbée sur les C-S-H sera perdue et ces derniers se contracteront, entraînant une déformation par fluage dans le béton. Par rapport à l'autre partie de la matrice, les capillaires sont toujours plus faibles, car ils contiennent respectivement de l'air ou une solution interstitielle dans des conditions sèches et humides.

Par conséquent, des microfissures peuvent se former dans la paroi solide des capillaires sous la pression et contribuer davantage au fluage.

Zou et al. [175] ont constaté que la déformation par fluage du BGR augmentait avec l'augmentation de la teneur en GR. De plus, le laitier pourrait diminuer cette déformation.

Kou et al. [91] ont constaté que la déformation de fluage dans les BGR et BGN peut être réduite en utilisant des cendres volantes comme remplacement partiel du ciment.

2.4. Conclusion

En résumé, la revue de la littérature a révélé les résultats suivants :

- Le recyclage des déchets de C & D est l'une des solutions durables à la crise croissante de l'élimination des déchets et à l'épuisement des sources naturelles de granulats provoqués par le secteur de la construction. Cependant, jusqu'à présent, les GR ont été principalement utilisés dans des applications de faible valeur, comme pour la base des chaussées.
- La qualité du GR est influencée par le processus de production, la résistance du béton parent et le nombre d'utilisation.
- La perte de densité, l'augmentation de l'absorption d'eau, le changement de la morphologie et de la granulométrie, et l'augmentation du coefficient de Los Angeles des GR avec le nombre de cycles sont une conséquence de l'augmentation du mortier attaché dans les GR et de la réduction de la taille des GN au fil des cycles de recyclage.
- De nombreux auteurs ont essayé différentes méthodes de traitements des GR pour améliorer le comportement mécanique des BGR. Certaines études se sont concentrées sur le traitement des GR, soit en améliorant leurs propriétés par l'ajout de micro poudres pouzzolaniques et d'émulsions de polymères, soit en séparant le mortier attaché par des méthodes mécaniques, chimiques ou physiques.
- Le recyclage multiple a un impact sur les propriétés du béton, se traduisant par une faible maniabilité, des paramètres rhéologiques élevés, souvent une faible résistance mécanique, et des déformations de retrait et de fluage élevées.
- La plus grande présence de mortier dans les bétons multi-recyclés provoque l'apparition d'un plus grand nombre de fissures de retrait.

Cette revue de littérature souligne l'importance du recyclage des déchets de C & D pour produire des GR dans le contexte actuel de développement durable de l'industrie de la

construction. Cependant, elle met également en évidence la nécessité d'une recherche continue et d'une gestion avisée pour maximiser les avantages de cette approche tout en minimisant ses défis. L'avenir de la construction durable dépendra en grande partie de notre capacité à intégrer efficacement les GR dans les pratiques de construction et à optimiser leur utilisation dans les mélanges de béton.

Suite à une analyse de la littérature, nous avons repéré les axes de recherche suivants qui requièrent une exploration au sein de notre étude expérimentale :

- Etude de l'influence du multi-recyclage sur les propriétés rhéologiques des bétons.
- Etude de la microstructure des bétons multi-recyclés ;
- Etude de l'influence du multi-recyclage sur les propriétés mécaniques du béton.
- Etude de l'influence du multi-recyclage sur le retrait total des bétons sous l'effet de différentes températures de cure.
- Etude de l'influence du multi-recyclage sur le fluage en flexion des bétons.
- Utilisation de la fumée de silice pour améliorer les performances des bétons multi-recyclés.
- Modélisation numérique du retrait des bétons multi-recyclés soumis à différentes températures de cure.
- Etude analytique où les résultats expérimentaux du retrait sont comparés avec plusieurs modèles de prédiction de la déformation du retrait.

Chapitre 3 :
Matériaux et matériel d'essai

Chapitre 3: Matériaux et matériel d'essai

3.1. Introduction

Avant de nous aventurer dans la phase expérimentale, il est impératif de procéder à une analyse approfondie des matériaux utilisés dans la composition des bétons testés, étant donné leur rôle essentiel dans la définition des propriétés et des performances de ces matériaux.

Ce chapitre présente en détail les différents matériaux qui seront utilisés dans la production des bétons testés, tout en mettant en évidence les essais qui seront réalisés en conformité avec les normes internationales et les procédures opérationnelles actuelles.

Ce travail expérimental a été réalisé au niveau du Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement (LSME) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie).

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type CEM II/A-L 42.5 N, produit par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef).

Ce ciment est mélangé avec 18 % de calcaire et présente une densité de 3.1, une surface spécifique de 3298 cm²/g et une classe de résistance de 42.5 MPa.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

Composition chimique (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
62.78	20.68	4.80	4.70	0.55	2.27	0.15	0.42	0.90
Composition minéralogique (%)								
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		
60.83		18.92		8.82		10.96		

3.2.2. Fumée de silice

La fumée de silice (FS) est une poudre de silice extrêmement fine ($< 1 \mu\text{m}$), issue de l'industrie du silicium et de ses alliages, rendues utilisables par densification ou suspension dans l'eau. Elles sont riches en silice ($\text{SiO}_2 > 85 \%$) et ayant une très grande finesse (surface spécifique entre 20 et 25 m^2/g). Elles fournissent de très bonnes propriétés aussi bien au niveau de la rhéologie en densifiant le matériau qu'au niveau des propriétés mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité du béton à long terme.

La fumée de silice utilisée présente une surface spécifique de 225000 cm^2/g et une densité de 2.4. Sa composition chimique est présentée dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Composition chimique (%) de la fumée de silice.

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
93	0.47	0.91	0.8	0.93	0.35	0.40	1.20

3.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau potable prélevée directement du robinet du laboratoire. Elle ne renferme aucune impureté pouvant compromettre la qualité des mélanges.

3.2.4. Sable

Le sable employé dans cette recherche est un sable naturel extrait d'Oued Chlef. Il présente une composition minéralogique silico-calcaire, avec une granulométrie maximale de 4 mm et un module de finesse de 2.75.

3.2.5. Graviers

Pour produire les bétons, trois types de graviers de classe 3.15/15 ont été utilisés :

- GN : gravier naturel extrait d'une carrière de calcaire utilisé pour fabriquer le béton témoin BGN.
- GR1 : premier gravier recyclé produit par le concassage du béton témoin BGN et utilisé pour fabriquer les bétons recyclés de la première génération BGR1-100 et BGR1-50.
- GR2 : deuxième gravier recyclé produit par le concassage du béton recyclé de la première génération BGR1-100 et utilisé pour fabriquer les bétons recyclés de la deuxième génération BGR2-100 et BGR2-50.

- GR3 : troisième gravier recyclé produit par le concassage du béton recyclé de la deuxième génération BGR2-100 et utilisé pour fabriquer les bétons recyclés de la troisième génération BGR3-100, BGR3-50 et BGR3-100-FS.

Tous les GR ont été obtenus en concassant des échantillons de béton après 90 jours de durcissement. Pour cela, les échantillons ont été fragmentés à la taille nécessaire à l'ouverture du mini concasseur à l'aide d'une massette. Par la suite, ces morceaux ont été broyés à l'aide d'un mini concasseur à double mâchoire (une mâchoire fixe et une mâchoire mobile). Enfin, les matériaux obtenus ont été tamisés de manière à obtenir des distributions de taille de particules similaires à celles des GN utilisés pour la fabrication des BGR (Figure 3.1).



(1) Fabrication des éprouvettes



(2) Fragmentation des éprouvettes par une massette



(3) Concassage des fragments



(4) Tamisage (3.15-16 mm)



(5) GR (3.15/15mm)

Figure 3.1. Processus de production des GR.

La figure 3.2 montre l'aspect visuel des différentes générations de graviers utilisés. On observe que les granulats contiennent un volume de mortier attaché plus élevé à chaque cycle et deviennent plus rugueuses.



GN



GR1



GR2



GR3

Figure 3.2. Différents types de graviers utilisés.

3.3. Caractérisation des granulats

3.3.1. Analyse granulométrique

Les courbes de l'analyse granulométrique des granulats utilisés sont affichées dans la figure 3.3. Il est observé que toutes les générations des GR présentent des distributions granulométriques presque identiques à celles des GN. Cette similitude est importante pour écarter toute influence de la granulométrie.

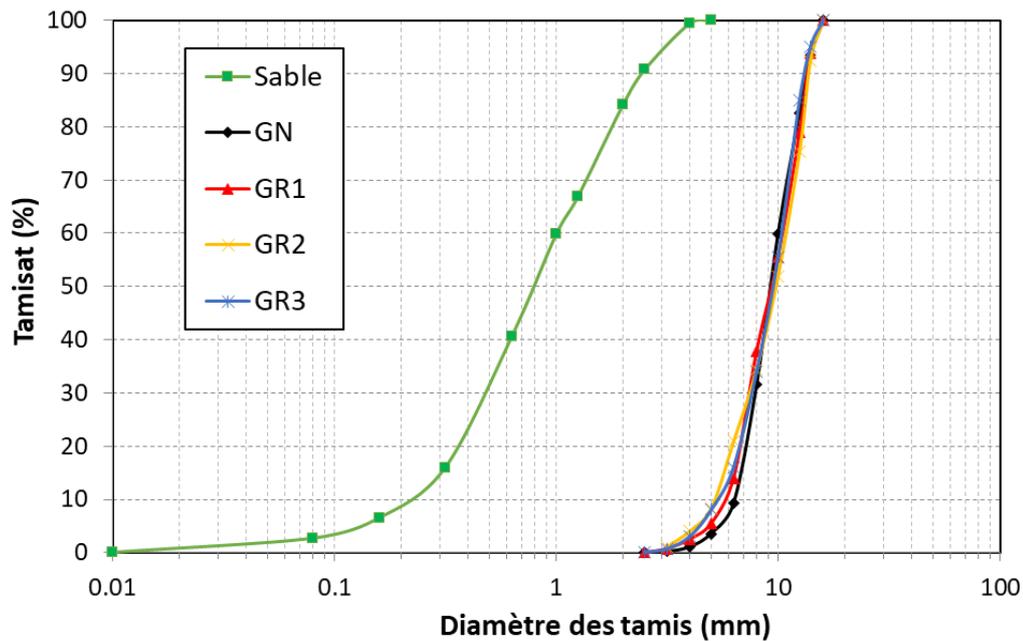


Figure 3.3. Analyse granulométrique des granulates.

3.3.2. Quantité de mortier attaché aux GR

Une méthode thermique a été utilisée pour évaluer la quantité de mortier attaché aux GN [176, 177] (Figure 3.4).

Cette méthode a été choisie car elle peut être appliquée à tous types de granulates (y compris granulates calcaires). Un échantillon de GR (m_i) a été préparé en retirant toutes les impuretés, puis en l'immergeant dans l'eau pendant 2 heures, pour s'assurer que le mortier attaché est totalement saturé. Ensuite, l'échantillon a été séché dans un four à moufle à 500 °C pendant 2 heures, et immergé dans l'eau froide. Ce processus de chauffage génère de la vapeur d'eau dans le mortier saturé et le refroidissement rapide induit des fissures dans le mortier, ce qui le rend facile à retirer. Le reste de mortier attaché est ensuite retiré en grattant la surface. Une fois que tout le mortier est retiré, l'échantillon a été tamisé à l'aide d'un tamis de 4 mm pour obtenir le gravier (m_f).

La teneur en mortier attaché a été calculée comme suit :

$$\% \text{ de mortier attaché} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3.1)$$



Four à moufle



GR après traitement thermique.

Figure 3.4. Méthode de traitement thermique des GR.

Les résultats des mesures des quantités de mortier attaché sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Quantité de mortier attachée au GR (%).

Types de GR	GR1	GR2	GR3
Quantité de mortier attachée (%)	34	52	76

La teneur en mortier attaché augmente à mesure que le nombre de cycles de recyclage augmente, atteignant ainsi une proportion de 76 % dans le troisième cycle. Thomas et al. [62] ont corroboré l'existence d'un nombre accru de fissures et d'ITZ à mesure que les GR étaient réutilisés. De plus, ils ont noté que la quantité de mortier attaché atteignait plus de 80 % après trois cycles de recyclage et qu'à partir du quatrième cycle, les granulats étaient essentiellement constitués du mortier.

3.3.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

La quantité de mortier attaché qui augmente à chaque cycle de recyclage est la principale raison de la détérioration des caractéristiques physiques et mécaniques des GR de chaque génération.

La plupart des études montrent que la qualité des GR est inférieure à celle des GN et qu'elle diminue à mesure que le nombre de cycles de recyclage augmente [59, 60, 62, 71]. Les résultats de la caractérisation physique et mécanique des granulats utilisés sont exposés dans le tableau 3.4.

Le tableau 3.4 présente également l'efficacité du recyclage, définie comme la proportion en masse de granulats concassés supérieurs à 3.15 mm. Bien que l'efficacité du recyclage soit spécifique au concasseur à mâchoires utilisé dans cette étude, elle fournit une indication des sous-produits générés lors de la production des GR qui n'ont pas été utilisés dans les générations futures de béton, mais qui doivent être pris en compte dans un cadre d'économie circulaire.

Il convient toutefois de noter que Zhutovsky et al. [178] ont découvert que le ciment hydraté recyclé à partir de béton pouvait être utilisé avec succès comme matière première pour la production de ciment à faible teneur en carbone. Par conséquent, des recherches supplémentaires pourraient quantifier le potentiel d'utilisation de ces granulats recyclés fins pour la production de clinker à faible teneur en carbone.

Tableau 3.4. Caractéristiques des granulats utilisés.

	Sable	GN	GR1	GR2	GR3
Equivalent de sable	88	/	/	/	/
Module de finesse	2.75	/	/	/	/
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1580	1450	1166	1080	1040
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2650	2660	2440	2350	2300
Coefficient de Los Angeles (%)	/	28	34	41	54
Coefficient de fragmentation dynamique (%)	/	19	27	30	37
Absorption d'eau	1.40	0.56	6.30	9.40	13.30
Efficacité du recyclage (%)	/	/	90	82	76

3.3.4. Absorption d'eau des granulats

Les courbes d'absorption d'eau des granulats utilisés sont affichées dans la figure 3.5. Les valeurs d'absorption d'eau des GR sont supérieures à celles du GN, cela est dû à la présence de mortier attaché dans les GR, qui présente une porosité élevée.

Durant les 7 premières minutes, les valeurs d'absorption d'eau des GR diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles. Au-delà de 7 minutes, l'absorption d'eau des GR augmente avec chaque cycle, atteignant des valeurs de 6.3 %, 9.4 % et 13.3 % pour le premier, le deuxième et le troisième cycle, respectivement après 48 h d'immersion. On constate que plus le nombre de cycles augmente, plus le temps nécessaire pour atteindre un certain niveau d'absorption d'eau s'allonge. Ceci est dû à l'augmentation du nombre et de la longueur des capillaires et des micropores, ce qui rend plus difficile leur remplissage dans un intervalle de temps donné. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par Silva et al. [60].

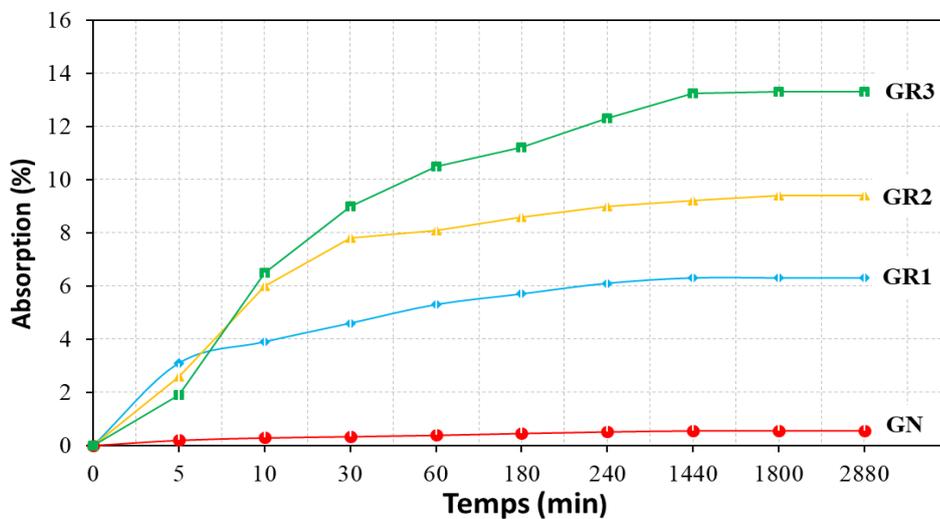


Figure 3.5. Absorption d'eau des granulats.

3.4. Formulation des bétons

Quatre générations de béton ont été préparées dans cette étude : un BGN utilisé comme béton témoin avec 100% de GN et trois différentes générations (BGR1, BGR2 et BGR3) de béton recyclé. Les GN sont substitués par les GR avec des pourcentages volumiques de 50 % et 100 % dans chaque génération. Les bétons examinés ont été fabriqués en maintenant un rapport eau/liant (E/L) constant de 0.57, tout en maintenant un affaissement stable à 18 ± 2 cm. De plus, 10 % de la fumée de silice a été utilisée dans le mélange BGR3-100 dans le but d'améliorer la microstructure et les performances mécaniques de ce dernier. La formulation a été établie à partir de la méthode de Dreux-Gorisse.

Les proportions de mélange des bétons testés sont présentées dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Formulation des bétons testés (kg/m³).

béton	Ciment	FS	Eau	Sable	GN	GR1	GR 2	GR 3
BGN	400	/	228	745	968	/	/	/
BGR1-50	400		228	745	484	444	/	/
BGR1-100	400	/	228	745	/	888	/	/
BGR2-50	400		228	745	484		428	/
BGR2-100	400	/	228	745	/	/	855	/
BGR3-50	400		228	745	484	/	/	419
BGR3-100	400	/	228	745	/	/	/	837
BGR3-100-FS	360	40	228	745	/	/	/	837

En raison de l'absorption élevée des GR, il est essentiel d'adapter la quantité d'eau dans le mélange afin de maintenir le rapport E/L constant. Ce rapport joue un rôle crucial dans l'ouvrabilité du béton. Les GN ont été utilisés à l'état sec, tandis que les GR ont été soumis à une pré-saturation par immersion totale dans l'eau pendant 24 heures avant le coulage. Ensuite, l'eau adsorbée a été éliminée en essuyant avec un chiffon absorbant (Figure 3.6). Cette procédure a assuré que les GR étaient dans un état saturé avec une surface sèche au moment du mélange, c'est-à-dire à un niveau de saturation de 80 %, conformément aux recommandations d'Etxeberria et al. [19] et de Ferreira et al. [119].



Figure 3.6. Elimination de l'eau adsorbée des GR pré-saturés.

Il était essentiel de maintenir une saturation partielle des GR afin de prévenir tout risque de saignement associé à une saturation complète. En effet, une saturation totale aurait pu compromettre l'intégrité de l'ITZ entre le GR et le nouveau mortier. Cette zone devient plus vulnérable en présence d'une humidité de surface élevée, ce qui aurait pu avoir des répercussions négatives sur plusieurs caractéristiques du béton [19, 103].

Le béton a été gâché dans un malaxeur de 30 ℓ de capacité selon un mode opératoire identique pour tous les mélanges :

- Malaxage à sec du gravier + sable + ciment pendant 1 minute ;
- Ajout de l'eau et malaxage pendant 1 minute.
- Malaxage pendant 1 minute.

La vibration a été effectuée à l'aide d'une table vibrante (Figure 3.7).



Figure 3.7. Vibration du béton.

Après leur coulage, les échantillons sont recouverts d'une toile de jute humide pour prévenir toute évaporation précoce de l'eau. Après un délai de 24 heures, les échantillons sont démoulés et placés dans un bain thermostatique saturé en chaux, maintenu à une température de 20 °C jusqu'à la réalisation des essais mécaniques (Figure 3.8). La saturation en chaux dans le bain thermostatique permet d'éviter le phénomène de lixiviation. Une heure avant chaque essai mécanique, les échantillons sont retirés du bain et exposés à l'air ambiant dans les conditions de laboratoire.



Figure 3.8. Conservation des éprouvettes.

3.5. Essais sur les bétons frais

3.5.1. Masse volumique

La densité du béton frais a été évaluée selon la norme NF EN 12350-6 [179]. Cette mesure a été réalisée en plaçant le béton frais dans un récipient rigide et étanche d'un volume de 5 litres, puis en pesant l'ensemble, comme illustré dans la figure 3.9. On a obtenu ainsi la masse du récipient (m_1) et la masse totale (m_2). La densité du béton frais (M_v) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$M_v = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3.2)$$



Figure 3.9. Mesure de la masse volumique du béton frais.

3.5.2. Ouvrabilité

Une ouvrabilité adéquate est importante pour garantir que le béton remplit correctement son rôle structurel tout en répondant aux exigences esthétiques de la construction. Elle a été contrôlée par la mesure de l'affaissement, à l'aide de l'essai au cône d'Abrams, selon la norme NF EN 12350-2 [180] (Figure 3.10).



Figure 3.10. Essai d'affaissement.

3.5.3. Rhéologie

Le comportement rhéologique des bétons a été analysé en utilisant un rhéomètre ICAR, géré à l'aide d'un logiciel d'acquisition qui fournit directement les paramètres rhéologiques, à savoir la valeur du seuil de cisaillement (en Pa) et de la viscosité plastique (en Pa.s).

La figure 3.11 présente le rhéomètre ICAR avec une géométrie en forme de palette appelée "Vane". Cette géométrie Vane est composée de 4 pales d'une épaisseur de 2 mm. Chaque pale mesure 125 mm de hauteur et 125 mm de diamètre. Elle est immergée dans le béton et tournée à différentes vitesses. Le rhéomètre ICAR est capable de réaliser un test de courbe d'écoulement qui peut être utilisé pour caractériser la rhéologie des bétons en mesurant la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement, et calculer les paramètres de Bingham (seuil de cisaillement et la viscosité plastique).

Le béton est versé dans une cuve de 20 litres, solidement fixée pour empêcher tout déplacement. Ensuite, la vane est placée au milieu de l'échantillon de béton, créant un espace

de 20 mm entre la vanne et les parois latérales. Il est essentiel de vérifier que les extrémités supérieures des bras du croisillon sont alignées avec la surface du béton.



Figure 3.11. Rhéomètre ICAR.

Un test de courbe d'écoulement consiste en une période de pré-cisaillement, suivie d'une série de points de courbe d'écoulement (Figure 3.12). Le but de la période de pré-cisaillement est de minimiser les effets de la thixotropie et de fournir un historique de cisaillement cohérent. La période de pré-cisaillement se compose d'une seule vitesse constante, généralement égale à la vitesse maximale du test. Aucune mesure n'est effectuée pendant la période de pré-cisaillement. Après la période de pré-cisaillement, la courbe d'écoulement est immédiatement commencée. Un test unique consiste en un nombre spécifié de points en ordre croissant ou décroissant.

Le comportement d'écoulement du béton peut être représenté par la relation suivante à deux paramètres connus sous le nom de modèle de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

Où τ_0 est le seuil de cisaillement qui représente la contrainte de cisaillement nécessaire pour initier l'écoulement.

La pente de la ligne oblique est la viscosité plastique μ . Ces deux paramètres, qui définissent la courbe d'écoulement, fournissent une description complète du comportement d'écoulement d'un mélange de béton.

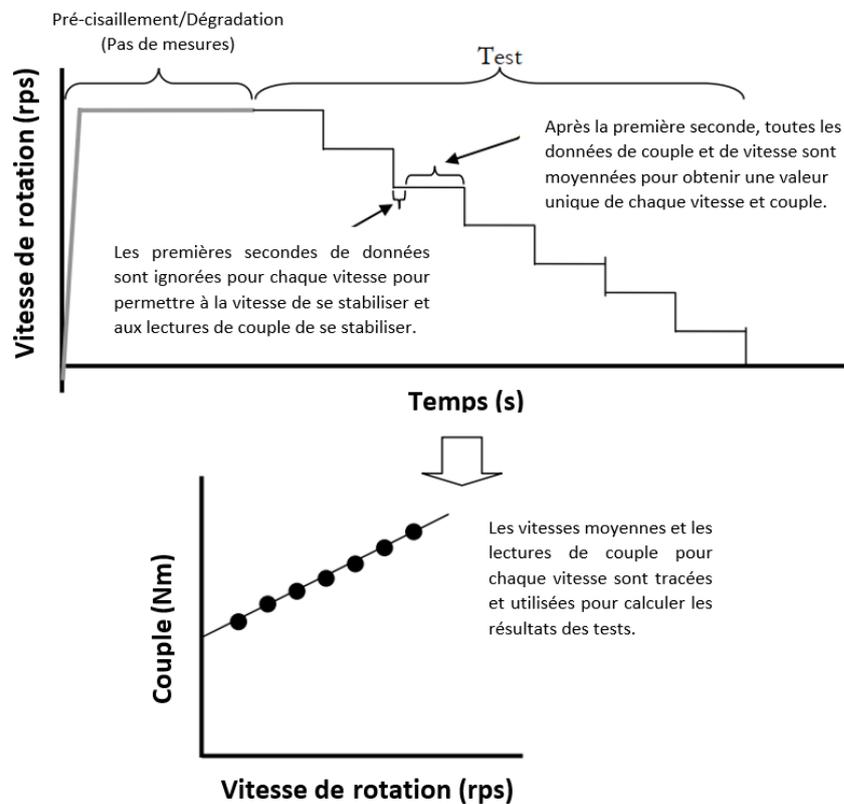


Figure 3.12. Essai de courbe d'écoulement.

3.6. Essais sur les bétons durcis

3.6.1. Masse volumique du béton durci

La masse volumique du béton durci a été mesurée conformément à la norme européenne NF EN12390-7 [179]. Cette mesure a été effectuée à 28 jours sur des échantillons prismatiques de dimensions $70 \times 70 \times 280$ mm, dont la masse (m) était constante après séchage, et dont le volume réel (V) était connu.

Avant chaque pesée, il était nécessaire de sécher les échantillons dans un four ventilé à une température de (105 ± 5) °C, jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées consécutives soit inférieure à 0.2 % (Figure 3.13).



Figure 3.13. Mesure de la masse volumique du béton durci.

3.6.2. Analyse de la microstructure des bétons

La microscopie électronique à balayage est une technique d'observation de la matière sous vide à l'aide d'un faisceau d'électrons. Lors de leur interaction avec la matière, les électrons sont réémis sous différentes formes : électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons Auger ou rayons X. Ces différentes particules ou rayonnements apportent différents types d'informations sur la matière dont est constitué l'échantillon.

Lors du contact faisceau / échantillon, un électron du faisceau peut céder son énergie à un électron des couches supérieures de l'échantillon, qui sera alors éjecté sous forme d'électron secondaire. Ces électrons possèdent généralement une faible énergie (environ 50 eV) grâce à laquelle il est assez facile de les dévier avec une faible différence de potentiel. On peut ainsi facilement collecter un grand nombre de ces électrons et obtenir des images de bonne qualité avec un bon rapport signal/bruit et une bonne résolution. Ces électrons permettent d'obtenir des renseignements sur la topographie de l'échantillon.

Pour analyser les caractéristiques microstructurales des bétons à l'âge de 90 jours, un microscope électronique à balayage (MEB) d'une magnification allant jusqu'à 2 500 000x au niveau du CRAPC de Laghouat a été utilisé conformément à la norme ASTM C 1723 [181]. Un échantillon cylindrique de 20×30 mm a été utilisé, comme le montre la figure 3.14. Initialement, l'échantillon est lavé et séché pour garantir qu'il présentait une clarté optimale, même sous un fort grossissement. Après surfaçage et séchage, l'échantillon a été préparé pour être monté sur une lame et placé dans la chambre d'observation.

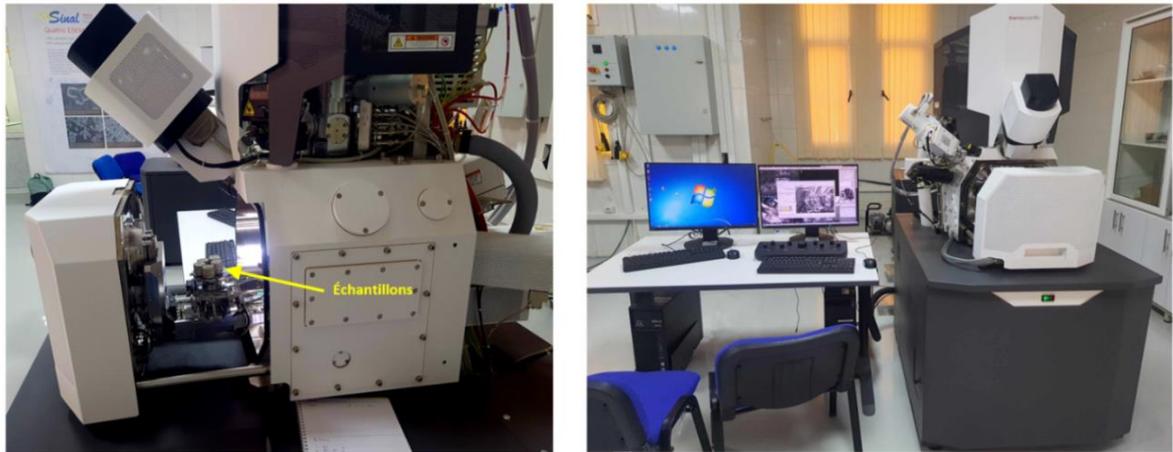


Figure 3.14. Essai de microscopie électronique à balayage.

3.6.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est mesurée à l'âge de 7, 28 et 90 jours en utilisant des éprouvettes cubiques $100 \times 100 \times 100$ mm. L'essai est réalisé en utilisant une presse hydraulique ayant une capacité maximale de 3000 kN et en appliquant une vitesse de chargement constante de 0.5 MPa/s, conformément à la norme NF EN 12390-3 [182] (Figure 3.15).

Les valeurs de résistance obtenues à différents âges sont calculées en prenant la moyenne des résultats de trois échantillons ou plus.



Figure 3.15. Essai de compression simple.

3.6.4. Résistance à la traction par fendage

L'essai de fendage, également connu aussi sous le nom d'essai brésilien, est utilisé pour mesurer la résistance à la traction du béton. Cet essai a été proposé pour la première fois en 1953 par Carneiro et Barcellos [183]. Actuellement, cet essai est recommandé par la majorité des règlements internationaux tels que BS 1881-117, ASTM C-496, et ISO 4105.

L'avantage principal de cet essai réside dans sa simplicité de mise en œuvre. Une seule charge externe de compression est nécessaire. En appliquant une compression sur le plan médian d'un cylindre, une traction est générée perpendiculairement. Cette traction provoque des déformations localisées principalement dans le plan diamétral situé entre les deux génératrices diamétralement opposées sur lesquelles s'applique l'effort. Les déformations sont dans un premier temps réparties, puis localisées autour de ce plan à mesure que l'effort exercé augmente. Un autre avantage de l'essai de fendage est que le même type d'éprouvette est utilisé à la fois pour les essais de compression et de fendage.

Plusieurs travaux ont montré que l'essai de fendage est le plus fiable, donnant des résultats raisonnables de la résistance à la traction par rapport à l'essai de flexion. La résistance du béton mesurée lors de l'essai de fendage semble assez proche (à 10 % près) de la résistance par traction directe ($f_t = 0.9 f_{tf}$) [184, 185].

Dans notre étude, l'essai de fendage est réalisé à l'âge de 7, 28 et 90 jours conformément à la norme NF EN 12390-6 [186]. Une éprouvette cylindrique 150×300 mm est soumise à une compression le long de deux génératrices diamétralement opposées (Figure 3.16). Afin d'éviter une rupture localisée due à la compression au niveau des génératrices de chargement et de répartir de manière uniforme la charge appliquée, deux fines bandes de contreplaqué neuf mesurant 10 mm de large, 4 mm d'épaisseur et d'une longueur supérieure à celle de la ligne de contact avec l'éprouvette sont interposées entre les plateaux de chargement et l'éprouvette. La vitesse de chargement est maintenue à un rythme constant de 0.05 MPa/s.

La contrainte maximale de traction par fendage (f_{tf}), qui agit perpendiculairement au diamètre, peut être exprimée à l'aide de l'équation suivante :

$$f_{tf} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.4)$$

P : force de rupture,

D : diamètre de l'éprouvette,

L : longueur de l'éprouvette.

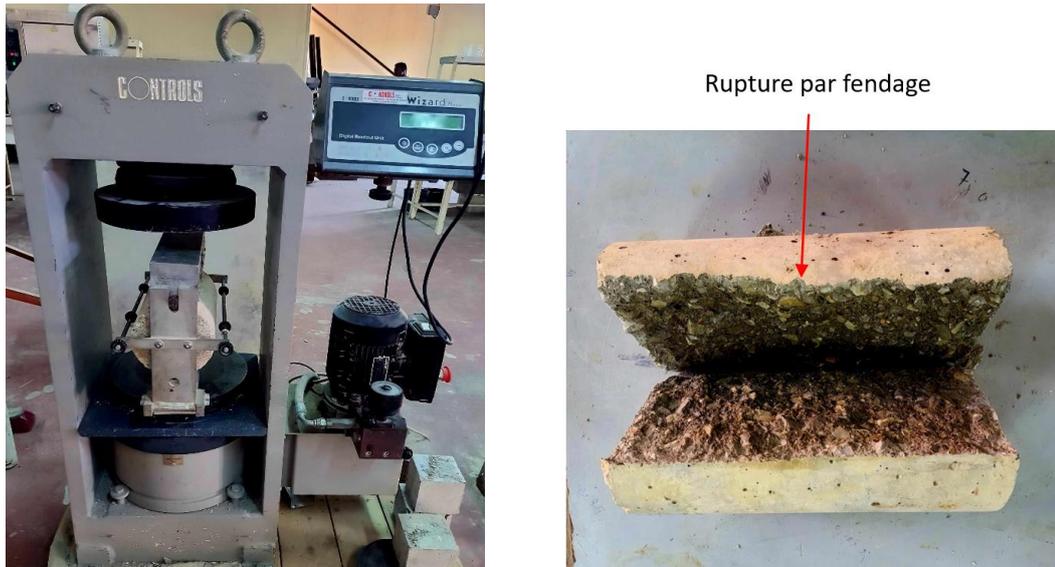


Figure 3.16. Essai de traction par fendage.

3.6.5. Module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons est évalué conformément à la norme ASTM C469 [187]. Cette évaluation est réalisée à deux âges différents (28 et 90 jours), en utilisant un extensomètre pour mesurer la déformation d'un cylindre 150×300 mm soumis à une compression axiale (Figure 3.17). Le module d'élasticité E est déterminé en utilisant la formule suivante [187] :

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - 0.00005) \quad (3.5)$$

σ_2 : Contrainte de compression correspondante à 40% de la charge de rupture en MPa;

σ_1 : Contrainte de compression correspondant à la déformation 0.05 ‰;

ε_2 : Déformation longitudinale produite par la contrainte σ_2 .



Figure 3.17. Dispositif de mesure du module d'élasticité.

Pour garantir la fiabilité des résultats, il est impératif que les surfaces de contact sur lesquelles la charge est appliquée demeurent planes et parfaitement parallèles. Afin d'assurer une adhérence optimale entre le plateau exerçant la force de compression et les cylindres, un procédé de surfaçage mécanique a été appliqué aux deux parties de l'éprouvette (Figure 3.18).



Figure 3.18. Surfaçage mécanique des éprouvettes cylindriques.

3.6.6. Essai d'auscultation dynamique

3.6.6.1. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

Cet essai vise à déterminer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à l'intérieur d'une éprouvette en béton de dimensions $100 \times 100 \times 100$ mm en utilisant un appareil à ultrasons (Figure 3.19). Les mesures ont été effectuées à deux âges différents (28 et 90 jours), conformément aux spécifications de la norme NF EN 12504-4 [188].

L'émetteur et le récepteur sont positionnés sur les deux surfaces de l'éprouvette. Des impulsions sont générées grâce à des cristaux piézoélectriques excités par des chocs. La fréquence du générateur d'ondes se situe entre 10 et 150 Hz, tandis que le temps de propagation des ondes est mesuré à l'aide de circuits de mesure électroniques.

Avant chaque utilisation, il est essentiel de vérifier l'état de l'appareil à ultrasons par le biais de test d'étalonnage. L'étalonnage consiste à examiner le temps de propagation des ondes

à travers une tige étalon dont la durée est préalablement connue. La vitesse de propagation du son est calculée en utilisant la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t} \text{ (m/s)} \quad (3.6)$$

d : Distance entre faces de l'éprouvette mesurée en mètre (m),

t : Temps de propagation d'onde en seconde (s).



Figure 3.19. Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion.

3.6.6.2. Calcul du module d'élasticité dynamique

A partir des mesures de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique (E_D) selon la formule suivante [189] :

$$E_D = \frac{V^2 Q (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (3.7)$$

Où :

V : vitesse en km/s

Q : densité du béton en kg/m^3

ν : coefficient de Poisson du béton, soit $\nu = 0.3$ [189]

E_D : module élastique dynamique (MPa).

3.6.7. Retrait total

L'essai a pour but de déterminer les déformations des bétons sans l'introduction de contraintes mécaniques externes.

Les échantillons ont été coulés dans des moules prismatiques de dimensions $100 \times 100 \times 400$ mm. Par la suite, ils ont été recouverts d'une toile de jute humidifiée pour empêcher toute évaporation, puis ils ont été conservés dans le laboratoire à une température constante de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ et à une humidité relative de 100 %. Après une période de 24 heures, les échantillons testés ont été démoulés et enveloppés d'une fine couche d'asphalte, avec un ruban adhésif aux deux extrémités, dans le but de minimiser les effets liés aux bords et d'empêcher tout échange d'humidité avec l'environnement extérieur. Les éprouvettes ont été équipées de deux plots en cuivre, espacés de 30 cm.

Les échantillons ont été maintenus en position verticale dans des étuves à trois températures de cure (20 °C , 40 °C et 60 °C), tout en maintenant une humidité relative de $50 \% \pm 5 \%$. Les mesures de retrait ont été effectuées à l'aide d'un comparateur numérique de précision $1 \text{ }\mu\text{m}$, comme illustré dans la figure 3.20.

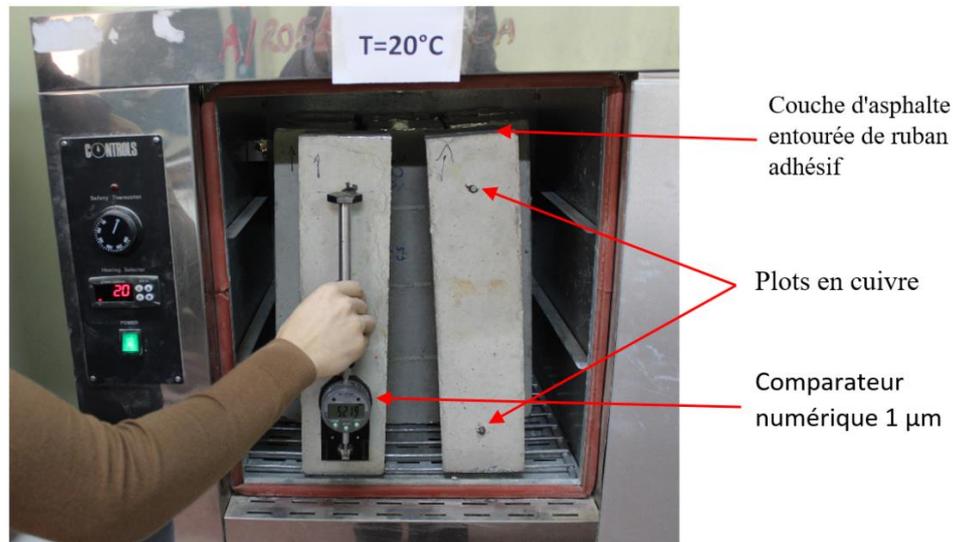


Figure 3.20. Conservation des éprouvettes dans une étuve.

Le retrait est mesuré sur quatre intervalles :

- Premier intervalle : trois fois par jour pendant la première semaine ;
- Deuxième intervalle : une fois par jour pendant la deuxième et la troisième semaine ;
- Troisième intervalle : deux fois par semaine pendant la quatrième semaine ;
- Quatrième intervalle : une fois par semaine pour une période de cinq mois.

Les valeurs mesurées représentent les moyennes obtenues à partir de trois échantillons issus du même mélange et conservés dans des conditions identiques. La variation d'erreur pour toutes les mesures était maintenue à un niveau acceptable, ne dépassant pas 5 %. Le processus de mesure du retrait est réalisé dans des conditions atmosphériques constantes.

La variation relative de la longueur provoquée par le retrait est exprimée par :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.8)$$

ε : Déformation de retrait exprimée en $\mu\text{m}/\text{m}$.

ΔL : variation de longueur exprimée en μm .

L : longueur entre les deux bords de l'éprouvette égale à 300 mm.

3.6.8. Fluage en flexion

L'essai de fluage en flexion a été réalisé sur des poutres de section rectangulaire de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ et d'une longueur de 2400 mm entre appuis. Le suivi du phénomène de fluage en flexion implique la mesure des déformations observées au niveau des fibres supérieures et inférieures. Selon une convention adoptée à notre travail, les déformations positives traduisent une traction (fibres inférieures), tandis que les déformations négatives indiquent une compression (fibres supérieures). La flèche a été mesurée à mi-travée des poutres à l'aide d'un comparateur 1/100.

3.6.8.1 Ferrailage des poutres

Les armatures comprimées sont constituées de deux barres de 6 mm de diamètre, alors que la zone tendue a été renforcée avec deux barres de 8 mm de diamètre. Des cadres de 2 mm de diamètre espacés de 10 cm sont utilisés pour toutes les poutres.

Les détails du ferrailage des poutres sont représentés dans la figure 3.21.

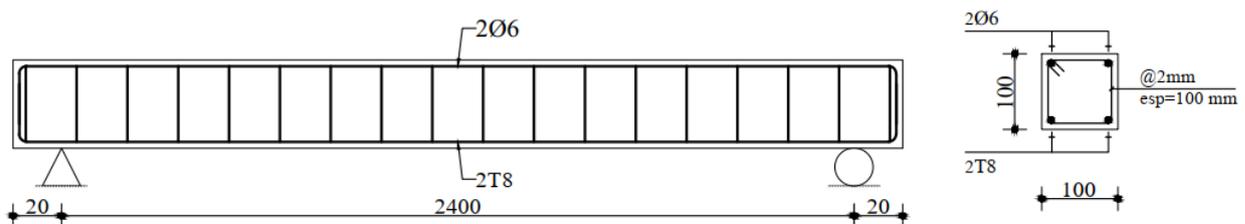


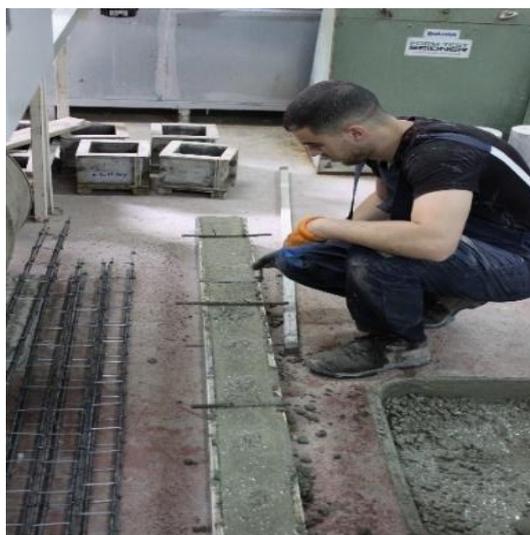
Figure 3.21. Ferrailage des poutres (dimensions en mm).

3.6.8.2. Procédé de fabrication des poutres

Les poutres sont fabriquées au niveau du laboratoire en utilisant un malaxeur à axe incliné. La vibration a été effectuée à l'aide d'une aiguille vibrante afin d'obtenir un béton compact avec moins de vides possible. Pour vérifier leur conformité avec les bétons étudiés, le degré d'affaissement au cône d'Abrams est mesuré à chaque coulage. De plus, des échantillons sont prélevés de chaque béton pendant le coulage des poutres pour un contrôle ultérieur. Ces échantillons sont des éprouvettes cubiques 100 mm pour évaluer la résistance à la compression du béton, des éprouvettes prismatiques $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ pour évaluer la résistance à la traction par flexion. En parallèle, des poutres non chargées similaires à celles soumises à l'essai de fluage sont confectionnées pour mesurer la déformation de retrait. Après 24 heures, les poutres sont décoffrées et conservées dans le laboratoire à l'air, maintenu dans les mêmes conditions à une température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et une humidité de 90 % jusqu'au jour de l'essai de fluage. La figure 3.22 montre les étapes de fabrication des poutres.



(1) Coffrage et ferrailage.



(2) Bétonnage.

Figure 3.22. Procédé de fabrication des poutres.

3.6.8.3. Protocole de mise en charge

Afin de comparer les déformations résultant du fluage dans les différentes générations des bétons testés, le niveau de contrainte pendant l'essai a été maintenu à 40 % de la charge ultime de chaque poutre. Dans le cas du béton ordinaire, si on applique des charges dépassant 50 % de la charge de rupture, le comportement viscoélastique subit un changement significatif. La vitesse de fluage, qui était initialement en décroissance (fluage primaire), peut devenir constante (fluage secondaire) et peut entraîner une rupture après une accélération de la vitesse de fluage (fluage tertiaire) [190].

Les valeurs des charges appliquées sur chaque poutre présentées dans le tableau 3.6 ont été calculées par la méthode de calcul du moment résistant d'une section rectangulaire non fissurée en flexion simple à l'ELS selon l'Eurocode 2. A noter que le poids propre de la poutre est pris en compte dans le calcul des charges. Le chargement maintenu constant a été effectué pour toutes les poutres après 28 jours de durcissement, comme le montre la figure 3.23.

Tableau 3.6. Charges appliquées aux poutres dans l'essai de fluage.

Béton	BGN	BGR1-50	BGR1-100	BGR2-50	BGR2-100	BGR3-50	BGR3-100	BGR3-100-FS
Charge (N/ml)	262.5	252.9	248.8	249.5	223.3	224.2	205	205.4



Figure 3.23. Essai de fluage en flexion.

3.6.8.4. Mesure des déformations de fluage

Pour la mesure des déformations dues au fluage, un comparateur numérique d'une précision de 1 μm a été utilisé, en mesurant l'écart entre les deux plots fixés sur les facettes des poutres espacés de 100 mm (Figure 3.24).

En ce qui concerne la mesure de la flèche, des capteurs de déplacement d'une précision de 1 μm sont placés à mi-travée de chaque poutre (Figure 3.24).

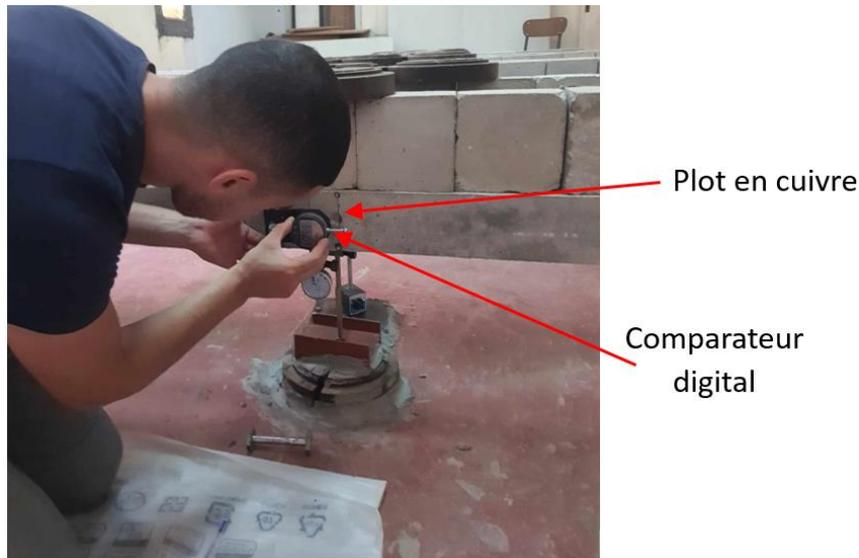


Figure 3.24. Mesure de fluage.

Les mesures des déformations sont réalisées à deux emplacements différents sur une face de chaque poutre : au niveau de la fibre supérieure (zone comprimée), pour évaluer la déformation en compression, et au niveau de la fibre inférieure (zone tendue) pour quantifier la déformation en traction.

Avant chaque série de mesures, le comparateur est systématiquement remis à zéro en utilisant le bouton d'étalonnage. Une série de mesures correspond à une période donnée et consiste à évaluer les déformations sur l'ensemble des poutres soumises au fluage pour une campagne expérimentale spécifique. Le fluage est mesuré sur cinq intervalles :

- Premier intervalle : chaque jour pendant deux semaines ;
- Deuxième intervalle : trois fois par semaine pendant deux semaines ;
- Troisième intervalle : une fois par semaine pendant un mois ;
- Quatrième intervalle : deux fois par mois pendant un mois.
- Cinquième intervalle : une fois par mois pour une période de neuf mois.

A titre d'illustration, lorsque trois mesures sont répétées avec une même référence de mesure et une remise à zéro systématique du comparateur avant chaque prise de mesure, l'écart entre la valeur maximale et minimale mesurée ne dépasse pas 2 μm . La déformation de fluage est obtenue en soustrayant la déformation due au retrait total de la déformation totale. Elle est mesurée à l'aide de la formule suivante :

$$\epsilon_{\text{fluage}} = \epsilon_{\text{totale}} - \epsilon_{\text{retrait}} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_{\text{totale}} = (L_i - L_0) / L_0 \quad (3.10)$$

l_0 : longueur mesurée lors de la première échéance,

l_i : longueur mesurée relevée à un instant t.

3.7. Conclusion

Ce chapitre révèle que les propriétés physiques des granulats multi-recyclés sont différentes de celles des GN. Un nombre plus élevé de cycles de recyclage entraîne une augmentation de la quantité de mortier attaché présente dans les GR, ce qui entraîne une détérioration de ses propriétés. De plus, cette section résume le programme expérimental réalisé et les variables examinées. La figure 3.25 présente un aperçu des étapes et des essais effectués au cours de cette étude.

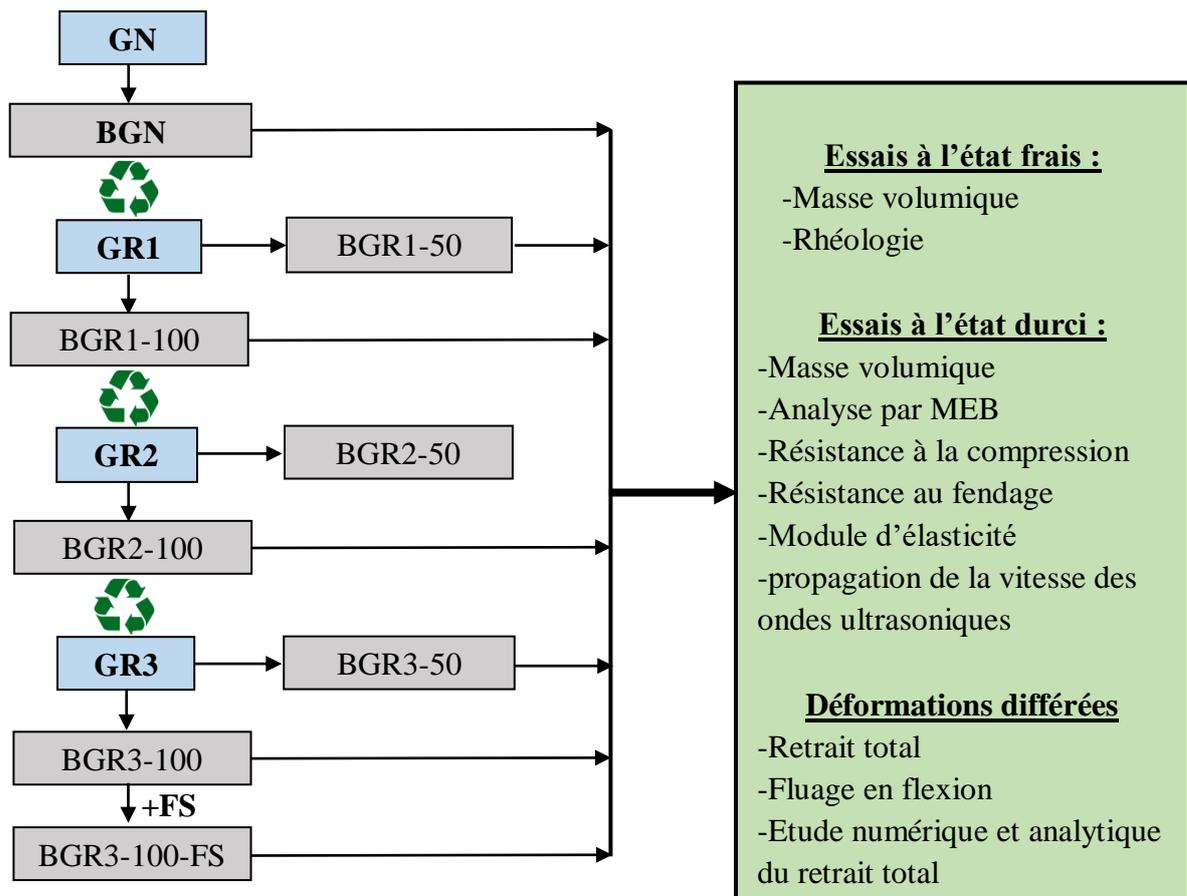


Figure 3.25. Schéma du protocole expérimental.

Chapitre 4 :
Interprétation des résultats
expérimentaux

Chapitre 4 : Interprétation des résultats expérimentaux

4.1. Introduction

Ce chapitre vise principalement à approfondir la compréhension des effets du multi-recyclage sur les propriétés des bétons ordinaires en fournissant des informations supplémentaires dans ce domaine.

Dans ce chapitre, l'analyse et la discussion des résultats issus des divers essais réalisés à l'état frais et durci sont présentées afin de mettre en évidence les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques, la microstructure et les déformations différées des bétons étudiés. Trois cycles de recyclage ont été pris en compte, avec deux niveaux de substitution volumique des GN par les GR (50 % et 100 %).

4.2. Propriétés du béton frais

4.2.1. Masse volumique

La figure 4.1 illustre la variation de la masse volumique du béton frais en fonction du nombre de cycles de recyclage et du taux de GR. La masse volumique du béton frais présente une réduction significative avec l'augmentation du nombre de cycles et du taux de substitution des GN par les GR.

La masse volumique du béton frais est influencée par la masse volumique de ses composants, étant donné que les GR présentent une masse volumique moindre par rapport aux GN (voir tableau 3.4) en raison de la présence du mortier attaché. De plus, la quantité de ce dernier augmente à chaque cycle (voir tableau 3.3), donc le béton deviendra moins dense. Ce résultat est confirmé par Abreu et al. [59] et Salesa et al. [71]. A noter que les GR utilisés dans les mélanges sont pré-saturés. Dans ce cas, l'eau absorbée par ces granulats peut compenser les diminutions de densité des mélanges. En revanche, si des GR sont utilisés à l'état sec, on peut trouver des diminutions de la masse volumique des mélanges plus significatives avec l'augmentation du nombre de cycles.

De plus, la figure 4.1 illustre le changement de la masse volumique du BGR3-100 suite à l'incorporation de la fumée de silice. L'incorporation de cette dernière a conduit à une

réduction de 1.4 % de la densité du BGR3-100. Cette baisse s'explique par la faible masse volumique de la fumée de silice par rapport à celle du ciment.

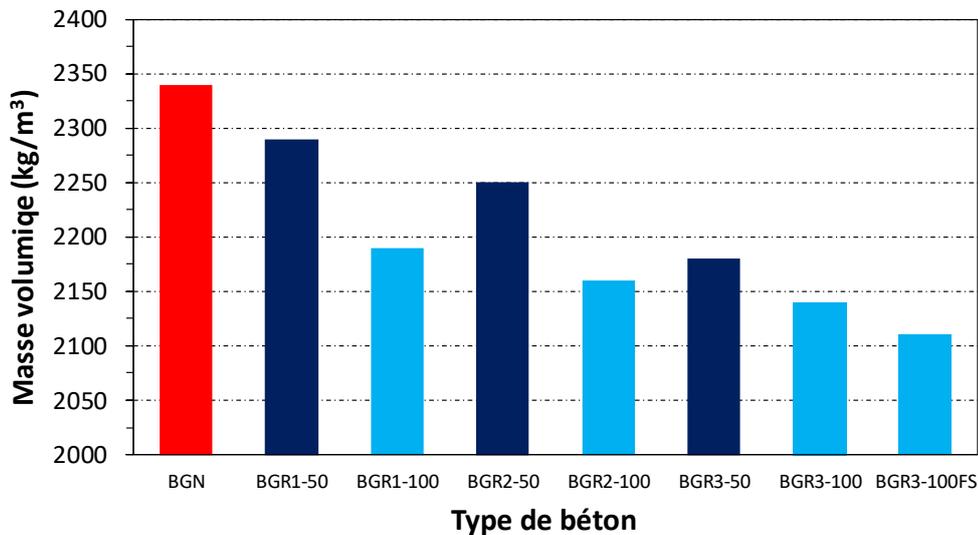


Figure 4.1. Effet de multi-recyclage sur la masse volumique du béton frais.

4.2.2. Rhéologie

Les résultats relatifs aux paramètres rhéologiques des différentes générations de bétons sont illustrés dans la figure 4.2. On observe une augmentation des paramètres rhéologiques avec l'augmentation du nombre de cycles, quel que soit le taux d'incorporation des GR.

Dans le cas d'incorporation de 50 % des GR, les paramètres rhéologiques du béton du troisième cycle ont augmenté de 30 % par rapport au BGN. En revanche, dans le cas d'utilisation de 100 % de GR, la viscosité de la même génération de béton a augmenté de 82 %. Le seuil de cisaillement a également suivi la même tendance, enregistrant une augmentation de 95 % par rapport au BGN.

Ceci s'explique par la rugosité accrue des GR, laquelle devrait entraîner un frottement intergranulaire plus significatif, et par conséquent, des valeurs de viscosité et de seuil de cisaillement élevées, comme indiqué par Amario et al. [111], qui ont souligné que les paramètres rhéologiques des BGR sont principalement influencés par les différents états d'humidité du GR, leur forme irrégulière, et leur rugosité due au mortier attaché. Les résultats obtenus concordent avec les conclusions de l'étude menée par Azzaz et al. [75] qui ont noté que la pré-saturation des GR augmente légèrement les paramètres rhéologiques.

Comme le montre la figure 4.2, l'ajout de fumée de silice a conduit à une élévation des paramètres rhéologiques du BGR3-100. Une teneur plus élevée en fumée de silice entraîne une plus grande surface spécifique des particules, une plus grande formation de la structure de

floculation et un film d'eau plus mince à la surface des particules. A ce moment, la force de cohésion augmente et la résistance au glissement relative entre les particules sous la force de cisaillement s'accroît également, augmentant ainsi les paramètres rhéologiques du béton frais.

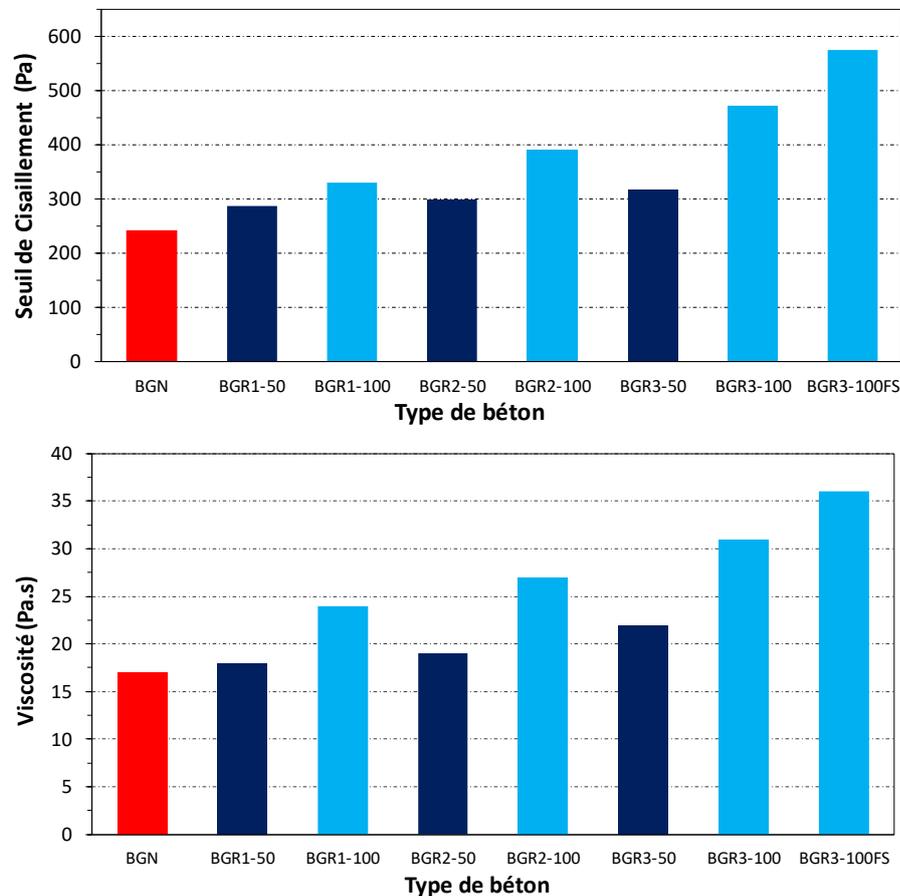


Figure 4.2. Paramètres rhéologique des bétons frais.

4.3. Propriétés du béton durci

4.3.1. Masse volumique

La figure 4.3 présente les valeurs de la masse volumique des bétons testés après 28 jours de durcissement. Pour un taux de substitution de 100 %, une diminution de 7 %, 8 %, et 9 % de la densité du béton a été enregistrée dans le premier, le deuxième et le troisième cycle, respectivement. En parallèle, les bétons formulés avec un taux de substitution de 50 % de GR ont montré une baisse de densité de 2 %, 4 % et 7 % lors des trois générations, respectivement.

Cela résulte de la présence de vides à l'intérieur de la structure des BGR en comparaison au BGN, ainsi que de la présence de pores et de fissures dans les anciens mortiers attachés aux GR. Ces résultats sont conformes avec ceux trouvés par Azzaz Rahmani et al. [75].

D'un autre côté, la diminution de la densité des BGR est un avantage de ces bétons, qui contribue à alléger la charge permanente des structures, ce qui peut partiellement compenser la perte de résistance. Par ailleurs, les densités réduites diminuent la conductivité thermique du béton, ce qui améliore l'efficacité d'isolation thermique et acoustique des bâtiments.

Contrairement à la densité du béton frais, l'ajout de la fumée de silice a entraîné une légère augmentation de la densité du BGR3-100 durci (Figure 4.3). Cela peut être attribué à l'effet physique de la fumée de silice qui diminue la porosité du BGR par ses particules ultra fines. De plus, l'ajout de fumée de silice améliore les ITZs du BGR3-100. En effet, la structure des pores est améliorée et le volume des micropores est réduit, entraînant une augmentation de la densité du béton durci [81].

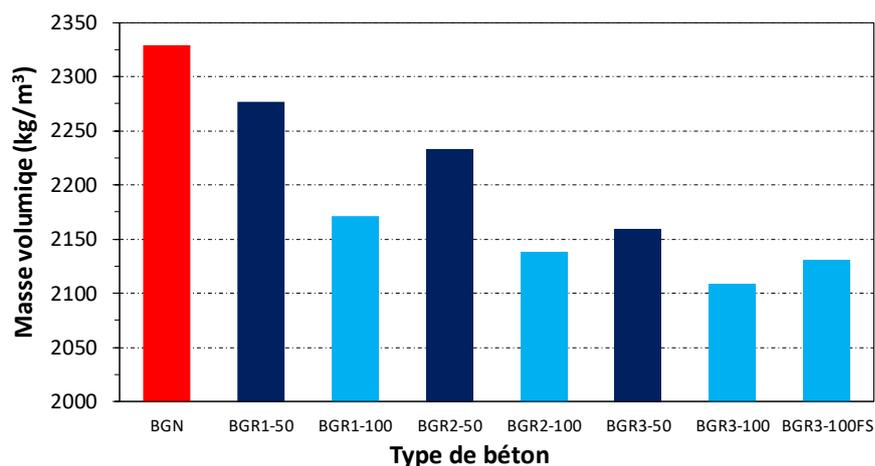


Figure 4.3. Masse volumique des bétons durcis.

4.3.2. Analyse d'image

4.3.2.1. Macrostructure

La figure 4.4 montre les sections transversales des cylindres des différentes générations de béton. La taille et la quantité des GN diminuent progressivement avec le nombre de cycles de recyclage, ce qui entraîne une augmentation de la proportion du mortier dans le béton. La surface occupée par le GN dans le BGN représente environ 58 % de la surface totale de l'échantillon. Cette surface diminue avec l'augmentation du nombre de cycles, atteignant respectivement 42 %, 33 % et 27 % dans les BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100.

Tous les bétons présentent une granulométrie de gravier similaire, mais la fraction de GN se transforme progressivement en sable après chaque concassage. Par conséquent, on peut présumer qu'à partir d'un certain cycle, tous les GR seront principalement composés de mortier et leur incorporation dans un mélange, conduira davantage à la formation d'un mortier qu'à celle d'un béton.

Il est important de noter que le volume du nouveau mortier dans chaque cycle au moment du malaxage est le même, mais à mesure que le nombre de recyclages augmente, le volume total de mortier du béton augmente dans une mesure proportionnelle au volume de mortier attaché incorporé dans les GR.

Selon Kim [127], la proportion du mortier attaché atteint plus de 80 % dans le troisième cycle, et à partir du quatrième cycle, les GR seront composés uniquement de mortier. Guo et al. [191] ont signalé que le volume de mortier attaché a un effet néfaste sur les propriétés du BGR.

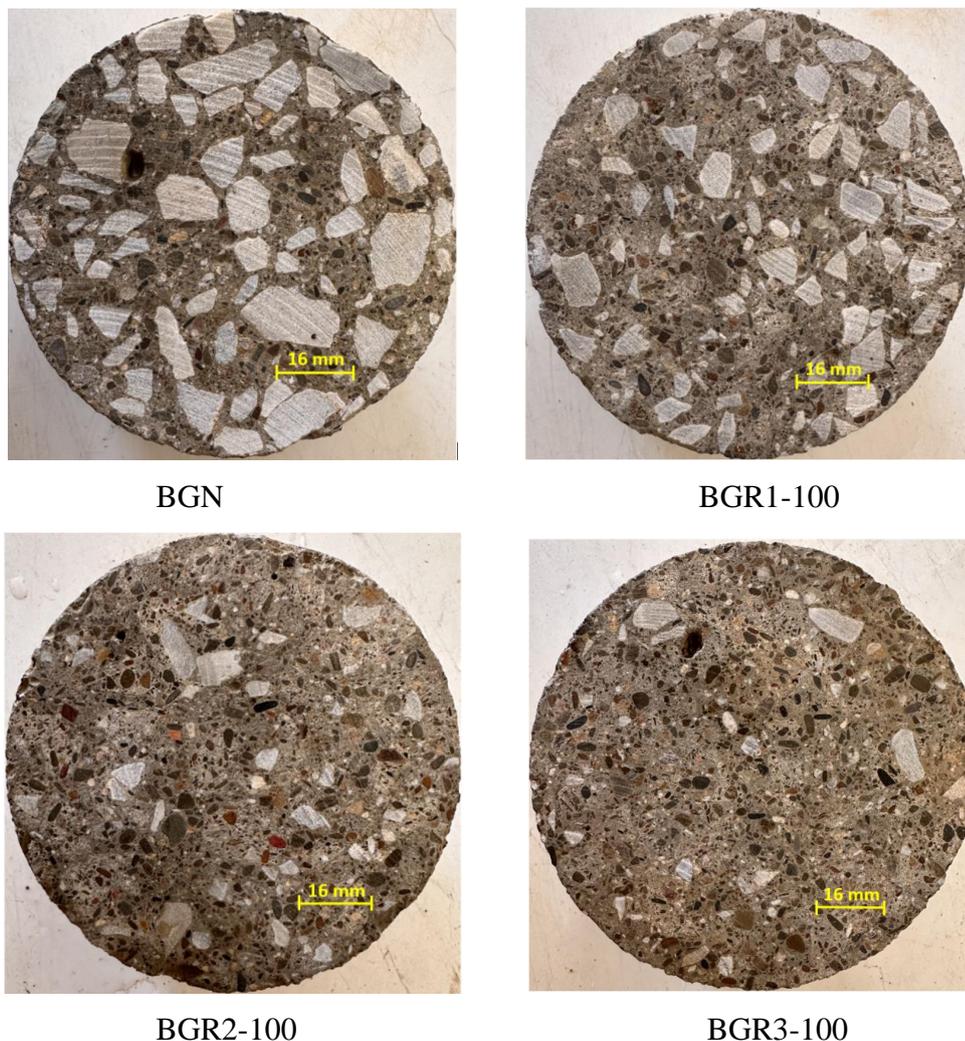


Figure 4.4. Macrographie des béton testés.

4.3.2.2. Microstructure

a) Effet du multi-recyclage sur la microstructure du béton

La figure 4.5 présente les résultats de l'analyse des microstructures des trois générations du béton à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) à 90 jours de durcissement.

Le BGN a été considéré comme un matériau composite, composé de GN et de mortier, liés par une ITZ (Figure 4.5(a)). Quelques pores et microfissures ont été observés dans ce béton, ce qui peut être attribué aux contraintes de tension dues à l'hydratation du ciment.

Le BGR1-100 présente deux ITZs : la première se localise à l'interface entre le GN et le mortier 1 et la deuxième ITZ se trouve entre le mortier 1 et le mortier 2. De nombreux pores et microfissures sont dispersés de manière aléatoire dans la matrice des mortiers, en particulier dans le mortier 1 (Figure 4.5(b)).

Le BGR2-100 se compose de trois générations de mortier reliées par trois ITZs. Les pores et les microfissures observés dans ce béton étaient principalement localisés dans le premier et le deuxième mortier (Figure 4.5(c)).

Dans le BGR3-100, une nouvelle ITZ a été observée entre le mortier 3 et le mortier 4. Dans ce cas, des pores et des microfissures ont été trouvés, principalement dans les trois anciens mortiers (Figure 4.5(d)).

Comme illustré dans la Figure 4.5, le nombre des ITZ est proportionnel avec le nombre des cycles. Par conséquent, le nombre de fissures augmente dans les anciens mortiers en raison des cycles de concassage répétés, affaiblissant ainsi la microstructure du BGR de différentes générations.

Lorsque les GR prés saturés sont incorporés dans la pâte de ciment du nouveau mélange pendant le malaxage, l'eau absorbée migre vers l'ITZ, entraînant un gonflement localisé et une augmentation de la pression pendant le processus d'hydratation, ce qui provoque la formation de microfissures autour de l'interface. Cela peut compromettre les performances du béton multi-recyclé.

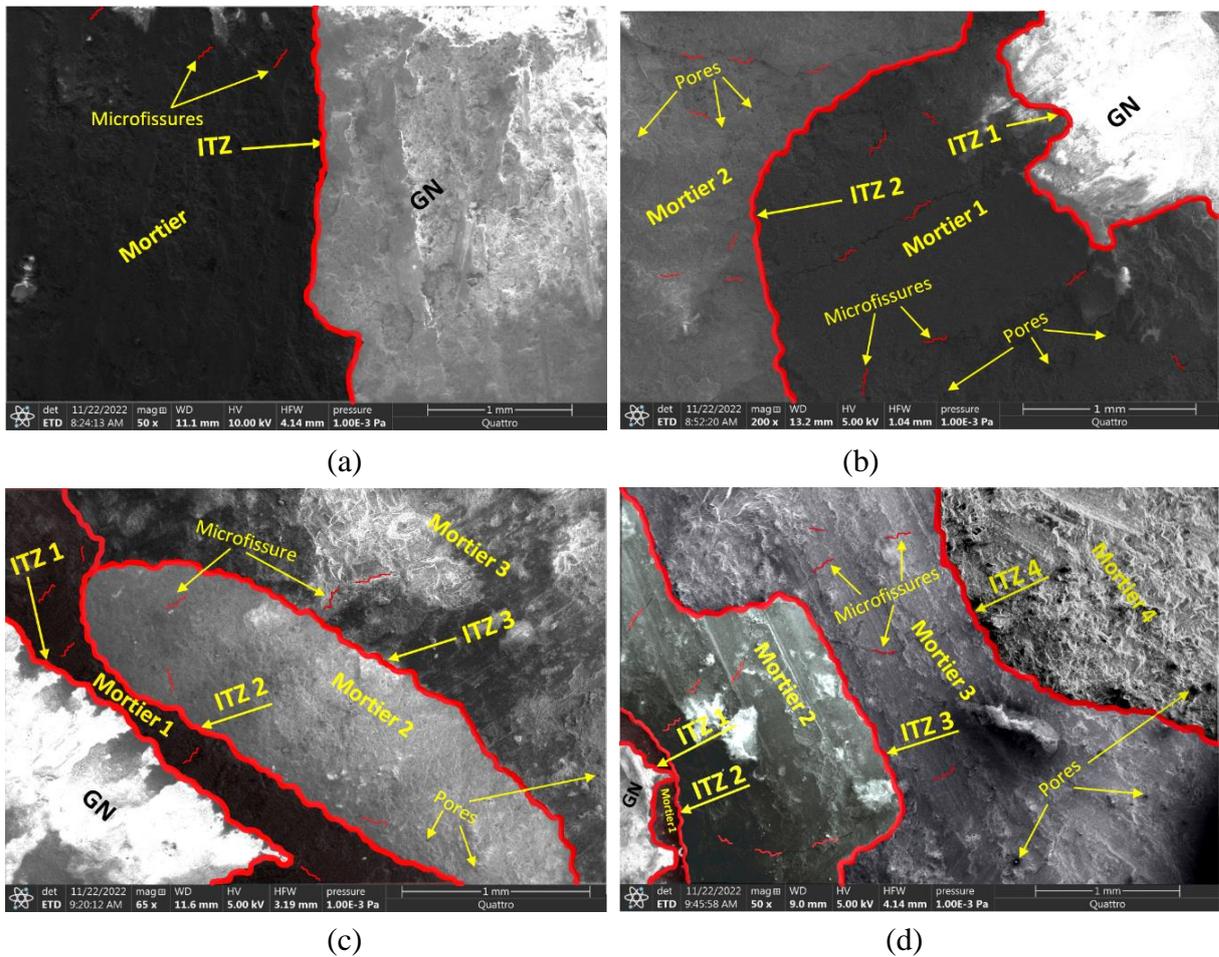
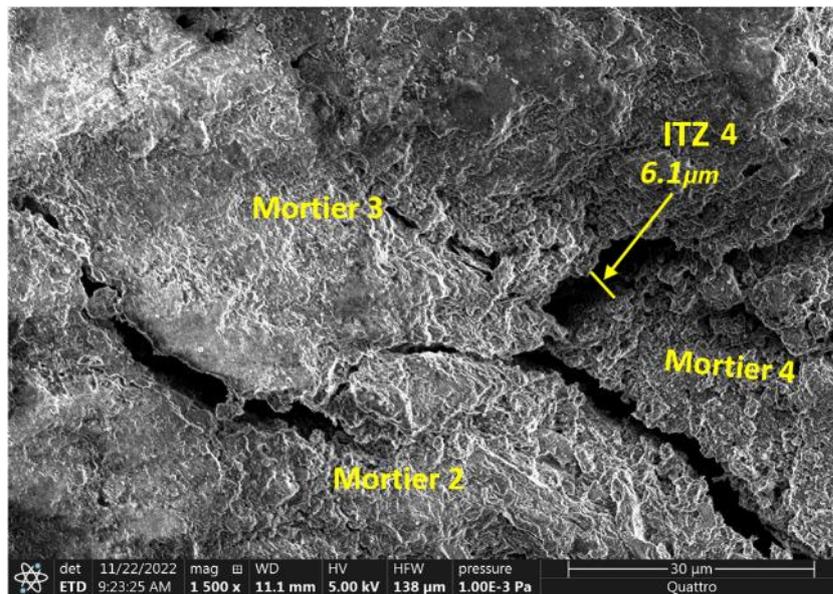


Figure 4.5. Effet de multi-recyclage sur la microstructure du béton.

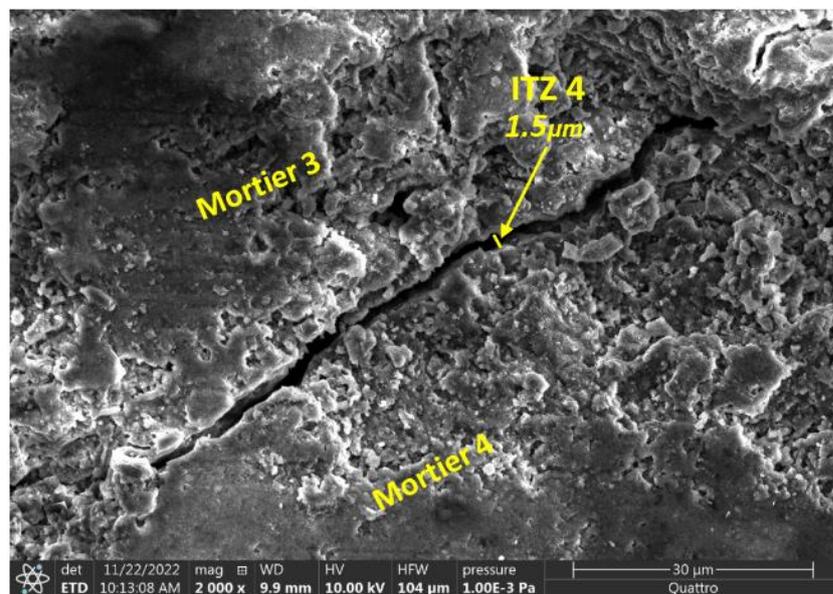
b) Effet de la fumée de silice sur la microstructure du béton multi-recyclé

La figure 4.6 présente les micrographies de la quatrième ITZ du béton de la troisième génération avant et après traitement avec la fumée de silice à 90 jours. Il est remarquable que l'utilisation de la fumée de silice a entraîné une diminution de l'épaisseur de l'ITZ4.

En tant que matériau très fin, la fumée de silice démontre la capacité de combler les vides et les fissures présentes au niveau de l'ITZ. En pénétrant ces espaces, ce matériau comble les discontinuités et renforce la liaison entre les GR et le nouveau mortier. Cette amélioration contribue à renforcer les microstructures des bétons multi-recyclés.



(a) Avant traitement (BGR3-100)



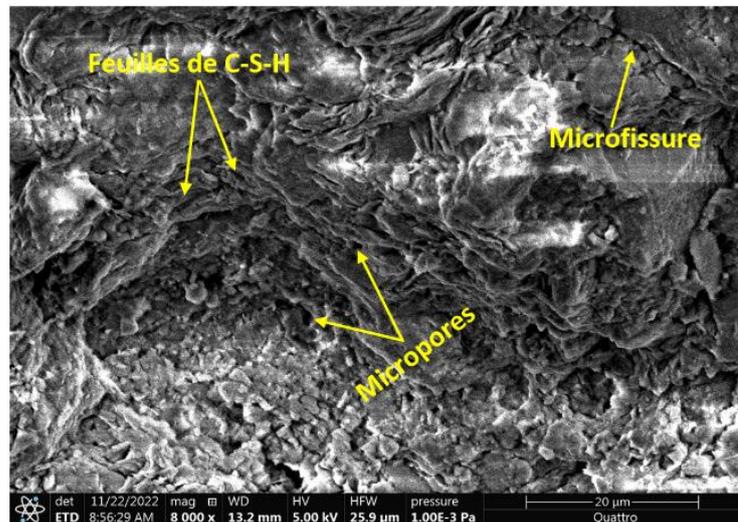
(b) Après traitement (BGR3-100-FS)

Figure 4.6. ITZ4 du BGR3-100 avant et après traitement avec la fumée de silice à 90 jours

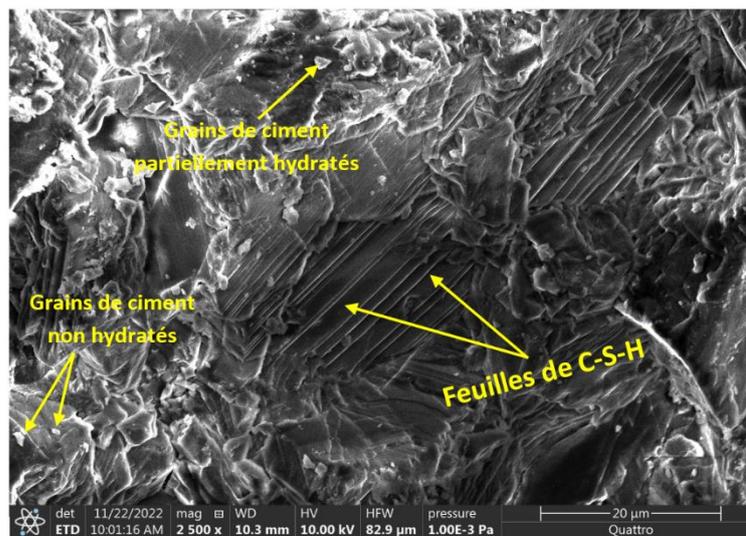
A partir de l'image MEB du BGR3-100 (Figure 4.7(a)), on peut observer une distribution hétérogène des hydrates (C-S-H), avec des micropores et des microfissures apparentes à l'intérieur de la structure entre les feuilles de C-S-H.

L'image MEB du BGR3-100FS (Figure 4.7(b)) montre un emballage dense des produits d'hydratation du ciment. Dans ce béton, les feuilles de C-S-H présentent une densité accrue et une distribution plus uniforme, avec moins de microfissures entre elles.

La teneur élevée en silice amorphe dans la formulation de la fumée de silice peut déclencher une réaction pouzzolanique dans la matrice cimentaire, favorisant ainsi le développement de la microstructure du béton en formant un gel de C-S-H supplémentaire plus dense lorsqu'elle réagit avec la portlandite [192].



(a) BGR3-100



(b) BGR3-100FS

Figure 4.7. Microstructure du BGR3-100 avant et après traitement avec la fumée de silice à 90 jours.

4.3.3. Résistance à la compression

La figure 4.8 montre la variation de la résistance à la compression des bétons testés au fil du temps. De plus, le tableau 4.1 montre les valeurs relatives (VR) de la résistance à la compression des mélanges par rapport à celle du BGN, ainsi que les écarts type (S).

Il est démontré que la résistance à la compression augmente avec le temps pour toutes les BGR testées. En effet, les gains de résistance sont de 12 %, 17 %, 11 %, 15 %, 11 %, et 13 % entre 28 et 91 jours pour le BGR1-50, BGR1-100, BGR2-50, BGR2-100, BGR3-50 et BGR3-100, respectivement. Ces gains sont attribués à la quantité de mortier attachée aux granulats, qui contient une quantité plus élevée d'eau pour la cure interne et peut prolonger le processus d'hydratation. Cela se traduit par un gain précoce de résistance à la compression, comme l'ont confirmé Pickel et al. [193], El-Hawary, et Al-Sulily [194].

De manière générale, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du nombre de cycles et avec le taux de GR dans chaque cycle. Comparées au BGN et pour les BGR contenant 50 % de GR, les pertes de résistance à la compression à 90 jours pour le premier, le deuxième et le troisième cycle étaient de 7 %, 12 % et 19 %, respectivement, et de 12 %, 25 % et 34 %, respectivement pour les BGR contenant 100 % de GR. Ces résultats concordent avec ceux trouvés dans la littérature [59, 75, 118, 195, 196].

Cette perte de résistance est attribuée à la quantité de mortier attaché, qui augmente avec chaque génération. Ainsi, une plus grande proportion de mortier attaché et une faible ITZ entraînent une mauvaise qualité de béton, avec une résistance à la compression plus faible [197]. D'après les résultats obtenus par Thomas et al. [195], la nouvelle pâte de ciment était le principal facteur contribuant à l'augmentation de la porosité fermée du béton. Dans ce contexte, Fiol et al. [198] ont souligné que la quantité élevée de mortier attaché réduit considérablement la résistance à la compression. Aussi, l'augmentation du nombre d'ITZ à chaque génération, entraîne une fragilisation des microstructures du béton multi-recyclé. Mao et al. [151] ont rapporté qu'une ITZ plus faible entraîne une densité plus faible, une porosité plus élevée, une plus grande capacité d'absorption d'eau et une surface plus rugueuse dans le BGR par rapport au BGN. Selon Butler et al. [199], pour un BGR avec une résistance à la compression de 30 MPa, la rupture produite autour du granulat et de l'ITZ s'est avérée être le facteur de résistance critique.

Par ailleurs, en se fondant sur les données tirées de l'analyse microstructurale (Figure 4.5), les cycles de concassage répétés et la présence des GR absorbant l'eau dans les BGR contribuent à accroître la formation de fissures dans les anciens mortiers, affectant ainsi de manière défavorable la microstructure de la nouvelle pâte de ciment. Cette situation pose des défis significatifs en ce qui concerne la résistance à la compression du béton multi-recyclé.

A 90 jours, la résistance à la compression du BGR3-100FS est de 34.6 MPa, qui est 19 % inférieure à celle du BGN et 24 % supérieure à celle du BGR3-100 (Figure 4.8).

Cette amélioration est due à l'effet physique et à l'action pouzzolanique de la fumée de silice. Cette dernière limite la porosité et renforce les ITZs du BGR3-100 en réduisant la taille des pores, grâce à ses particules ultrafines. De plus, elle réagit avec la chaux lors de l'hydratation du ciment et favorise la formation de C-S-H supplémentaires qui relie les différents composants entre eux pour créer une matrice de ciment dense et compacte [81, 200]. Il est important de noter qu'avant 28 jours, il n'y avait pas d'amélioration suffisante de la résistance à la compression du BGR3-100-FS par rapport à celui de BGR3-100, car l'activité pouzzolanique ne se déclenche qu'après la saturation de la solution interstitielle du béton avec la chaux (après 28 jours).

Tableau 4.1. Valeurs relatives de la résistance à la compression des bétons testés.

Béton	7 jours		28 jours		90 jours	
	VR (%)	S	VR (%)	S	VR (%)	S
BGN	1	0.8	1	0.6	1	0.1
BGR-50	0.9	1.9	0.92	1.6	0.93	1.7
BGR1-100	0.8	2.6	0.84	0.5	0.88	1.1
BGR2-50	0.86	4.2	0.88	2.1	0.88	0.8
BGR2-100	0.67	1.2	0.72	0.3	0.75	1.9
BGR3-50	0.78	3.3	0.82	0.8	0.81	0.5
BGR3-100	0.61	1.5	0.65	0.6	0.66	2.1
BGR3-100FS	0.63	2.9	0.69	1.2	0.81	0.3

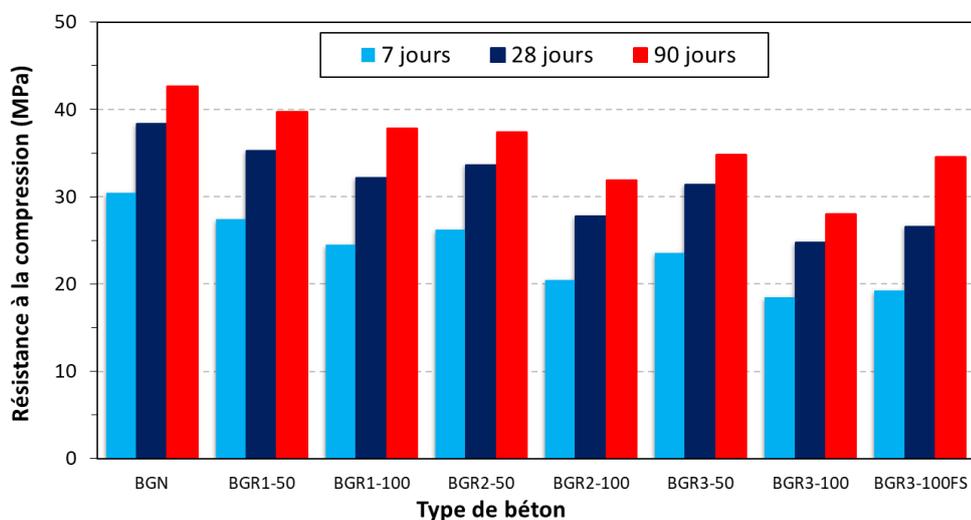


Figure 4.8. Variation de la résistance à la compression des bétons testés avec le temps.

Selon la figure 4.9, la variation de la résistance à la compression avec le nombre de cycles de recyclage montre une tendance linéaire apparente dans tous les pourcentages de substitution de GR. Les coefficients de détermination R^2 varient entre 0.9755 et 0.9972 pour les périodes de durcissement de 28 et 90 jours, respectivement.

Il n'est pas clair que la résistance à la compression tend vers une valeur asymptotique. Cela peut être dû au fait que des cycles de recyclage supplémentaires au-delà du troisième cycle sont nécessaires pour rendre ce phénomène plus compréhensible. Une revue de la littérature a montré que cette tendance se produit, avec une stabilisation des caractéristiques des granulats multi-recyclés [201].

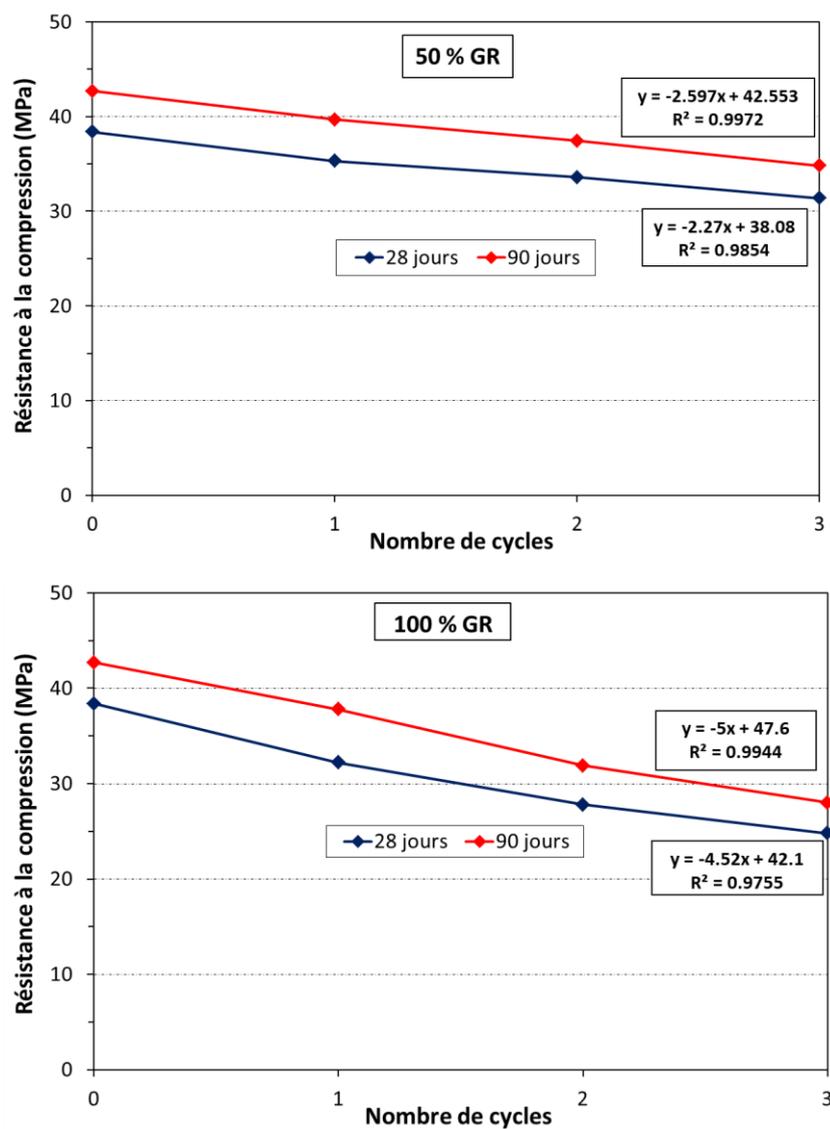


Figure 4.9. Variation de la résistance à la compression avec le nombre de cycles de recyclage.

4.3.4. Courbes contraintes-déformations en compression

La figure 4.10 montre les courbes contraintes-déformations issues de l'essai de compression à 28 et 90 jours. On remarque que tous les bétons avaient un comportement ductile, et cette capacité à se déformer plastiquement augmente avec chaque cycle de recyclage.

Un comportement ductile est généralement souhaitable dans la conception des structures, en particulier dans des situations où des déformations importantes sont attendues, comme dans le cas d'un séisme. La ductilité permet au béton de se déformer plutôt que de se rompre brusquement, ce qui peut contribuer à absorber et dissiper l'énergie générée par de telles forces.

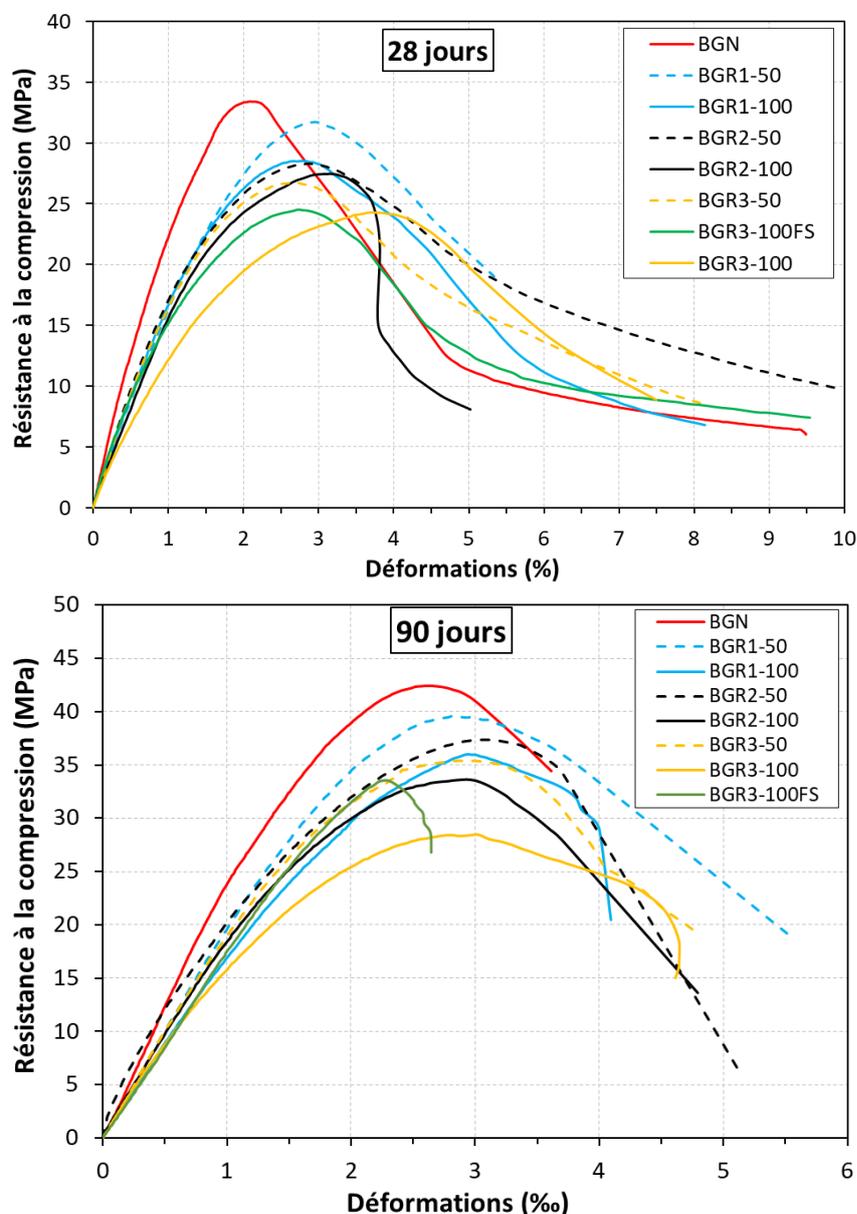


Figure 4.10. Courbes contraintes-déformations en compression des bétons testés.

A 90 jours, la contrainte maximale de compression du BGN est de 42 MPa et sa déformation maximale correspondante est de 2.6 ‰. Les valeurs des déformations longitudinales correspondantes aux contraintes maximales des BGR1-50, BGR2-50, BGR3-50, BGR1-100, BGR2-100, BGR3-100 et BGR3-100-FS sont respectivement égales à 2.75 ‰, 2.8 ‰, 2.88 ‰, 2.92 ‰, 2.96 ‰, 3 ‰, et 2.3 ‰.

Les valeurs des déformations correspondantes aux contraintes maximales des BGR sont plus élevées par rapport à celles du BGN. Cela est dû à la porosité accrue des BGR.

La déformation ultime est considérée comme la déformation axiale au-delà de la contrainte maximale à un niveau de contrainte égal à 85 % de la contrainte maximale [202]. La déformation longitudinale ultime de BGN est de 3.4 ‰. Les déformations longitudinales ultimes du BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100 sont 3.75 ‰, 3.8 ‰ et 4.1 ‰, respectivement, soit 10 %, 12 %, et 21 % supérieures à celles du BGN. La déformation ultime du BGR3-100-FS était de 2.55 ‰. Cela signifie que les BGR sont plus capables de se déformer avant de se rompre, ce qui peut indiquer que le multi-recyclage améliore la ductilité du béton.

4.3.5. Résistance au fendage

La figure 4.11 montre les résultats de la résistance au fendage des bétons testés au fil du temps et le tableau 4.2 présente les valeurs relatives (VR) de la résistance au fendage des mélanges par rapport à celle du BGN, ainsi que les écarts type (S).

On observe que la résistance au fendage diminue à la fois avec l'augmentation du nombre de cycles et de la teneur en GR. Pour les BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100, à l'âge de 90, les réductions étaient de 13 %, 29 % et 40 %, respectivement par rapport au BGN. Tandis que, pour les BGR1-50, BGR2-50 et BGR3-50 les réductions étaient de 8 %, 10 % et 24 %, respectivement.

Cette diminution peut être attribuée à la présence de nombreux ITZ plus faibles et à la quantité plus élevée de mortier attaché. En effet, le volume des ITZs augmente avec l'augmentation de la teneur en GR, et affecte par conséquent la microstructure du béton. Ceci est cohérent avec les résultats trouvés par Huda et Alam [61] qui ont rapporté que la résistance à la traction par fendage de BGR3 était significativement inférieure à celle de BGR1 et BGR2. Cela était dû à une porosité plus élevée et à la qualité dégradée du GR3.

L'utilisation de la fumée de silice a réduit la perte de la résistance au fendage de BGR3-100 de 40 % à 26 % à 90 jours par rapport à BGN (Figure 4.11). En parallèle, la résistance au fendage de BGR3-100FS s'avère supérieure de 25 % à celle du BGR3-100.

La fumée de silice améliore l'adhérence entre les différents composants du béton. De plus, sa finesse permet de créer une microstructure très dense et améliore les ITZ du béton multi-recyclé, augmentant ainsi sa résistance à la traction.

Tableau 4.2. Valeurs relatives de la résistance au fendage des bétons testés.

Béton	7 jours		28 jours		90 jours	
	VR (%)	S	VR (%)	S	VR (%)	S
BGN	1	1.7	1	1.2	1	3.6
BGR-50	0.95	0.8	0.88	1.1	0.92	0.9
BGR1-100	0.88	2.1	0.83	2.4	0.87	1.7
BGR2-50	0.92	1.6	0.86	0.6	0.90	2.3
BGR2-100	0.73	0.7	0.69	0.4	0.71	0.6
BGR3-50	0.77	1.9	0.74	1.2	0.76	2.9
BGR3-100	0.48	0.4	0.54	0.3	0.60	1.1
BGR3-100FS	0.49	0.9	0.56	3.1	0.74	2.5

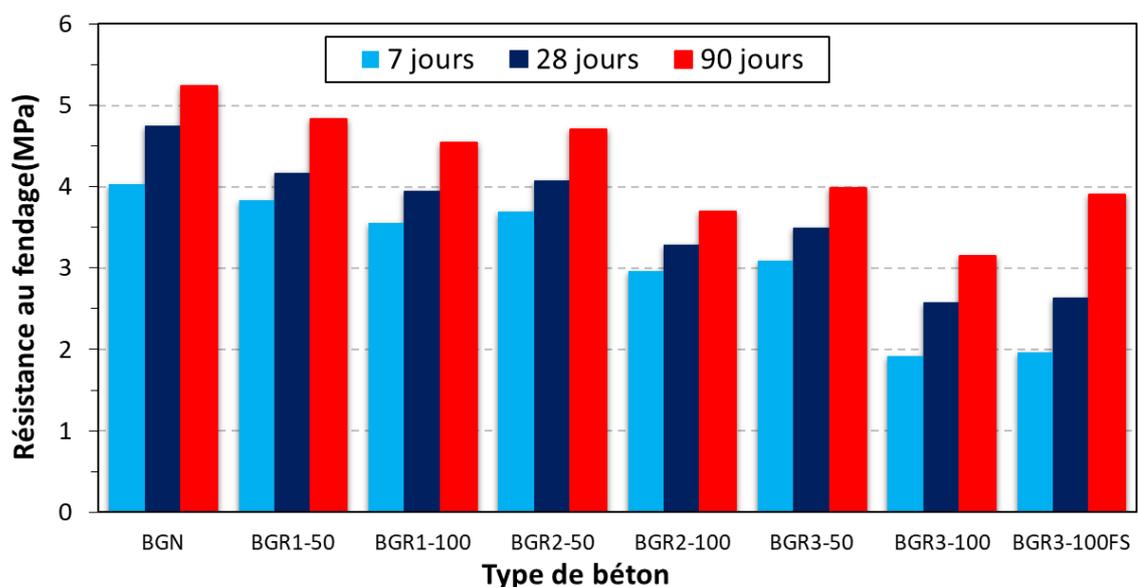


Figure 4.11. Résistance au fendage des bétons testés.

Une baisse approximativement linéaire de la résistance au fendage à mesure que le nombre de cycles de recyclage augmente a été observée (Figure 4.12). Les coefficients de détermination R^2 varient entre 0.9426 et 0.9219 pour une utilisation de 50 % de GR, et entre 0.9985 et 0.9942 pour un remplacement total des GR à 28 et 90 jours. Ce résultat concorde avec celui trouvé dans la littérature [59].

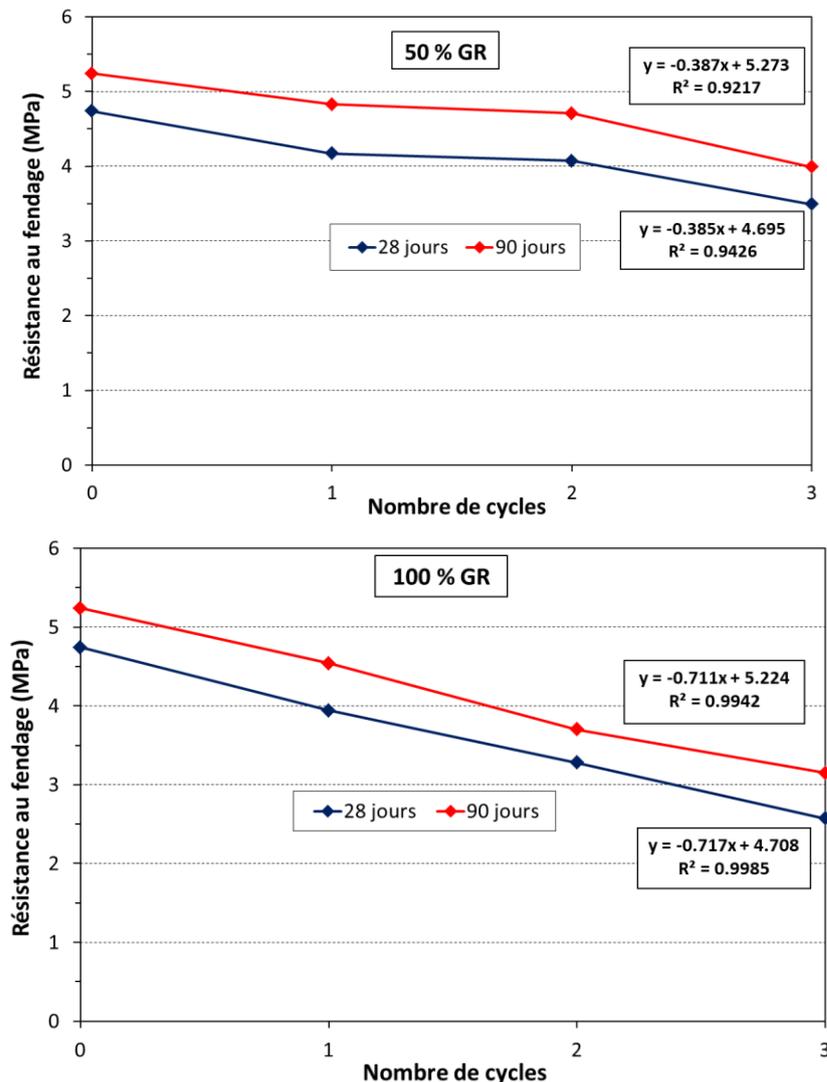


Figure 4.12. Variation de la résistance au fendage avec le nombre de cycles de recyclage.

4.3.6. Corrélation entre la résistance au fendage et à la compression

Le rapport entre la résistance à la compression et la résistance au fendage (f_c/f_t) est une propriété importante du béton ; il est fortement affecté par le niveau de la résistance à la compression. Ce rapport augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression à un taux décroissant. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le développement de la

résistance de traction se produit avec un taux beaucoup plus petit comparé à l'augmentation de la résistance à la compression [203].

D'après les résultats des essais, le rapport (f_t/f_c) des bétons multi-recyclés varie de 8 à 10.

L'approche empirique traditionnelle pour estimer la résistance au fendage f_f repose sur l'extrapolation de cette propriété à partir de la résistance à la compression f_c , en suivant une loi de puissance de la forme suivante [203] :

$$f_f = a(f_c)^b \quad (4.1)$$

Où a et b sont deux paramètres d'ajustement (varie entre 0.3 et 0.6 et b entre 0.5 et 0.7).

A la lumière des résultats expérimentaux, une corrélation entre la résistance au fendage f_f à celle de compression f_c peut être aisément déduite (figure 4.13) :

$$f_f = 0.0367(f_c)^{1.33} \quad (4.2)$$

Avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0.96.

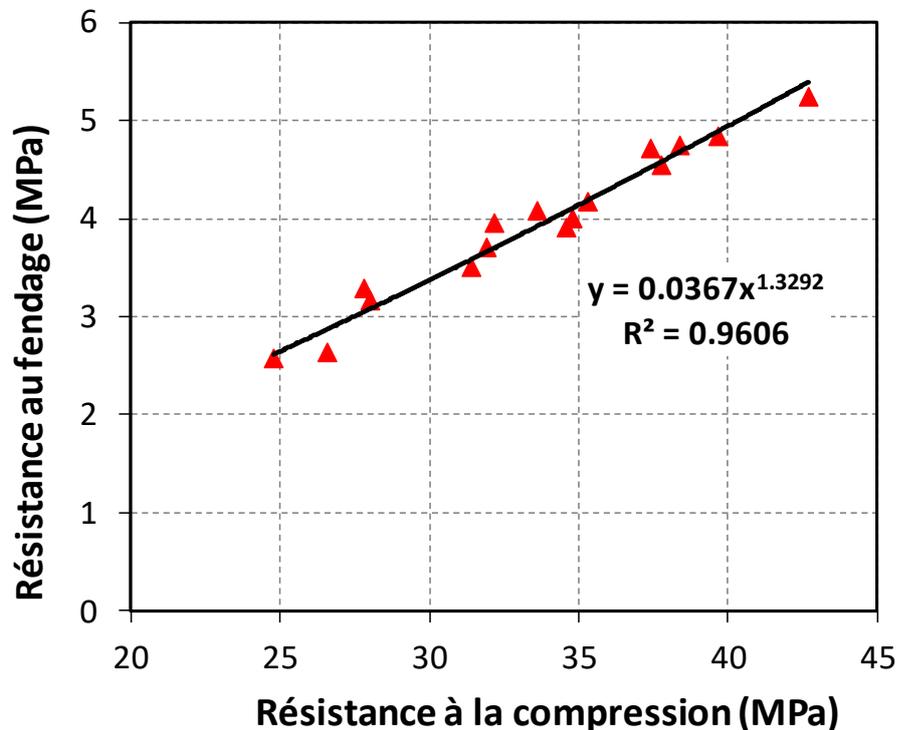


Figure 4.13 : Résistances au fendage en fonction de celles à la compression.

Plusieurs formules empiriques reliant la résistance au fendage f_f à la résistance à la compression f_c ont été proposées par différents règlements et chercheurs (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Prédiction de la résistance au fendage en fonction de celle à la compression

Référence	Equation	Intervalle de f_c (MPa)
CEB-FIB 1990 [204]	$f_f = 0.3(f_c)^{2/3}$	$f_c < 83$
ACI 318-99 [205]	$f_f = 0.56(f_c)^{0.5}$	/
BAEL 91/99 [206]	$f_f = 0.6 + 0.06f_c$	$f_c \leq 60$
	$f_f = 0.275(f_c)^{2/3}$	$60 < f_c < 80$
Carino et Lew [207]	$f_f = 0.272(f_c)^{0.71}$	/
Ahmad et Shah [208]	$f_f = 0.272(f_c)^{0.71}$	$15 \leq f_c < 84$
Arioglu [209]	$f_f = 0.231(f_c)^{0.661}$	$15 \leq f_c < 120$

La figure 4.14 illustre les résistances au fendage en fonction des résistances en compression prédites par le modèle proposé et les différents règlements et chercheurs. Pour évaluer l'écart entre les résultats expérimentaux et les prédictions, l'erreur intégrale absolue (IAE) a été utilisée, exprimée par la relation suivante :

$$IAE = \sum \frac{|f_{fi} - P_{fi}|}{\sum f_{fi}} \times 100 \quad (4.3)$$

Où f_{fi} est la résistance au fendage expérimentale et P_{fi} représente la résistance au fendage théorique.

L'IAE évalue les déviations relatives des données issues des équations de régression. Une valeur de l'IAE nulle indique que les valeurs prédites par l'équation de régression correspondent parfaitement aux résultats expérimentaux, C'est une situation qui se produit rarement. En comparant les différentes équations, celle qui présente la plus petite valeur de l'IAE est considérée comme la plus fiable.

L'IAE est présentée dans la figure 4.15. On peut constater que les modèles proposés par Carino et Lew [207], Ahmad et Shah [208] et le Code européen CEB [204] fournissent les plus petites valeurs de l'IAE (inférieures à 20 %), tandis que tous les autres modèles proposés présentent des valeurs de l'IAE supérieures à 20 %, ce qui montre que ces relations empiriques ne sont pas applicables aux bétons multi-recyclés.

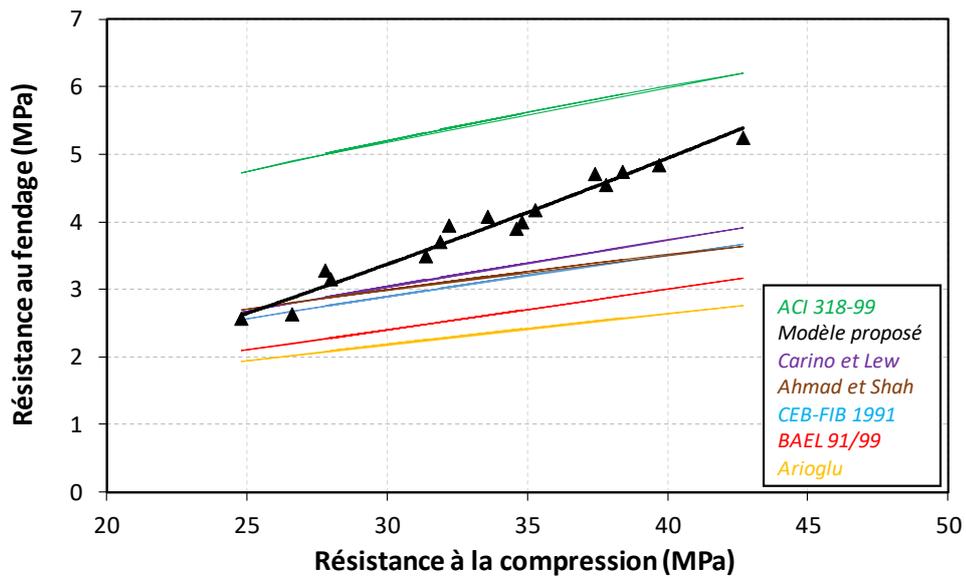


Figure 4.14 : Relation entre les résistances au fendage et à la compression.

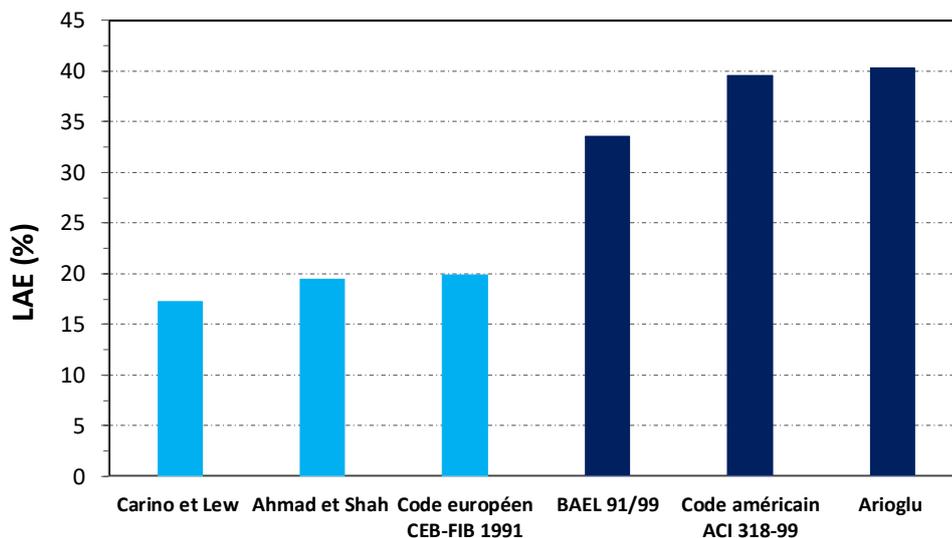


Figure 4.15 : Erreur intégrale absolue des différentes prédictions.

4.3.7. Module d'élasticité

Les valeurs du module d'élasticité statique pour les différents types de bétons sont affichées sur la figure 4.16 et leurs valeurs relatives (VR) par rapport à celle du BGN, ainsi que les écarts type (S) sont présentées dans le tableau 4.4.

Les résultats indiquent que le module d'élasticité statique suit la même tendance que la résistance à la compression et à la traction par fendage. Il diminue à chaque cycle de recyclage, en parallèle avec l'augmentation du taux de GR.

En comparant les modules d'élasticité des BGR au BGN à 90 jours, on constate une réduction de 18 %, 31 % et 52 % pour les BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100, respectivement. En parallèle, une diminution de 11 %, 20 % et 25 % a été observée pour les BGR1-50, BGR2-50 et BGR3-50, respectivement. Cela est attribué à la présence d'une quantité plus importante de mortier attaché qui possède une faible rigidité et une faible densité [71]. De plus, l'interface entre l'ancien mortier et les granulats ou la nouvelle pâte de ciment représente un maillon plus faible susceptible de se fissurer plus facilement, comme illustré sur la figure 4.5, où la plupart des fissures suivent cette ITZ.

Le BGR3-100FS a présenté une valeur du module de Young inférieure de 34 % par rapport au BGN et supérieure de 37 % par rapport au BGR3-100. A 28 jours, aucune différence significative n'était observée entre le BGR3-100 et le BGR3-100FS (Figure 4.16). En effet, l'effet physique et l'effet pouzzolanique de la fumée de silice, qui réduit la porosité du BGR et augmente sa résistance à la compression, sont les principaux facteurs qui contribuent à améliorer la rigidité du BGR3-100-FS [210]. Selon Almusallam et al. [211], l'incorporation de 10 % de fumée de silice conduit à une augmentation de 16 % du module de Young du BGR avec 100% GR.

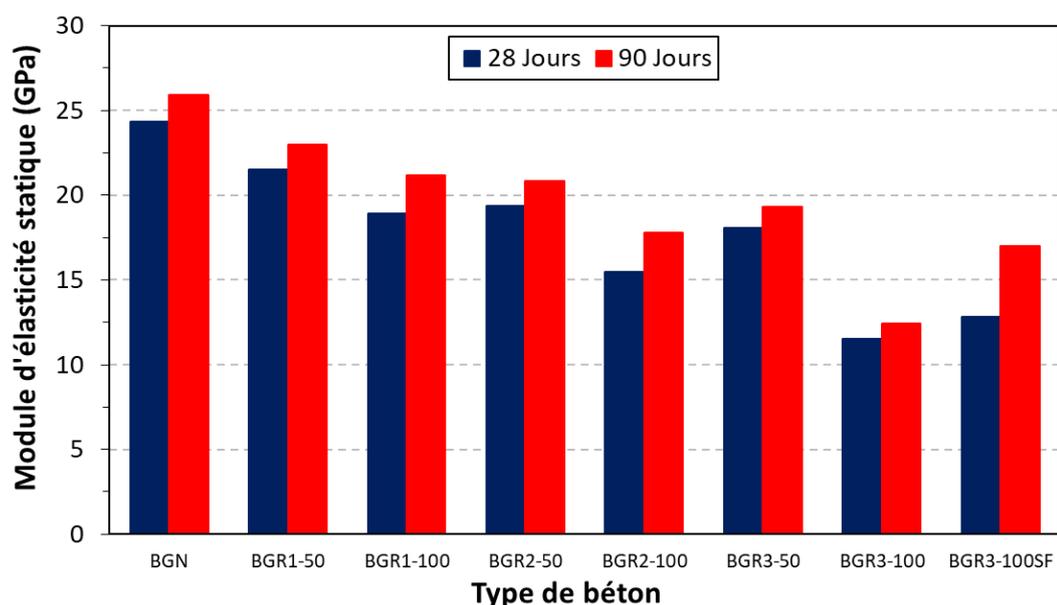


Figure 4.16. Module d'élasticité statique des bétons testés.

Tableau 4.4. Valeurs relatives de module d'élasticité des bétons testés.

Béton	28 jours		90 jours	
	VR (%)	S	VR (%)	S
BGN	1	2.7	1	1.9
BGR-50	0.88	3.1	0.89	2.7
BGR1-100	0.78	3.2	0.82	4.1
BGR2-50	0.79	1.6	0.81	2.3
BGR2-100	0.64	6.2	0.69	3.1
BGR3-50	0.74	2.4	0.75	1.5
BGR3-100	0.47	1.6	0.48	4.4
BGR3-100FS	0.53	0.9	0.66	3.2

Par ailleurs, le module d'élasticité diminue avec les cycles de recyclage de manière linéaire quel que soit le taux de GR, avec des valeurs du coefficient de détermination R^2 qui varient entre 0.9734 et 0.9931, comme le montre la figure 4.17. Ces résultats sont conformes à la majorité des résultats des études antérieures [59].

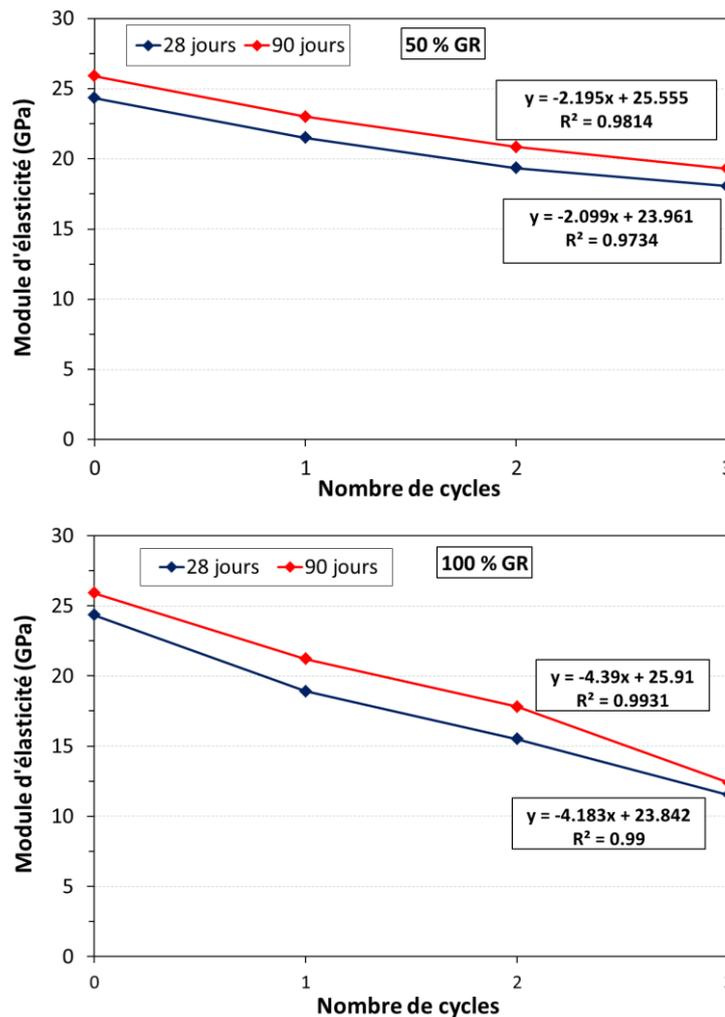


Figure 4.17. Variation du module d'élasticité avec le nombre de cycles de recyclage.

4.3.8. Essai des ondes ultrasoniques

4.3.8.1. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

L'essai ultrasonique permet une évaluation rapide et non destructive de la qualité du béton. Ce procédé repose sur le principe que la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton dépend de sa densité et de son module d'élasticité. Ainsi, des variations dans ces propriétés peuvent indiquer des zones de faiblesse. Cette technique est particulièrement utile dans le domaine de l'ingénierie civile pour évaluer la santé des structures en béton, détecter d'éventuelles dégradations et assurer la sécurité à long terme des infrastructures. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité, comme il a été décrit dans le tableau 4.5 [212].

Tableau 4.5. Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [212].

Vitesse d'impulsion (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500 - 4500	Bonne
3000 - 3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

L'objectif de cette section de l'étude était de déterminer la corrélation entre le cycle de recyclage et la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton, en considérant deux taux de substitution des GN par des GR. Les résultats des mesures de la vitesse ultrasonique effectuées sur les différents types de béton sont présentés dans la figure 4.18. De plus, leurs valeurs relatives par rapport au BGN, ainsi que les écarts type (S) sont présentés dans le tableau 4.6.

Le BGN a présenté de bonnes performances, enregistrant une vitesse d'onde ultrasonique de 4380 m/s à 90 jours. Les valeurs de la vitesse d'onde ultrasonique du béton diminuent à mesure que le nombre de cycles augmente et en parallèle avec l'élévation du taux de substitution des GN par les GR. A 90 jours, les bétons formulés avec 50 % de GR ont enregistré des diminutions de 3 %, 7 % et 9 % des valeurs de la vitesse d'onde ultrasonique lors du premier, deuxième et troisième cycle, respectivement. En revanche, le remplacement total des GN par des GR a entraîné une réduction de 8 %, 13 % et 19 % pour le premier, le deuxième et le troisième cycle, respectivement.

La réduction observée est due à l'augmentation de la porosité du mortier attaché. À mesure que la quantité de mortier augmente avec le nombre de cycles, le nombre de pores dans le béton augmente également, impactant ainsi la transmission des ondes ultrasoniques.

Au terme de 90 jours, la vitesse d'onde ultrasonique du BGR3-100FS était inférieure de 10 % à celle du BGN et surpassait de 12 % celle du BGR3-100 (Figure 4.18).

En raison de leur surface spécifique élevée, les particules de la fumée de silice réagissent avec l'hydroxyde de calcium (CH) pour former une phase dense de silicate de calcium hydraté (CSH). Ce gel CSH remplit les pores, densifie la structure et renforce la liaison de la matrice du BGR3-100, conduisant ainsi à une augmentation de la vitesse d'onde ultrasonique [213].

En se basant sur les données fournies dans le tableau 4.6 et la figure 4.18, toutes les générations de béton peuvent être classées comme étant des bétons de bonne qualité.

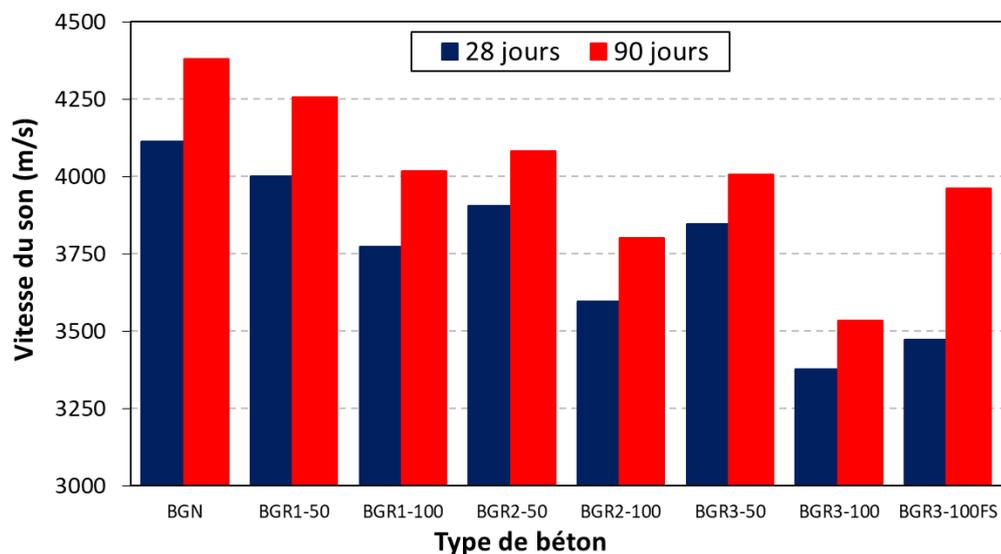


Figure 4.18. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques des bétons testés

Tableau 4.6. Valeurs relatives des vitesses de propagation des ondes des bétons testés.

Béton	28 jours		90 jours	
	VR	S	VR	S
BGN	1	0.9	1	0.8
BGR1-50	0.97	1.1	0.97	1.3
BGR1-100	0.92	0.4	0.92	0.5
BGR2-50	0.95	0.7	0.93	0.7
BGR2-100	0.87	1.4	0.87	1.1
BGR3-50	0.94	0.6	0.91	1.5
BGR3-100	0.82	0.3	0.81	0.9
BGR3-100FS	0.84	1.2	0.90	0.4

4.3.8.2. Module d'élasticité dynamique

La figure 4.19 présente les valeurs du module d'élasticité dynamique pour les différentes générations de bétons testés.

Le module d'élasticité dynamique a suivi une tendance similaire à celle du module d'élasticité statique, qui diminue à mesure que le taux de GR augmente à chaque cycle. A l'âge de 28 jours, la valeur du module d'élasticité dynamique du BGN a atteint 29 GPa, surpassant de 18 % et 38 %, respectivement, celles des BGR3-50 et BGR3-100. Cependant, au bout de 90 jours, le module d'élasticité dynamique du BGN a atteint 33 GPa, dépassant celui des BGR3-50 et BGR3-100 de 24 % et 39 %, respectivement. Cette observation peut être attribuée à l'augmentation du mortier attaché à chaque cycle, car la pâte de ciment a un module d'élasticité inférieur à celui des GN. Par conséquent, les BGR affichent une rigidité moindre par rapport aux BGN.

Par ailleurs, à l'âge de 90 jours, la valeur de module d'élasticité dynamique du BGR3-100FS était inférieure de 25 % à celle du BGN et surpassait de 20 % celle du BGR3-100. Cette augmentation s'explique par l'effet pouzzolanique de la fumée de silice et sa capacité à remplir les vides de la matrice du BGR3-100. Cela réduit la porosité du béton et améliore ainsi son module d'élasticité dynamique.

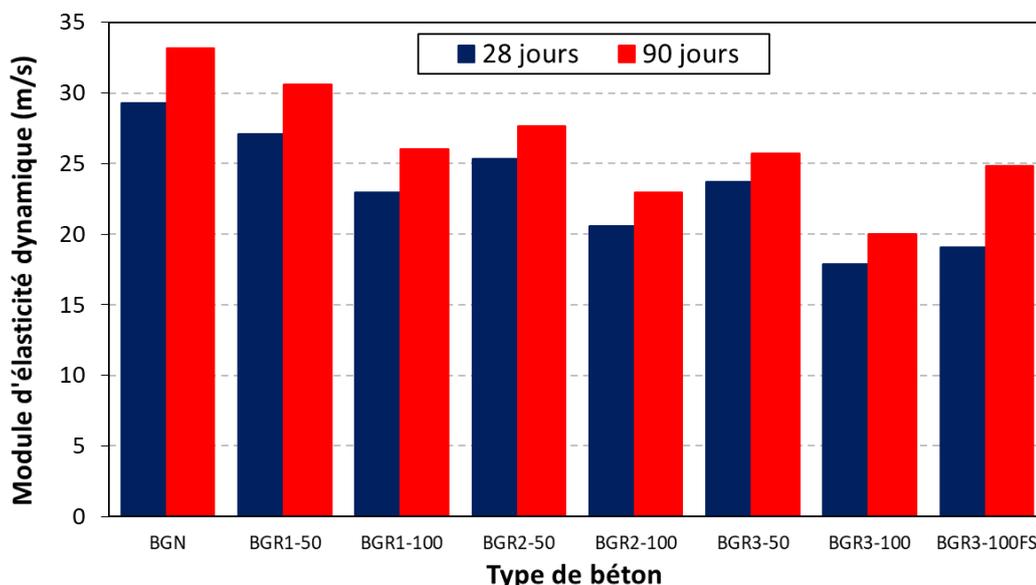


Figure 4.19. Module d'élasticité dynamique des bétons.

4.3.9. Retrait total

4.3.9.1. Effet de multi-recyclage sur le retrait total

La figure 4.20 illustre l'évolution du retrait total pour les différentes générations de béton sur une période de 180 jours. Les résultats indiquent que le retrait total augmente à la fois à court et à long terme avec l'augmentation du nombre de cycles et du taux de substitution des GR à chaque génération.

Pour une température de durcissement de 20 °C et un âge de 28 jours, des augmentations de 5 %, 35 %, 76 %, 50 %, 189 % et 237 % ont été observées dans le retrait total de BGR1-50, BGR2-50, BGR3-50, BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100 par rapport à celui de BGN, respectivement. À 40 °C, les augmentations étaient de 7 %, 24 %, 93 %, 53 %, 134 % et 146 %, respectivement. Tandis que pour les BGR soumis à une température de 60 °C, les augmentations étaient de 5%, 33%, 51 %, 38 %, 98 % et 116 %, respectivement.

Cette augmentation s'explique par la présence d'une quantité élevée de mortier attaché, qui retient un volume important d'eau dans les pores du GR et le libère de manière retardée [214]. De plus, l'ancien mortier génère une ITZ plus faible avec le nouveau, ce qui se traduit par une plus grande déformabilité du BGR. Par ailleurs, le processus de concassage a entraîné une diminution de la taille des GN dans les bétons de deuxième et troisième génération, ayant ainsi un impact significatif sur l'accroissement du retrait dans ces bétons. Des conclusions similaires ont été tirées par Leemann et al. [215], qui ont observé que le volume de pâte important conduit à un retrait plus élevé.

4.3.9.2. Effet de la fumée de silice sur le retrait total

Le BGR3-100FS présente le retrait total le plus important par rapport aux autres bétons. À l'âge de 28 jours et aux températures de cure de 20, 40 et 60 °C, la déformation de retrait total de BGR3-100FS a été augmentée respectivement de 3 %, 17 % et 21 % par rapport à BGR3-100 et de 249 %, 187 % et 161 % par rapport à la BGN (Figure 4.20). A 180 jours, cette augmentation a atteint 19 %, 20 %, 14 % par rapport à BGR3-100 et 94 %, 97 %, 91 % par rapport à BGN à 20, 40 et 60 °C, respectivement.

L'augmentation du retrait peut être attribuée à trois facteurs : l'auto dessiccation, le retrait autogène de la fumée de silice et l'absorption d'une quantité suffisante d'eau par la fumée de silice dans la microstructure compacte de la pâte de ciment [216]. De plus, l'efficacité de la fumée de silice, qui réagit avec la chaux, provoque une diminution du volume de la pâte de

ciment et une augmentation du retrait par déshydratation [81, 205, 217]. Al-Amoudi et al. [216] et Hooton [218] ont rapporté que le béton fabriqué avec du ciment produit avec la fumée de silice présente un retrait plus élevé que le béton témoin.

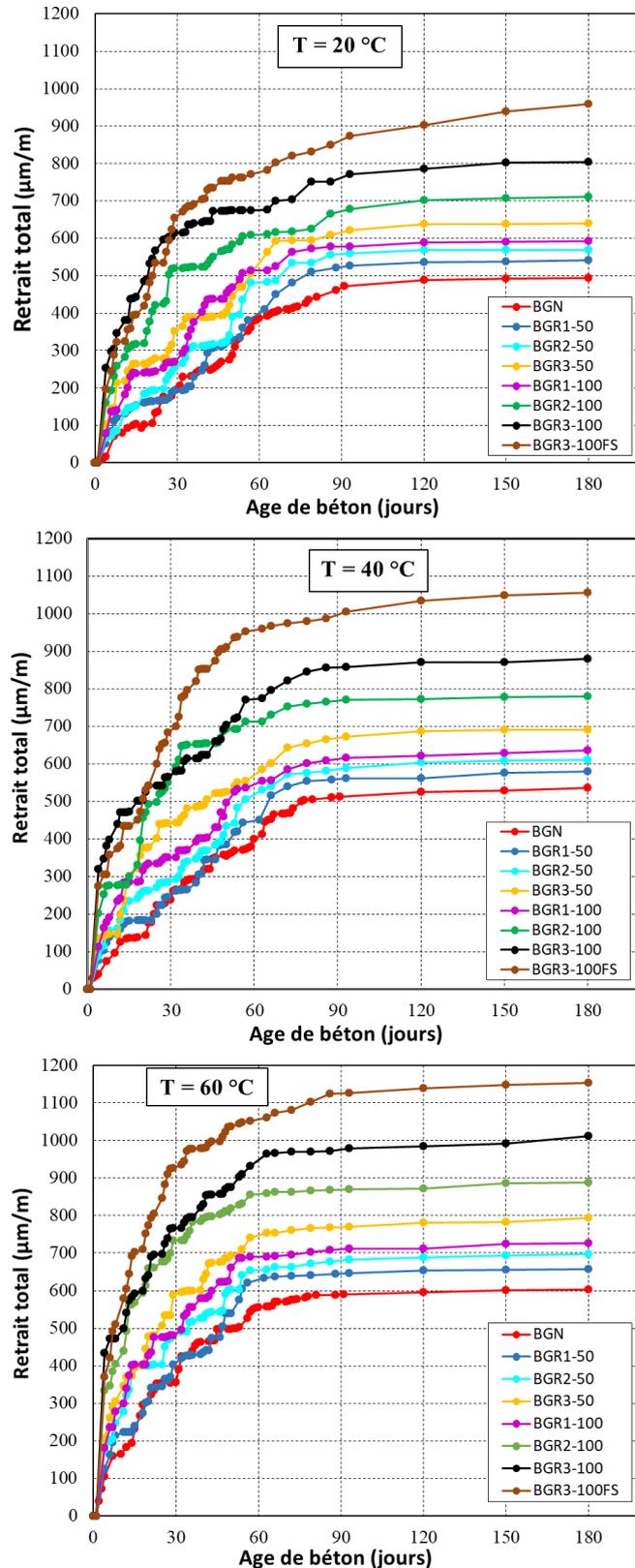


Figure 4.20. Effet de multi-recyclage sur le retrait total du béton

4.3.9.3. Effet de température de cure sur le retrait total

Le changement de température dans le béton entraîne une variation différentielle de volume. Il est bien connu que l'augmentation de la température de cure entraîne une évaporation rapide de l'eau dans le béton et accélère l'hydratation du ciment ; cela rend le béton vulnérable au retrait, ce qui entraîne des fissures.

La figure 4.21 montre que le retrait total des BGR des différentes générations augmente avec l'augmentation du temps et de la température de durcissement.

A 180 jours, la déformation de retrait enregistrée pour le BGN et le BGR3-100 à 40 °C était respectivement de 8 % et de 9 % supérieure à celle enregistrée à 20 °C. Par ailleurs, lorsque la température de durcissement atteint 60 °C, le retrait augmente de 22 %, 23 %, 25 % et 26 % pour le BGN, BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100, respectivement par rapport à 20 °C.

Il a été également observé qu'à des températures de 20 et 40 °C, le retrait total se stabilise au bout de trois mois, alors qu'il commence à se stabiliser au bout de deux mois à 60 °C.

Le retrait du béton est directement lié à la réaction du ciment [197]. L'hydratation du ciment Portland génère de la chaleur (i.e. processus exothermique). Une température plus élevée peut accélérer ce processus en augmentant la vitesse de réaction chimique du ciment. Par conséquent, les C-S-H sont plus denses, mais mal distribués, ce qui crée des pores et facilite l'évaporation de l'eau, conduisant à un retrait plus important [219].

Bouziadi et al. [220] et Lura et al. [219] ont rapporté qu'une augmentation de la température de durcissement entraîne une augmentation significative de la déformation du retrait total. Lahmar et al. [197] ont découvert que le BGR contenant 100 % de GR a enregistré une augmentation du retrait de 19 % et 36 % à 20 et 50 °C, respectivement, par rapport au BGN.

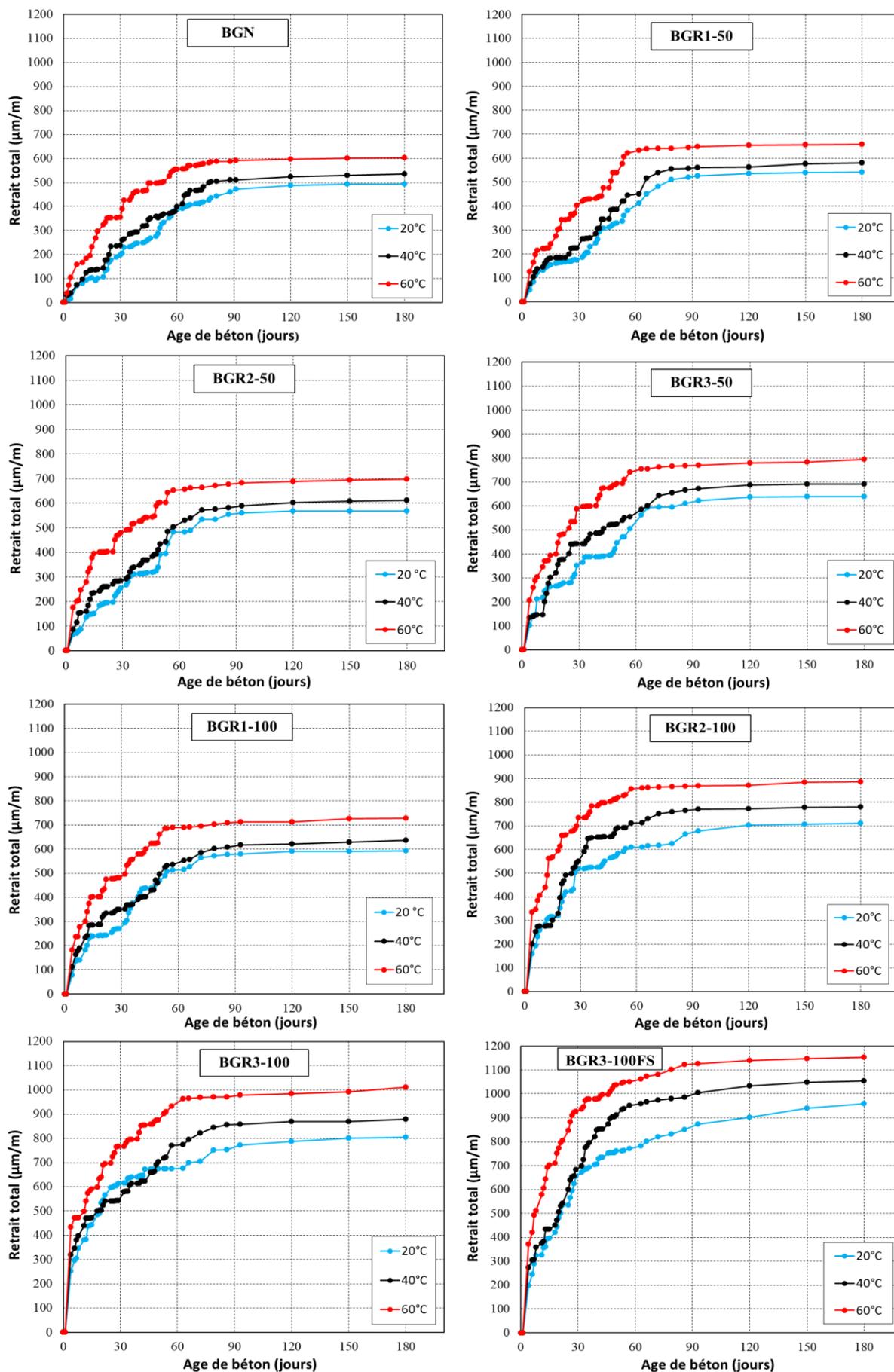


Figure 4.21. Effet de température de cure sur le retrait total.

4.3.10. Fluage en flexion

Il est rapporté que le fluage du béton provoque un raccourcissement des éléments structuraux. En cas d'asymétrie dans les valeurs de raccourcissement des poteaux, cela peut donner lieu à un raccourcissement différentiel [221, 222]. Cette situation peut provoquer un déplacement de la dalle soutenue par le poteau par rapport à sa position d'origine, engendrant une contrainte inattendue qui n'est pas prise en compte lors de la conception [221]. De plus, le fluage induit la relaxation ou la perte de précontrainte des câbles dans les structures en béton précontraint [223-225]. En outre, une déflexion excessive peut se produire en raison du fluage dans les structures en béton précontraint et en béton armé [223, 225-231]. Ces phénomènes finissent par provoquer des fissures dans le béton, ce qui affecte la sécurité des structures. Par conséquent, il est nécessaire de prédire avec précision les caractéristiques de fluage du béton multi-recyclé.

4.3.10.1. Comparaison entre le fluage en traction et en compression

La figure 4.22 décrit la progression du fluage en flexion au fil du temps pour les différentes générations de bétons testés sur une période de 360 jours.

D'après la même figure, il est possible de constater que toutes les générations de béton présentent un comportement de fluage similaire, qui se décompose en deux parties distinctes.

Un jour après l'application de la charge, on constate une déformation différée significative, suivie d'une décélération progressive quelques jours plus tard. Ces deux phases d'évolution engendrent deux types distincts de déformations par fluage : le fluage à court terme et le fluage à long terme.

Selon Pons et Torrenti [190], le fluage à court terme semble une conséquence d'un mécanisme de redistribution par diffusion de l'eau libre et adsorbée dans les espaces capillaires. En revanche, le fluage à long terme semble être lié à un mécanisme inhérent à la structure des hydrates.

Selon la même figure, on remarque que la cinétique de fluage en traction évolue de manière plus rapide que celle du fluage total en compression. Les valeurs maximales de fluage en traction sont également supérieures à celles du fluage en compression. En effet, le fluage en traction dépasse le fluage en compression de 29 %, 20 %, 32 %, 31 %, 27 %, 30 %, 34 % et 32 % pour les BGN, BGR1-50, BGR1-100, BGR2-50, BRG2-100, BGR3-50, BGR3-100 et BGR-100FS, respectivement. Cela peut être expliqué par la faible rigidité de la zone tendue par rapport à la zone comprimée (le module d'élasticité du béton en compression étant

plus élevé que celui en traction). En conséquence, la capacité portante augmente en raison de la résistance à la compression élevée du matériau. Ainsi, la compression de la fibre extrême permet d'atténuer les contraintes induites, conduisant à une déformation totale du fluage en compression réduite [232].

Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Bouziadi et al. [232], qui ont démontré que le fluage en traction surpassait celui en compression de 20 à 35 %.

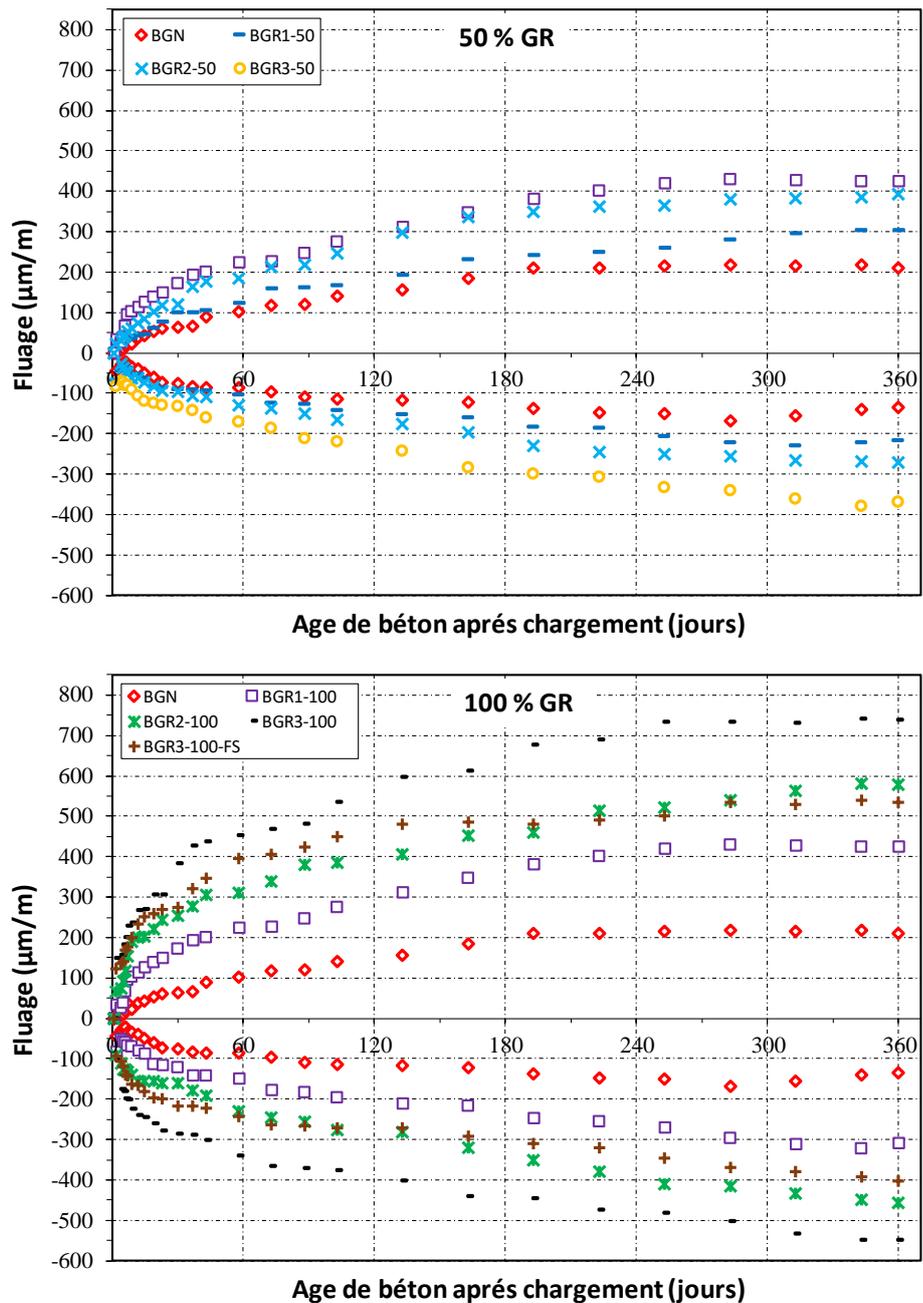


Figure 4.22. Effet du multi-recyclage sur le fluage en flexion du béton.

4.3.10.2. Effet de multi-recyclage sur le fluage

Les résultats montrent qu'à tous les âges, les bétons formulés avec des GR ont montré une déformation de fluage supérieure à celle du BGN (Figure 4.22), ceci s'explique par la présence de mortier attaché dans les BGR. Par ailleurs, on observe que l'augmentation du nombre de cycles entraîne une augmentation des déformations de fluage des différents mélanges.

A l'âge de 360 jours, une augmentation de 62 %, 100 %, 174 %, 128 %, 239 %, et 308 % a été observée dans la déformation de fluage en compression de BGR1-50, BGR2-50, BGR3-50, BGR1-100, BGR2-100, et BGR3-100 par rapport à celle de BGN, respectivement. Parallèlement, la déformation de fluage en traction des mêmes bétons a augmenté respectivement de 45 %, 86 %, 135 %, 101 %, 175 %, et 251 %.

Le phénomène du fluage peut être expliqué de manière simple par la perte d'eau de la pâte de ciment sous l'effet des charges appliquées. Etant donné que le fluage se produit dans la pâte de ciment, les bétons ayant une teneur volumétrique plus élevée en GN présentent des déformations dues au fluage moins importantes [233]. Lorsque le nombre de cycles augmente, le volume réel des GN est réduit et le volume de mortier augmente, comme illustré dans la figure 4.4. Cela implique un rapport granulats/pâte-ciment plus faible dans les BGR que dans les BGN. De plus, en raison du module d'élasticité inférieur des BGR par rapport à celui du BGN et de la porosité accrue du BGR, le fluage du BGR augmente.

Les résultats concordent avec l'étude menée par Sri Ravindrarajah et Tam [171], qui ont trouvé que le fluage du BGR était de 30 à 60 % supérieur à celui du BGN. Ce phénomène est dû au volume de pâte plus élevé du BGR par rapport au BGN, car le fluage du béton est proportionnel à la quantité de la pâte ou de mortier dans le béton. De plus, Domingo-Cabo et al. [165] ont constaté que le fluage du BGR avec 20 % de GR est supérieur de 25 % à celui du BGN. Dans le BGR avec un niveau de substitution de 50 %, la déformation de fluage était de 29 % plus élevée et pour le BGR avec un niveau de substitution de 100 %, l'augmentation de la déformation de fluage était de 32 %.

4.3.10.3. Effet de la fumée de silice sur le fluage

La figure 4.22 montre que la déformation due au fluage du BGR3-100FS est plus faible que celle du BGR3-100. Au terme de 360 jours, l'introduction de la fumée de silice dans le béton du troisième cycle a entraîné une réduction de 28 % du fluage en compression et de 25 % du fluage en traction.

Cette diminution est expliquée par la résistance accrue et par la microstructure plus dense du BGR3-100FS par rapport au BGR3-100, ce qui empêche les déplacements d'eau à l'intérieur du béton [234, 235]. De plus, l'ajout de la fumée de silice augmente la concentration des hydrates (C-S-H) ainsi que la densité de la pâte de ciment durcie dans le BGR3-100FS (figure 4.7), conférant ainsi au béton une capacité de résistance à la déformation accrue sous l'effet des contraintes appliquées.

Mazloom et al. [236] ont constaté que l'utilisation de 15 % de fumée de silice dans le béton a entraîné une diminution de 20 à 30 % de la déformation de fluage.

4.3.10.4. Evolution de la flèche

La figure 4.23 présente une illustration graphique de la cinétique de la flèche à mi-travée des poutres isostatiques en fonction du temps pour les bétons testés.

La figure 4.23 met en évidence une augmentation des déformations instantanées des bétons avec l'augmentation du nombre de cycles. La déformation instantanée minimale a été enregistrée par le BGN (0.85 mm). Les BGR avec une proportion de 50 % de GR ont enregistré des déformations instantanées de 0.95 mm, 1.01 mm et 1.35 mm pour le premier, deuxième et troisième cycle, respectivement. En revanche, les BGR1-100, le BGR2-100, le BGR3-100 et le BGR3-100-FS ont présenté des déformations instantanées de 1.19 mm, 1.31 mm, 1.52 mm, et 1.4 mm, respectivement.

L'analyse des variations des comportements des flèches peut être effectuée en distinguant deux phases :

- Une première phase qui s'étend de 0 à 45 jours, caractérisée par un comportement viscoélastique où la flèche se développe rapidement. On observe une influence notable du multi-recyclage et de la fumée de silice sur les valeurs de la flèche. Durant cette période, le pic de la flèche a atteint 1.94 mm pour le BGN et 4.33 mm pour le BGR3-100. L'ajout de la fumée de silice dans le BGR3-100 a entraîné une réduction de 6 % de la flèche.
- Une seconde phase qui s'étend de 45 jours à 360 jours et correspond à un domaine viscoplastique. Au cours de cette période, on observe un développement retardé de la cinétique de la flèche par rapport à la première phase jusqu'à la stabilisation. Cette observation s'explique par l'augmentation des fissurations et la redistribution des contraintes causées par le fluage [237].

A 360 jours, les valeurs des flèches de BGN, BGR1-50, BGR2-50, BGR3-50, BGR1-100, BGR2-100, et BGR3-100 atteignent 2.45 mm, 3.2 mm, 3.75 mm, 5.62 mm, 4.64 mm, 6.62 mm, et 8.42 mm, respectivement. L'augmentation de la flèche avec le nombre de cycles peut être imputée à la porosité élevée et à la faible rigidité des BGR, résultant de l'augmentation de la quantité de mortier attaché à chaque cycle. A un stade similaire, l'ajout de fumée de silice dans le BGR3-100 se traduit par une réduction d'environ 27 % de la flèche. On constate aussi que l'impact de la fumée de silice sur la flèche est plus significatif à long terme qu'à court terme. Cela peut être lié à la progression de la réaction pouzzolanique au fil du temps. Cette réaction favorise la formation de produits d'hydratation supplémentaires, renforçant ainsi la matrice cimentaire et améliorant la rigidité du béton à long terme.

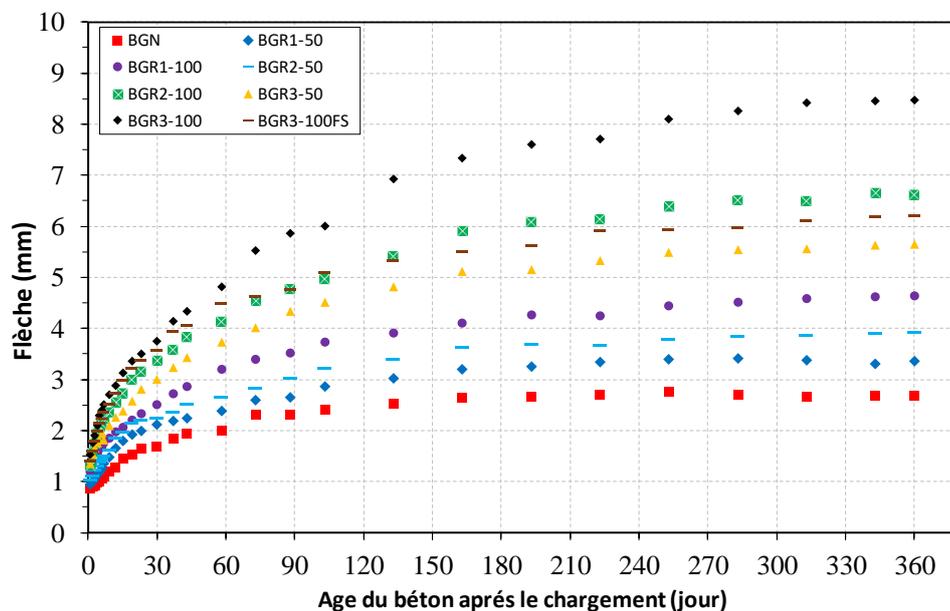


Figure 4.23. Evolution de la flèche différée des bétons testés.

4.3.10.5. Vitesse de fluage

La figure 4.24 présente l'évolution des vitesses de fluage des différentes générations de béton en fonction du temps de chargement. Il est remarqué que cette dernière diminue pour tous les types de béton au fil du temps.

Au cours des huit premiers mois qui suivent le chargement, on constate une augmentation de la vitesse de fluage en fonction du nombre de cycles et du taux de GR. Après cette période, toutes les vitesses de déformation des bétons deviennent pratiquement identiques. Ceci nous

laisse penser que les granulats multi-recyclés jouent un rôle important dans le processus de déformation due au fluage, pendant les premiers mois qui suivent le chargement.

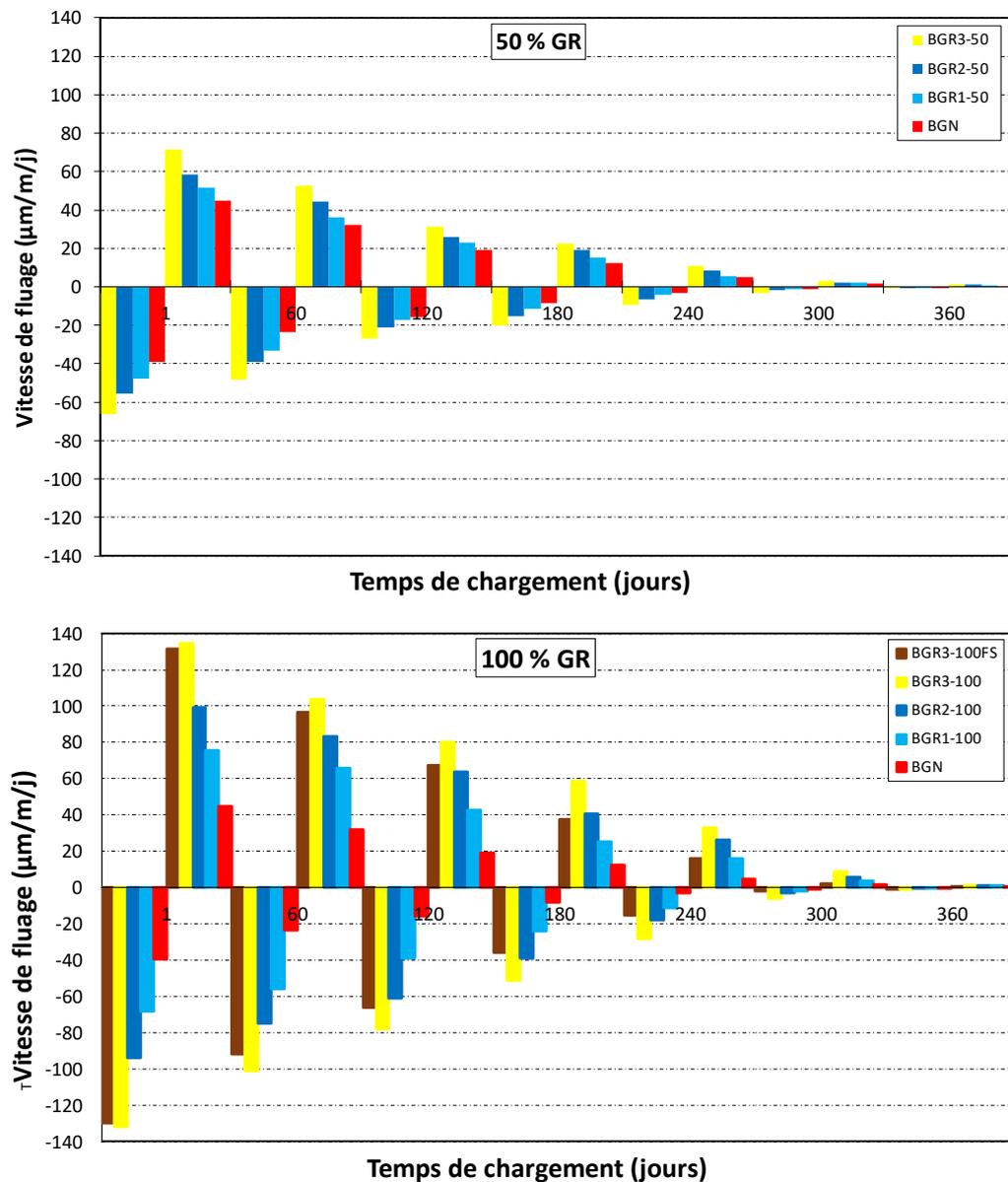


Figure 4.24. Vitesse de fluage.

Il est essentiel de connaître les coefficients de fluage des bétons, car ils jouent un rôle crucial dans l'estimation des déformations étendues dans les structures. En comparant les déformations totales causées par le fluage aux déformations élastiques engendrées par la charge appliquée, il est possible de calculer ces coefficients présentés dans la figure 4.25 selon la formule suivante [238] :

$$\Phi_e = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_e}{\varepsilon_e} \quad (4.4)$$

Où ϵ_f est la déformation de fluage finale (après un an de chargement) et ϵ_e est la déformation élastique engendrée par la charge appliquée (ne dépasse pas 24 heures après le chargement).

En se basant sur les observations de la figure 4.24, on peut proposer une explication concernant la différence constatée dans les vitesses de fluage des bétons : lors de la charge, l'augmentation de la quantité de mortier attachée, la faible adhérence entre les feuilles de C-S-H, et la diminution de la taille des GN avec l'augmentation du nombre de cycles (voir figure 4.4) peuvent accroître la vitesse de fluage de béton multi-recyclé. Ceci entraîne une hausse des coefficients de fluage avec l'augmentation du nombre de cycles (figure 4.25).

En se basant sur la même illustration, il est noté que la vitesse de fluage du BGR3-100FS est inférieure à celle du BGR3-100, et cette différence s'accroît davantage avec le temps. En effet, le processus de réaction pouzzolanique de la fumée de silice peut renforcer la prise du béton au fil du temps et améliorer ses propriétés mécaniques. Par conséquent, l'adhérence entre les produits de l'hydratation du ciment (C-S-H) s'accroît. Cette augmentation de l'adhérence pourrait réduire la déformation de la matrice, ce qui expliquerait en grande partie le faible coefficient de fluage du BGR3-100-FS par rapport au BGR3-100.

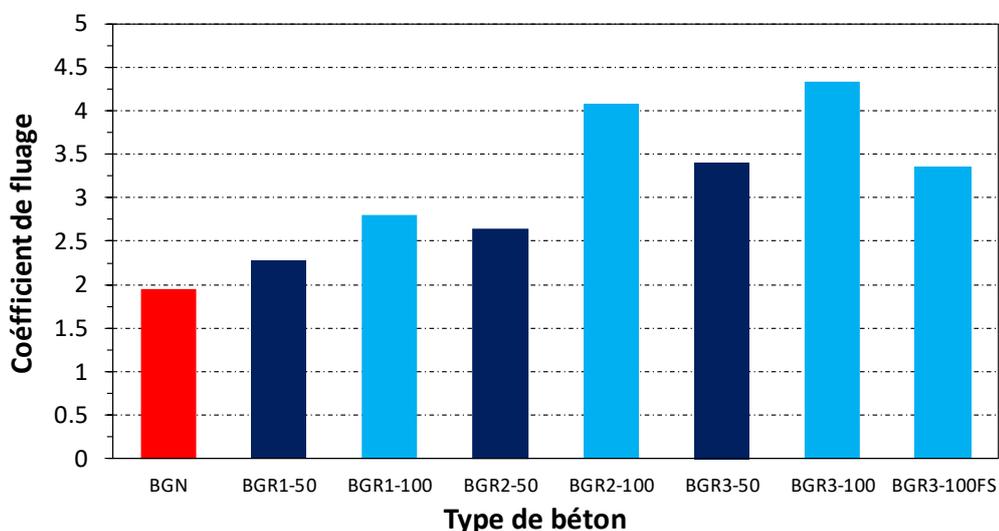


Figure 4.25. Coefficients de fluage des bétons testés.

4.3.10.6. Estimation du coefficient de fluage on fonction de la résistance à la compression

La figure 4.26 présente la relation entre les valeurs expérimentales du coefficient de fluage Φ_E et les valeurs numériques Φ_N obtenues par une extrapolation des valeurs expérimentales de fluage, en fonction de la résistance à la compression du béton à la date de chargement (28 jours) comme exprimé dans l'équation (4.2) proposée par Loukili [239].

$$\Phi_N = a \exp\left(\frac{b}{\sqrt{f_{c_{28}}}}\right) \quad (4.5)$$

Où : a et b sont des coefficients déterminés par le processus de minimisation. L'exploitation de toutes les courbes expérimentales de fluage nous a conduit à fixer les valeurs a et b à 0.2 et 16.9, respectivement.

On constate que le modèle numérique proposé basé sur deux paramètres, traduit assez fidèlement les valeurs du coefficient de fluage expérimentales avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.8951$ et une l'erreur intégrale absolue IAE = 5.59 %.

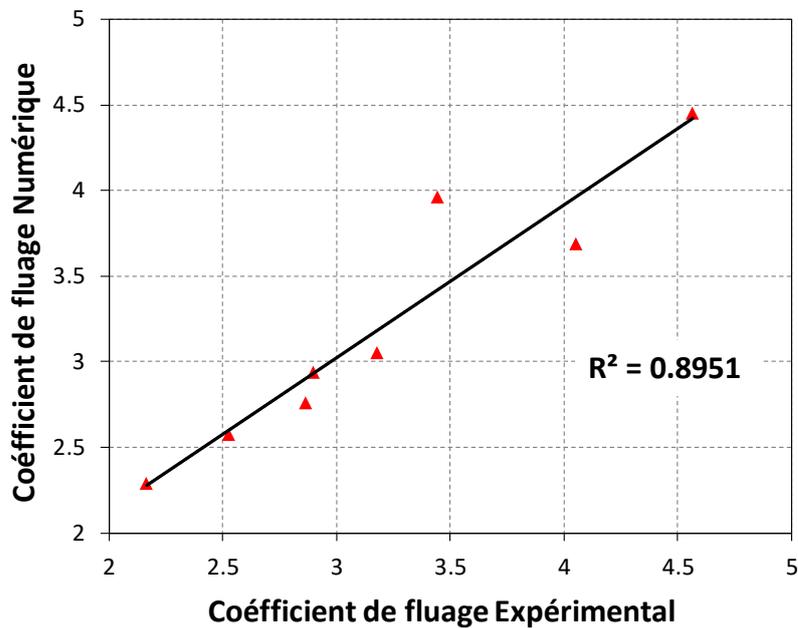


Figure 4.26. Relation entre le coefficient de fluage expérimentale et numérique.

Chapitre 5 :
Etude numérique et
analytique du retrait

Chapitre 5 : Etude numérique et analytique du retrait

5.1. Etude numérique du retrait

5.1.1 Introduction

L'estimation numérique du retrait est une étape importante dans la conception et la construction de structures en béton. Notamment, plusieurs modèles numériques ont été créés pour prédire la déformation du retrait, tels que l'Eurocode [240], le modèle CEB-FIP [204] et le modèle JSCE [241]. Lahmar et al. [197] ont analysé le retrait du BGR (1 cycle de recyclage) à trois températures de durcissement à l'aide du logiciel ANSYS [242]. Les résultats obtenus montrent un accord étroit avec les observations expérimentales. Cependant, à notre connaissance, aucune recherche n'a été rapportée sur la prédiction du retrait du béton multi-recyclé soumis à différentes températures par analyse numérique.

A propos de cette section d'investigation, la théorie des matériaux composites est utilisée pour prédire le retrait total et calculer la conductivité thermique et la chaleur spécifique pour le BGR. Ensuite, l'équation mathématique de la méthode de maturité et les caractéristiques thermiques transitoires du béton multi-recyclé sont analysées par la méthode des éléments finis avec le logiciel ANSYS, basée sur un modèle en série biphasé. Grâce à cette analyse numérique, il devient possible de prédire le retrait sous l'effet d'une charge thermique.

5.1.2. Méthode de maturité

La méthode de maturité est une technique permettant d'évaluer et de prédire en temps réel les propriétés mécaniques du béton, en commençant par surveiller sa température pendant le processus de durcissement [243]. L'objectif principal de cette section est d'estimer les propriétés mécaniques du béton multi-recyclé soumis à deux températures de durcissement (40 et 60 °C) en utilisant la méthode de maturité.

5.1.2.1. Calcul de demi-âge

L'équation (5.1) est utilisée pour exprimer le demi-âge, qui correspond à l'âge auquel la déformation du retrait atteint la moitié de sa valeur ultime [243].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_u \frac{(t-t_0)}{(t-t_0) + t_{50}} \quad (5.1)$$

Où $\varepsilon(t)$ représente le retrait au temps t , ε_u est la valeur maximale de retrait, t_0 est l'âge auquel le retrait devrait commencer, et t_{50} est le demi-âge de la déformation.

Les demi-âges des différents bétons testés sont présentés dans le tableau 5.1. Il convient de noter que ces valeurs diminuent à mesure que la température de durcissement augmente. Ces observations concordent parfaitement avec les données de la littérature existante [244].

5.1.2.2. Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation du ciment $\alpha(t)$ est le rapport entre la déformation $\varepsilon(t)$ à un âge donné et la déformation maximale ε_u [244] :

$$\alpha(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_u} \quad (5.2)$$

5.1.2.3. Energie d'activation apparente

L'énergie d'activation d'un béton est un indicateur de sa sensibilité à la température. Il est évident que, pour deux températures T_1 et T_2 (en Kelvins), le même degré d'hydratation doit être atteint aux instants t_1 et t_2 [244]. Par conséquent, il est recommandé de prédire l'énergie d'activation apparente E_a en utilisant la fonction exponentielle suivante [243, 245] :

$$\frac{t_2}{t_1} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (5.3)$$

Où R représente la constante universelle des gaz ($R = 8.314 \text{ J/mol.K}$).

Le tableau 5.1 présente l'énergie d'activation moyenne de chaque béton à trois températures de cure (20, 40 et 60 °C). Les énergies d'activation moyennes de BGN, BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100 étaient respectivement de 16.0, 14.5, 7.5 et 4.7 kJ/mol.

Les BGR de différentes générations consomment moins d'énergie que le BGN, en raison de la grande quantité de mortier attaché. Ces résultats concordent avec les conclusions d'Alexander et al. [246], qui ont révélé que les valeurs d'énergie d'activation du BGR sont inférieures à celles du BGN.

Tableau 5.1. Demi- âge (t_{50}) et énergie d'activation (E_a) pour les différentes températures de durcissement des bétons testés.

Béton	t_{50} (jours)			E_a (KJ/mol)
	20 °C	40 °C	60 °C	
BGN	40.0	32.5	18.5	16.0
BGR1-50	37.5	32.1	17.6	15.8
BGR2-50	32.2	27.2	15.4	15.4
BGR3-50	26.1	17.3	14.1	12.3
BGR1-100	30.6	20.2	14.9	14.5
BGR2-100	17.3	16.3	12.1	7.5
BGR3-100	11.4	11.0	9.1	4.7
BGR3-100-FS	19.9	20.9	10.9	12.7

5.1.2.4. Age équivalent

La méthode de l'âge équivalent permet aux chercheurs d'estimer le retrait de différents bétons à des températures (40 et 60 °C), à partir d'une température de référence de 20 °C. Elle peut être formulée comme suit [244, 247] :

$$t_e = t \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (5.4)$$

Où t_e représente l'âge équivalent, T est la température de durcissement et T_r est la température de référence. Les résultats de l'âge équivalent par rapport au retrait total des différents bétons sont illustrés dans la figure 5.1.

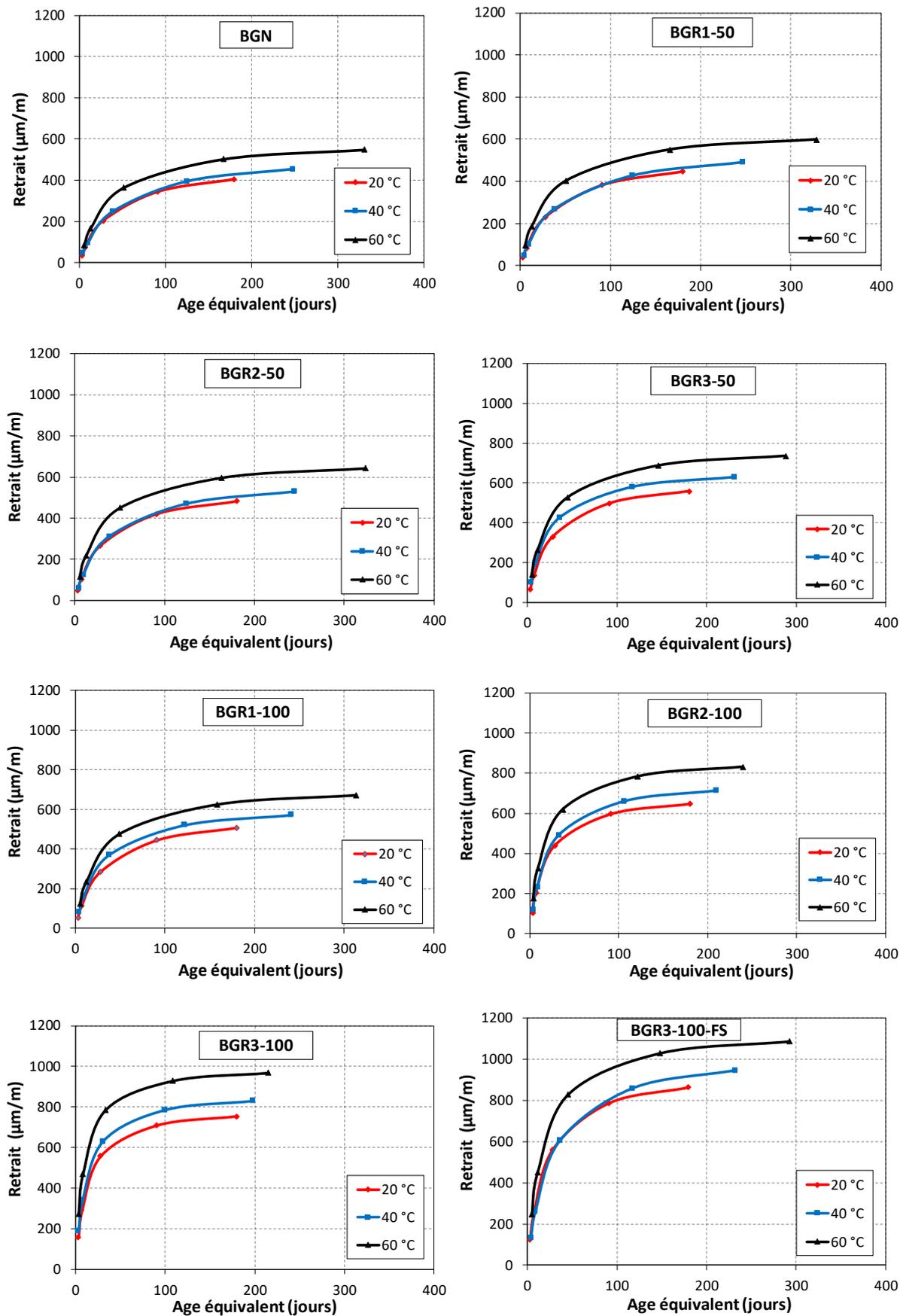


Figure 5.1. Retrait des bétons testés en fonction de T et de t_{eq} .

5.2.3. Caractéristiques thermiques du béton

Les équations (5.5) et (5.6) sont utilisées pour exprimer la capacité thermique spécifique $c(\alpha)$ et la conductivité thermique $k(\alpha)$ du mortier de ciment au degré d'hydratation α [248] :

$$c(\alpha) = c_0 (1.15 - 0.15 \alpha) \quad (5.5)$$

$$k(\alpha) = k_0 (1.1 - 0.10 \alpha) \quad (5.6)$$

Où c_0 est la capacité thermique spécifique du mortier de ciment ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) et k_0 est sa conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Dans cette étude, les valeurs de c_0 et k_0 sont prises comme étant égales respectivement à $900 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ et $2,7 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

La capacité thermique spécifique C_c et la conductivité thermique K_c du béton sont calculées en se basant sur le modèle biphasé en série [249] :

$$c_c = \frac{1}{\frac{V_m}{c(\alpha)} + \frac{V_g}{c_g}} \quad (5.7)$$

$$k_c = \frac{1}{\frac{V_m}{k(\alpha)} + \frac{V_g}{k_g}} \quad (5.8)$$

Où C_g , k_g et V_g représentent respectivement la capacité thermique spécifique, la conductivité thermique et le volume des granulats grossiers, et V_m est le volume du mortier de ciment.

La conductivité thermique du granulat grossier k_g est calculée à l'aide de l'équation (5.9) [250] :

$$k_g = 0.293 + 1.01 V_g \quad (5.9)$$

Le coefficient de dilatation thermique du béton, noté $\alpha_c(t)$ au temps t , est défini comme [251]:

$$\alpha_c(t) = \alpha_k (1 + 41 t^{-2}) \quad (5.10)$$

Où α_k représente le coefficient de dilatation thermique du béton à 28 jours ($^\circ\text{C}^{-1}$) [252] :

$$\alpha_k = (0.008 T^c + 6) 10^{-6} \quad (5.11)$$

5.1.4. Propriétés mécaniques des bétons

Les propriétés mécaniques des bétons à l'âge équivalent t_e (jours) sont évaluées comme suit :

- La résistance à la traction est estimée en utilisant le code modèle MC2010 [204]:

$$f_t(t_e) = f_{t28} \left\{ \exp \left[0.25 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - 1}} \right) \right] \right\}^{0.11} \quad (5.12)$$

Où f_{t28} représente la résistance à la traction du béton en MPa à 28 jours à 20 °C.

- La résistance à la compression $f_c(t_e)$ est évaluée à l'aide de l'équation (5.13) [232]:

$$f_t(t_e) = 0.395 (f_c(t_e))^{0.55} \quad (5.13)$$

- Le module de Young (en MPa) est calculé à l'aide de l'équation (5.14) [204] :

$$E_t(t_e) = E_{t28} \times \left\{ \exp \left[0.25 \times \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - 1}} \right) \right] \right\}^{0.11} \quad (5.14)$$

Où E_{t28} représente la valeur expérimentale du module de Young du béton (en MPa) à 28 jours à 20 °C.

5.1.5. Retrait numérique

Le retrait numérique $\varepsilon_{num}(t)$ est estimé à l'aide de l'équation (5.15) [220]:

$$\varepsilon_{num}(t) = (T(t) - T_{temps-zéro})\alpha_c(t) \quad (5.15)$$

Où $T(t)$ représente la température du béton (en °C) à un instant t et $T_{temps-zéro}$ est la température initiale du béton (en °C).

5.1.6. Analyse par éléments finis

Pour estimer le retrait numérique, l'élément SOLID70 est utilisé dans le logiciel ANSYS® [197, 220]. Les caractéristiques thermomécaniques utilisées dans l'analyse numérique sont présentées dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2. Caractéristiques thermiques et mécaniques des bétons pour le modèle MEF.

	Paramètres	Equation		BGN	BGR1-50	BGR1-100	BGR2-50	BGR2-100	BGR3-50	BGR3-100	BGR3-100-FS
Caractéristiques thermiques	Densité (kg/m ³)		ρ	2341	2290	2192	2255	2164	2180	2144	2122
	Coefficient de dilatation thermique	Eq.s (10) (11)	α_c α_k	Variable avec le temps et les températures de cure							
Caractéristiques mécaniques	$f_t(t_e)$	Eq. (12)	f_{t28}	5.30	4.93	4.48	4.72	3.9	4.41	2.5	3.01
	$f_c(t_e)$	Eq. (13)	$f_i(t_e)$	Calculer en fonction de $f_i(t_e)$							
	$E_t(t_e)$	Eq. (14)	E_{t28}	24.34	19.84	17.4	19.35	15.5	18.06	11.53	12.85

5.1.7. Validation du modèle des éléments finis

Une comparaison du retrait total du béton à différentes températures de cure entre les approches expérimentale et numérique est présentée dans la figure 5.2. Il est à noter que la valeur du coefficient de détermination R^2 varie entre 0.964 et 0.978, démontrant que le retrait total suit une relation linéaire avec l'augmentation du nombre de cycles et la variation du pourcentage de GR dans le béton soumis à différentes températures de cure.

La comparaison entre les données expérimentales et numériques montre que le modèle des éléments finis, utilisant la méthode de maturation et le modèle en série à deux phases implémenté dans le logiciel ANSYS, peut fournir une prédiction précise du retrait total du béton multi-recyclé.

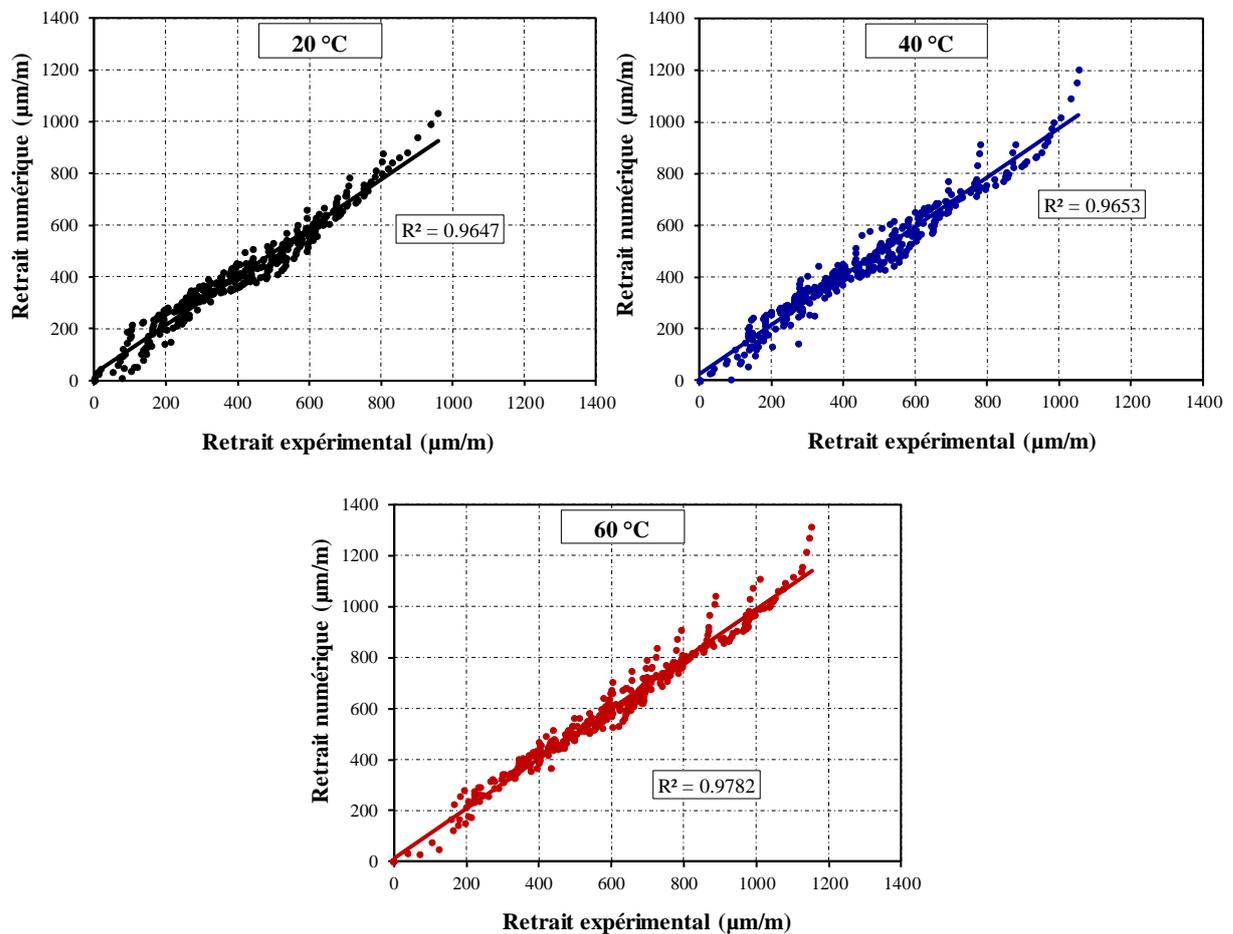


Figure 5.2. Comparaison des valeurs expérimentales et numériques du retrait total.

La précision de l'analyse numérique en utilisant simultanément la méthode de maturité et le modèle en série à deux phases peut également être confirmée en effectuant une analyse du pourcentage d'erreur résiduelle.

Le tableau 5.3 présente les erreurs résiduelles pour les différents types de bétons testés. En général, les valeurs d'erreur résiduelle calculées sont acceptables. Il convient de noter que l'utilisation du modèle en série à deux phases et de la méthode de maturité pour trois cycles de recyclage et pour des pourcentages de GR allant de 0 à 100 % et des températures de cure entre 20 et 60 °C donne des résultats très proches des valeurs expérimentales.

Tableau 5.3. Erreurs résiduelles des valeurs numériques du retrait total des bétons.

Age	BGN	BGR1-50	BGR2-50	BGR3-50	BGR1-100	BGR2-100	BGR3-100	BGR3-100- FS
20 °C								
3 jours	-3.89	2.18	-8.90	-7.54	0.65	3.98	4.09	6.09
7 jours	-2.98	-3.98	2.09	4.98	1.45	-6.87	-3.23	3.87
1 mois	3.23	-3.25	-4.98	3.32	-3.33	-2.23	-4.34	-2.30
3 mois	-3.98	-1.98	3.04	4.74	9.87	4.73	5.93	-1.99
6 mois	1.56	3.55	2.07	5.93	7.58	-4.11	-3.04	-3.25
40 °C								
3 jours	-4.04	2.03	-9.05	-7.69	0.5	3.83	3.94	5.94
7 jours	-2.53	-3.53	2.54	5.43	1.9	-6.42	-2.78	4.32
1 mois	4.79	-1.69	-3.42	4.88	-1.77	-0.67	-2.78	-0.74
3 mois	-6.87	-4.87	0.15	1.85	6.98	1.84	3.04	-4.88
6 mois	-1.31	0.68	-0.8	3.06	4.71	-6.98	-5.91	-6.12
60 °C								
3 jours	-5.78	0.29	-10.79	-9.43	-1.24	2.09	2.2	4.2
7 jours	-4.43	-5.43	0.64	3.53	0	-8.32	-4.68	2.42
1 mois	5.79	-0.69	-2.42	5.88	-0.77	0.33	-1.78	0.26
3 mois	-5.87	-3.87	1.15	2.85	7.98	2.84	4.04	-3.88
6 mois	-0.31	1.68	0.2	4.06	5.71	-5.98	-4.91	-5.12

5.2. Etude analytique du retrait

5.2.1. Introduction

Des modèles de prédiction précis et fiables des déformations dues au retrait sont nécessaires pour faciliter la conception des éléments structuraux en phase de service. Amadio et Fragiaco [253] ont affirmé qu'une évaluation correcte des effets du temps de retrait sur les contraintes et les flèches est très importante afin de vérifier l'état limite de service. Ils ont montré également que les modèles de prédiction du comportement du retrait sont très complexes à adopter et que la solution exacte ne peut être déterminée que pour des schémas de structure très simples. Bazant et Baweja [254] ont déclaré que la prédiction précise du retrait du béton est difficile, car ce phénomène implique plusieurs mécanismes physiques interactifs et est influencé par de nombreux facteurs.

Différents modèles analytiques ont été développés pour prédire les déformations de retrait dans le béton, et certains d'entre eux sont adoptés par divers codes et suggérés par d'éminents chercheurs. Dans cette section, les résultats des déformations de retrait obtenus par des modèles de prédiction théoriques sont comparés aux déformations de retrait obtenues lors des essais expérimentaux à une température ambiante de 20 °C.

5.2.2. Modèles de prédiction utilisés

Dans cette partie, une série de comparaison est effectuée entre les déformations de retrait obtenues expérimentalement à la température ambiante de 20 °C et celles calculées en utilisant des modèles existants de prévision du retrait (CEB-FIP MC90, Eurocode 2, GL2000 et B3). L'objectif est de déterminer si ces modèles sont capables de prédire le comportement de retrait du béton multi-recyclé ou s'ils nécessitent des ajustements en cas d'utilisation de granulats multi-recyclés.

Tous les modèles permettant de prédire la déformation de retrait en fonction du temps reposent sur le principe suivant : une courbe hyperbolique qui tend vers une valeur asymptotique représentant la valeur de retrait ultime du béton. La forme de cette courbe et la valeur finale dépendent de plusieurs facteurs, lesquels sont présentés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4. Paramètres requis dans les modèles de prédiction.

	CEB-FIP MC90	Eurocode2	GL2000	B3
Facteurs intrinsèques				
Résistance à la compression à 28 jours f_{c28} (MPa)	✓		✓	✓
Résistance à la compression caractéristique f_{ck}		✓		
Rapport granulats/ciment (G/C)				✓
Rapport eau/ciment (E/C)			✓	✓
Dosage de ciment (kg/m ³)				✓
Type de ciment	✓		✓	
Type d'ajouts		✓		
Facteurs extrinsèques				
Forme de l'élément	✓		✓	✓
Taille de l'élément h (mm)	✓	✓	✓	✓
Humidité relative RH (%)	✓	✓	✓	✓
Température (°C)	✓			
Temps de début de l'essai t_s (jour)	✓	✓	✓	✓

5.2.2.1. Modèle CEB-FIP MC90

La prédiction des déformations de retrait à l'aide du modèle CEB-FIP MC90 [204] est limitée au béton structural ayant une résistance moyenne à la compression variant de 12 à 80 MPa, une humidité relative moyenne de 40 % à 100 % et une température moyenne de 5 à 30 °C.

La déformation de retrait \mathcal{E}_{cs} dans un temps t dans un élément en béton exposé à partir d'un temps t_s à un environnement d'humidité relative RH est calculée à partir de l'équation suivante :

$$(\mathcal{E}_{cs}t, t_s) = \mathcal{E}_{cs0} \times \beta_s(t, t_s) \quad (5.16)$$

Avec :

$$\mathcal{E}_{cs0} = [160 + 10\beta_{sc}(9 - 0.1f_{c28})]\beta_{RH} \quad (5.17)$$

$$\beta_s(t, t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)}{350\left(\frac{2A_c}{100\mu}\right) + (t-t_s)}} \quad (5.18)$$

\mathcal{E}_{cs} : coefficient de retrait théorique, β_s : coefficient décrivant l'évolution du retrait dans le temps, β_{sc} : constante dépendant du type de ciment ($\beta_{sc} = 6$), f_{c28} : résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours (MPa), β_{RH} : constante dépendant de la valeur de l'humidité relative, RH : humidité relative (%), A_c : surface de la section transversale de l'éprouvette (mm^2), μ : périmètre de la section transversale en contact avec l'atmosphère (mm).

5.2.2.2. Modèle Eurocode 2

Le modèle de l'Eurocode 2 (EC2) [240] est basé sur celui de l'AFREM (Association Française pour la Recherche et l'Etude des Matériaux et des Structures), conçu à partir d'essais effectués sur des BHP élaborés en France [255]. L'évolution de la déformation de retrait $\mathcal{E}_{cd}(t)$ est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$\mathcal{E}_{cd}(t) = \frac{K(f_{ck})[72 \exp(-0.046f_{ck}) + 75 - RH](t - t_s)}{(t - t_s) + \beta_{cd} \left(\frac{2A_c}{100\mu} \right)^2} \quad (5.19)$$

$K(f_{ck}) = 1.8$ si $f_{ck} \leq 55 \text{ MPa}$ et $K(f_{ck}) = 30 - 0.21f_{ck}$ si $f_{ck} > 55 \text{ MPa}$

β_{cd} vaut 0.007 pour un béton avec fumée de silice et 0.021 pour un béton sans fumée de silice.

5.2.2.3. Modèle GL2000

Gardner et Lockman [256] ont développé le modèle GL2000 en 2001, une version modifiée du modèle de Gardener et Zhao. Le modèle GL2000 s'applique au béton ayant une résistance à la compression inférieure à 70 MPa et un rapport E/C compris entre 0.4 et 0.6. L'expression mathématique du modèle s'écrit comme suit :

$$\mathcal{E}_{sh}(t, t_s) = \mathcal{E}_{shu} \times (1 - 1.18h^4) \times \sqrt{\frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.15 \left(\frac{V}{A_c} \right)^2}} \quad (5.20)$$

$$\mathcal{E}_{shu} = 1000k \sqrt{\frac{30}{f_{c28}}} \quad (5.21)$$

k est un facteur de correction qui dépend du type de ciment (pour CEM II, $k = 0.75$) et V est le volume de l'élément en béton (mm^3).

5.2.2.4. Modèle B3

Le modèle B3 a été développé en 1995 par Bazant et Baweja [254]. Il est basé sur une analyse statistique de données comprenant environ 15 000 points de données et environ 100 séries de tests. Ce modèle est recommandé par RILEM TC-107-GCS. Les paramètres de matériaux utilisés dans le modèle sont limités au béton de ciment Portland ayant une

résistance à la compression à 28 jours variant de 17 à 70 MPa, un rapport E/C variant de 0.3 à 0.85, un rapport granulats/ciment (G/C) variant de 2.5 à 13.5, et un dosage en ciment variant de 160 à 720 kg/m³.

Le retrait est exprimé par les équations suivantes :

$$\varepsilon_{sh}(t, t_s) = -\varepsilon_{shu} \times k_h \times s(t) \quad (5.22)$$

$$\varepsilon_{shu} = \alpha_1 \times \alpha_2 \times (0.019W^{2.1} \times (f_{c28})^{-0.28} + 270) \quad (5.23)$$

$$k_h = 1 - h^3 \quad (5.24)$$

$$s(t) = \tanh \sqrt{\frac{(t-t_s)}{\tau_{sh}}} \quad (5.25)$$

$$\tau_{sh} = 0.085t_s^{-0.08} \times f_{c28}^{-0.25} \times [2k_s \left(\frac{V}{A_c}\right)]^2 \quad (5.26)$$

ε_{shu} : déformation de retrait ultime, k_h : facteur qui dépend de l'humidité relative, h : humidité relative de l'environnement (décimal), $s(t)$: facteur qui dépend du temps, α_1 : facteur qui dépend du type de ciment, α_2 : facteur qui dépend des conditions de durcissement, W : teneur en eau du béton (kg/m³), τ_{sh} : demi-âge de retrait (jours), k_s : facteur de forme de la section transversale.

5.2.3. Résultats et discussion

Pour chacun des quatre modèles, les données des expériences sélectionnées ont été tracées par rapport aux valeurs prédites des modèles. La comparaison graphique entre les résultats expérimentaux du retrait et les modèles CEB-FIP MC90, EC2, GL2000 et B3 est présentée respectivement dans les figures 5.3, 5.4, 5.5, et 5.6. Un point de données prédit correspond parfaitement à la valeur expérimentale s'il se trouve sur la première bissectrice. Les résidus sont calculés pour chaque point en soustrayant les valeurs du retrait mesurées expérimentalement des valeurs prédites. Lorsque la valeur du résidu est positive, le modèle surestime le retrait, et lorsqu'elle est négative, le modèle sous-estime le retrait.

Le coefficient de détermination R^2 (équation 5.27), l'erreur quadratique moyenne RMSE (équation 5.28) et l'erreur intégrale absolue IAE (équation 5.29) ont été utilisés pour évaluer la performance des modèles théoriques.

Dans la régression linéaire, R^2 indique la corrélation entre les valeurs prédites et expérimentales pour l'ensemble des données. Il est représenté par une valeur comprise entre 0 et 1. Une valeur de R^2 proche de 1 indique une meilleure qualité d'ajustement du modèle.

La RMSE et l'IAE sont des indices statistiques couramment utilisés pour évaluer la performance des modèles. Ces indices mesurent l'écart entre les valeurs prédites et expérimentales. Des valeurs faibles de RMSE et d'IAE indiquent un meilleur ajustement. Une valeur de zéro signale une prédiction parfaite, c'est-à-dire que tous les points de données se situent sur la première bissectrice.

Le tableau 5.5 présente les indicateurs statistiques de chacun des quatre modèles de prédiction, en considérant la performance globale des modèles dans la prédiction.

$$R^2 = \left(\frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \right)^2 \quad (5.27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y-x)^2}{N}} \quad (5.28)$$

$$IAE = \frac{\sum \left| \frac{y-x}{x} \right|}{N} \quad (5.29)$$

Où x et y sont les valeurs expérimentales et prédites, respectivement ; (\bar{x}) et (\bar{y}) sont les moyennes des valeurs expérimentales et prédites, respectivement, et N le nombre total de points expérimentaux.

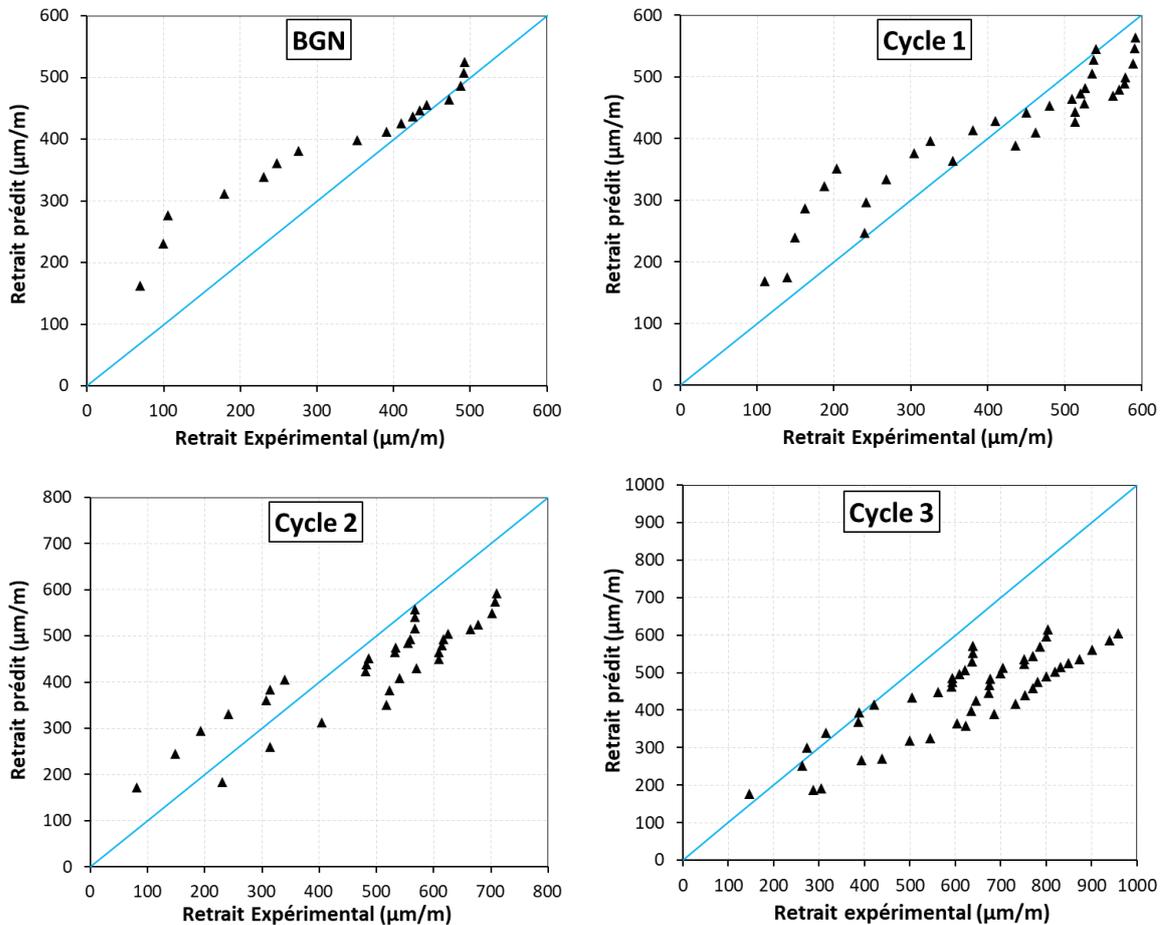


Figure 5.3. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par CEB-FIP MC90.

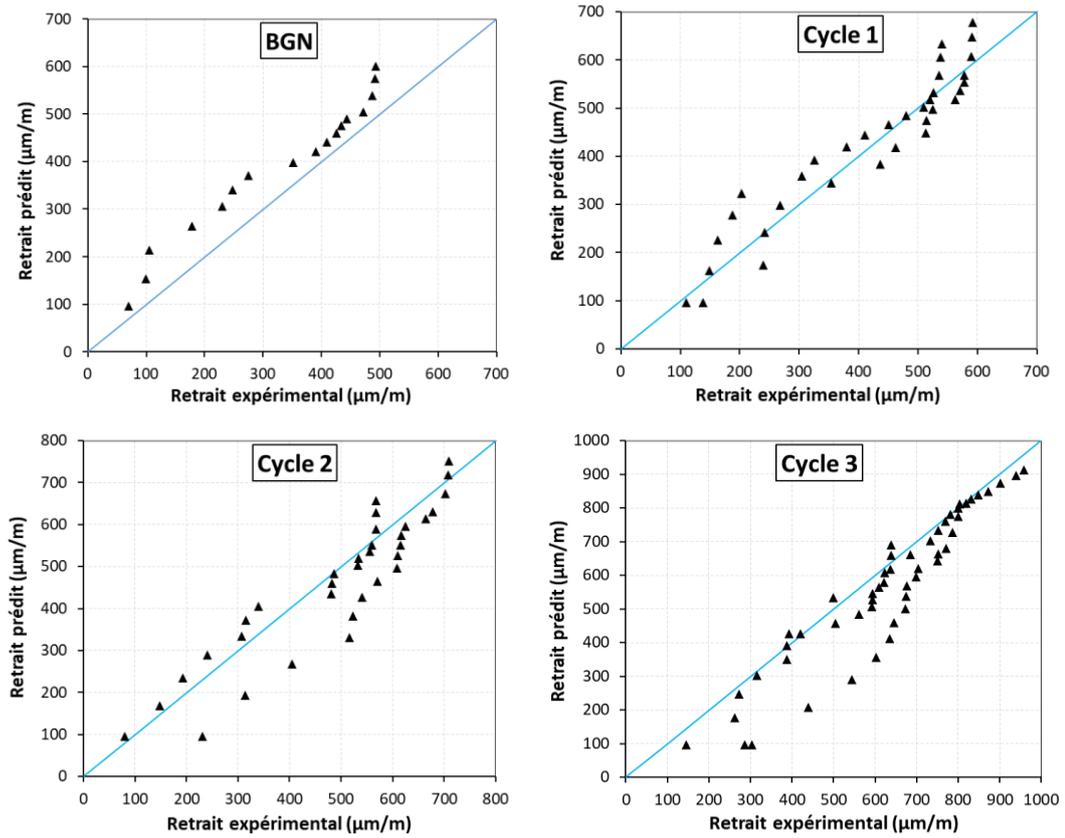


Figure 5.4. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par EC2.

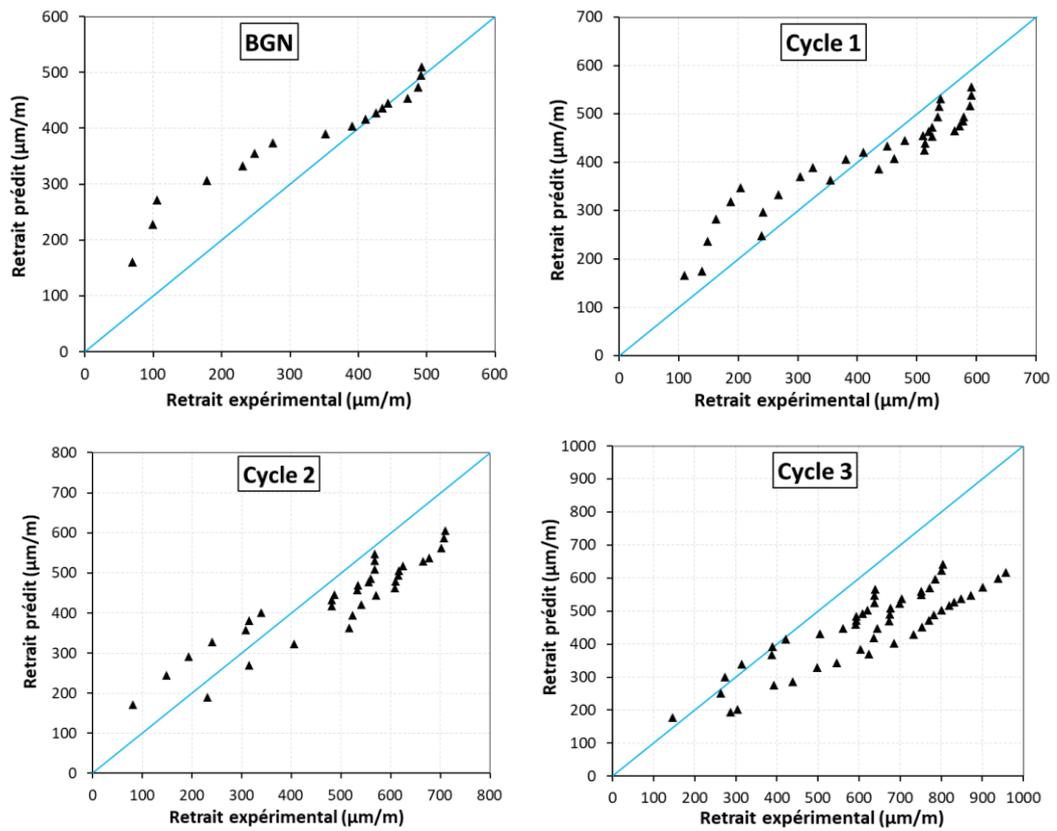


Figure 5.5. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par GL2000.

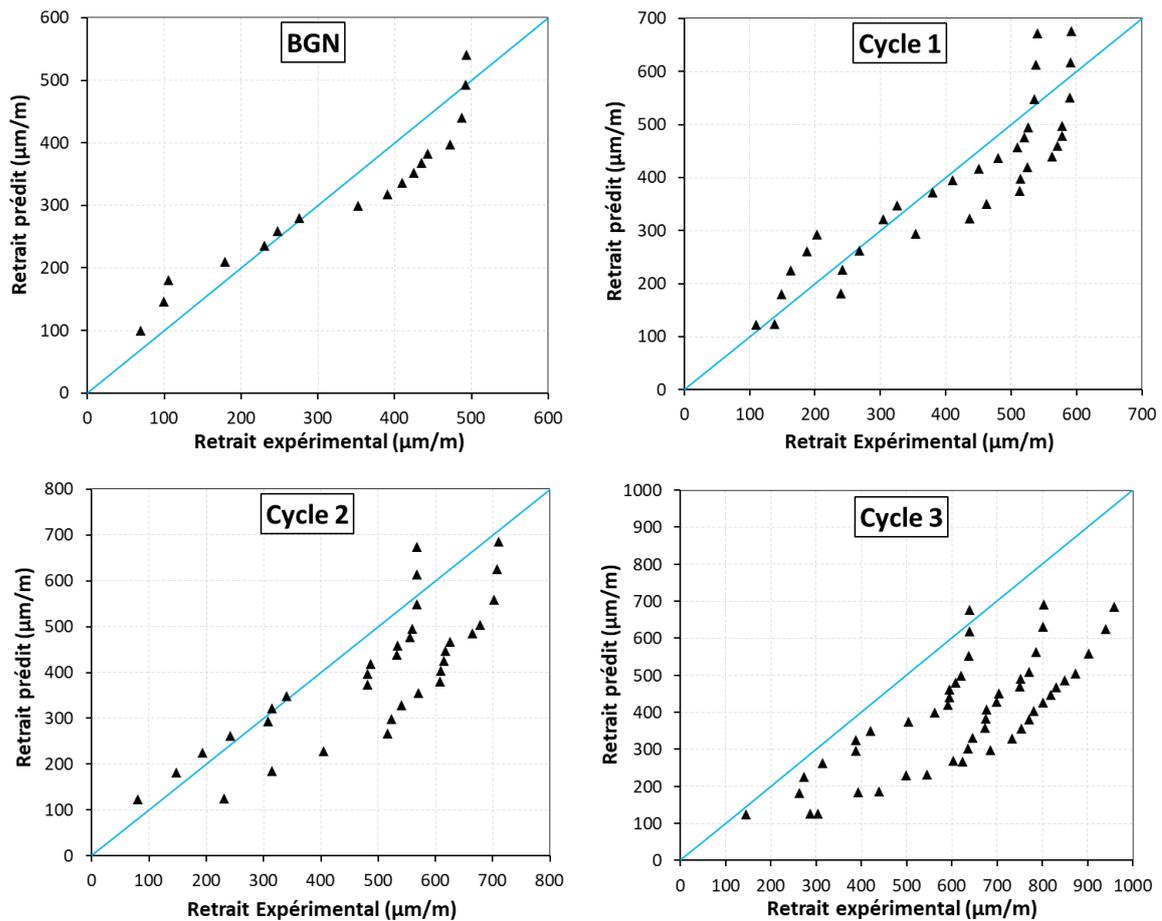


Figure 5.6. Comparaison entre le retrait expérimental et le retrait prédit par B3.

Pour le BGN et le premier cycle, presque tous les modèles ont fourni une prédiction précise du retrait avec des valeurs de R^2 de variant entre 0.80 et 0.96 et des valeurs d'IAE variant entre 9.7% et 18.3%. Cela peut s'expliquer par le fait que ces modèles intègrent plus de paramètres liés au béton, ce qui se traduit par une bonne précision.

Pour le deuxième cycle, les modèles CEB-FIP MC90, EC2 et GL2000 se sont révélés être les plus performants avec des valeurs de R^2 de 0.82, 0.84 et 0.86, et des valeurs d'IAE de 19.4%, 12.3% et 18.5%, respectivement. En revanche, le modèle B3 a présenté la plus faible précision de prédiction avec une valeur de R^2 égale à 0.68 et valeur d'IAE égale à 22.8%.

Pour le troisième cycle, le modèle EC2 a surpassé les autres modèles avec une valeur de R^2 de 0.88 et une valeur d'IAE de 11.3%.

Globalement, les modèles EC2 et GL2000 ont montré les meilleurs résultats en termes de précision de prédiction du retrait. Ils ont présenté les R^2 les plus élevés ainsi que les IAE et les RMSE les plus faibles dans les trois cycles. Ces résultats suggèrent que les modèles existants ont une plus grande précision dans l'estimation du retrait du béton multi-recyclé, tout en

surestimant celui du BGN. Cela est quelque peu contre-intuitif, étant donné que ces modèles ont été développés à partir de données de retrait du béton conventionnel.

Étant donné que les modèles existants ont probablement été basés et calibrés par l'utilisation de la base de données RILEM, qui inclut des mesures de retrait remontant jusqu'à 1953, il est possible qu'ils aient été modélisés sur des matériaux de béton présentant un comportement de retrait accru que celui des mélanges de béton actuels. En considérant que le BGR présente un retrait plus important que celui du BGN correspondant, il est possible que le développement du retrait au fil du temps ressemble davantage aux bétons sur lesquels les modèles étaient basés.

Tableau 5.5. Performance des modèles de prédiction de retrait.

		CEB-FIP MC90	EC2	GL2000	B3
BGN	R ²	0.88	0.96	0.94	0.90
	IAE (%)	18.2	18.3	16.5	13.7
	RMSE	80.9	66.6	77.2	52.6
	Prédiction surestimée (%)	88.24	100	88.24	52.94
	Prédiction sous-estimée (%)	11.76	0	11.76	47.06
Cycle 1	R ²	0.89	0.91	0.90	0.80
	IAE (%)	13.9	9.7	14.5	14.6
	RMSE	67.8	49.7	68.9	73
	Prédiction surestimée (%)	42.86	52.94	41.18	35.29
	Prédiction sous-estimée (%)	57.14	47.06	58.82	64.71
Cycle 2	R ²	0.82	0.84	0.86	0.68
	IAE (%)	19.4	12.3	18.5	22.8
	RMSE	104.5	75.8	97.6	134.1
	Prédiction surestimée (%)	20.59	35.29	30.88	23.53
	Prédiction sous-estimée (%)	79.41	64.71	69.12	76.47
Cycle 3	R ²	0.74	0.88	0.78	0.60
	IAE (%)	29.8	11.3	28.2	36.8
	RMSE (%)	214.6	100.2	202.1	259.3
	Prédiction surestimée (%)	7.84	11.76	21.01	1.92
	Prédiction sous-estimée (%)	92.16	88.24	78.99	98.08

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Ce travail de recherche nous a donné l'opportunité de caractériser des bétons fabriqués à partir de granulats multi-recyclés préparés au laboratoire. L'objectif était de garantir que ces bétons présentent des propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et des déformations différées satisfaisantes pour leur utilisation dans l'industrie du bâtiment.

Pour aborder cette problématique, on a initié l'étude par la caractérisation des diverses générations de granulats utilisés dans la composition des bétons. Par la suite, on a fabriqué trois générations de bétons intégrant 50 % et 100 % de gravier recyclé en substitution partielle du gravier naturel au sein du volume. Ces bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec un squelette granulaire presque identique et un rapport E/C constant.

Les principaux résultats issus de cette étude peuvent être résumés de la manière suivante :

Propriétés des granulats multi-recyclés

1. La quantité de mortier attaché au GR augmente avec le cycle de recyclage, s'établissant à 34 %, 52 % et 76 % pour les GR1, GR2 et GR3, respectivement.
2. Les GR de chaque génération se caractérisent par une absorption plus élevée, une densité plus faible et une résistance à l'abrasion réduite par rapport à celles du GN. Cela est principalement attribuable à l'augmentation de la quantité du mortier attaché à chaque cycle de recyclage.

Propriétés des bétons multi-recyclés à l'état frais

1. La masse volumique du béton frais diminue à mesure que le nombre de cycles de recyclage augmente, en raison de la présence de quantités significatives d'ancien mortier attaché après chaque cycle et l'incorporation de la fumée de silice a conduit à une réduction de 1.4 % de la masse volumique du BGR3-100 frais.
2. Les propriétés rhéologiques du béton augmentent avec le cycle de recyclage et avec le taux de GR.

Propriétés des bétons multi-recyclés à l'état durci

1. La masse volumique du béton durci diminue avec le nombre de cycles augmente. La fumée de silice a entraîné une légère augmentation de la densité du BGR3-100.
2. Le nombre d'ITZ est proportionnel au nombre de cycles de recyclage. Ainsi, la formation de fissures s'accroît dans les anciens mortiers en raison des cycles de concassage répétés, affaiblissant les microstructures des BGR des différentes générations.
3. L'ajout de la fumée de silice dans le béton multi-recyclé a une influence positive sur sa microstructure en remplissant les vides et les fissures existant au niveau des ITZs.
4. Les résistances à la compression et au fendage ainsi que le module d'Young diminuent avec le nombre de cycles et la teneur en GR par rapport au BGN.
5. L'incorporation de la fumée de silice dans le béton multi-recyclé améliore ses propriétés mécaniques. Il a été constaté que le remplacement de 10 % du poids du ciment par de la FS augmentait les résistances à la compression et à la traction par fendage ainsi que le module de Young de 24 %, 25 % et 37 %, respectivement, par rapport au BGR3-100.
6. La vitesse ultrasonique diminue à chaque cycle de recyclage et avec l'augmentation de la teneur en GR. A l'âge de 90 jours, le remplacement total des GN par des GR a entraîné une réduction de 8 %, 13 % et 19 % pour le premier, le deuxième et le troisième cycle, respectivement par rapport au BGN. En revanche, la fumée de silice a conduit à une augmentation de 12 % de la vitesse ultrasonique du béton multi-recyclé.

Déformations différées des bétons multi-recyclés

1. Un retrait plus élevé est observé avec une augmentation du nombre de cycles et de la teneur en GR. À 20 °C, les augmentations étaient respectivement 50 %, 189 % et 237 % pour le BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100, par rapport au BGN.
2. La température de durcissement a eu un impact significatif sur la cinétique de retrait total. En effet, les températures de 40 et 60 °C ont entraîné un retrait total plus élevé que celui obtenu à 20 °C. A 60 °C, les augmentations étaient respectivement de 22 %, 23 %, 25 % et 26 % pour le BGN, BGR1-100, BGR2-100 et BGR3-100, par rapport à celles à 20 °C.
3. L'incorporation de la fumée de silice entraîne une augmentation du retrait total. A 20 °C, la valeur finale du retrait total du RAC3-100-FS augmente de 94 % et de 19 % par rapport à celle de BGN et BGR3-100, respectivement.

4. La progression de la cinétique du fluage des bétons multi-recyclés en traction se manifeste de manière plus rapide que celle du fluage en compression.
5. Un accroissement de la flèche et du fluage en flexion est observé avec l'augmentation du nombre de cycles et de la teneur en GR.
6. L'ajout de 10 % de fumée de silice se traduit par une réduction d'environ 28 %, 25 % et 27 % du fluage en compression, du fluage en traction et de la flèche du BGR3-100, respectivement.
7. Le développement du concept de maturité montre que l'énergie d'activation apparente diminue de manière significative à mesure que la fraction volumique et le nombre cycles augmentent. De plus, l'incorporation de la fumée de silice entraîne une augmentation de l'énergie d'activation du béton.
8. L'évolution du retrait en fonction de l'âge équivalent pour des bétons durcis à différentes températures montre un phénomène de 'cross-over' lorsque la température de cure passe de 20 °C à 40 °C pour un même type de béton.
9. Les résultats numériques montrent que le modèle en série en deux phases et la méthode de maturité peuvent estimer efficacement les propriétés thermiques et mécaniques des bétons multi-recyclés sous n'importe quelle température. Cela peut être approprié pour estimer les effets temps-température sur le développement du retrait.
10. Les modèles Eurocode2 et GL2000 ont donné les meilleurs résultats en termes de précision de la prédiction du retrait des bétons multi-recyclés par rapport aux autres modèles.

Bien que cette étude ait en général quantifié le lien entre les diverses propriétés des granulats et les performances physico-mécaniques et les déformations différées du béton multi-recyclé, une limitation importante de cette recherche réside dans le fait que la résistance à la compression ne couvre pas toute la gamme des classes de résistance requises en pratique. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques des bétons multi-recyclés sur plusieurs classes de résistance du béton parent. Des essais supplémentaires sont également nécessaires pour déterminer les effets des GR sur la durabilité à court et long terme. Ces investigations devraient couvrir des phénomènes comme la carbonatation, la pénétration des chlorures et la susceptibilité à diverses attaques chimiques, ainsi que leur impact sur le comportement structurel.

Perspectives

A l'issue de notre travail de recherche et afin de permettre une compréhension plus approfondie du comportement des bétons à base de granulats multi-recyclés, on envisage les perspectives suivantes :

1. Effet du multi-recyclage sur les propriétés des BHP et des BAP;
2. Etude de la durabilité des bétons à base de granulats multi-recyclés;
3. Méthodes de traitement pour améliorer les performances des bétons multi-recyclés.
4. Effet de l'âge de service du béton parent sur les propriétés des bétons multi-recyclés.
5. Analyse numérique de fluage en flexion des bétons à base des granulats multi-recyclés.
6. Création de modèles analytiques pour prédire le retrait et le fluage du béton multi-recyclé.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Monteiro NBR, Neto JMM, da Silva EA. Environmental assessment in concrete industries. *Journal of Cleaner Production*. **2021**;327:129516.
- [2] Hoornweg D, Bhada-Tata P. What a waste: a global review of solid waste management. In: Urban development series;knowledge papers n° 15. World Bank W, DC, editor.2012.
- [3] Cabral AEB, Schalch V, Dal Molin DCC, Ribeiro JLD. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2010**;24(4):421-30.
- [4] Silva R, De Brito J, Dhir R. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. **2014**;65:201-17.
- [5] Park SB, Lee BC, Kim JH. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34(12):2181-9.
- [6] Ismail ZZ, Al-Hashmi EA. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*. **2009**;29(2):655-9.
- [7] Kou SC, Poon CS. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*. **2009**;31(2):107-13.
- [8] Choi Y-W, Moon D-J, Chung J-S, Cho S-K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*. **2005**;35(4):776-81.
- [9] Siddique R, Khatib J, Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*. **2008**;28(10):1835-52.
- [10] Albano C, Camacho N, Hernández M, Matheus A, Gutierrez A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*. **2009**;29(10):2707-16.
- [11] Del Bosque IS, Zhu W, Howind T, Matías A, De Rojas MS, Medina C. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate. *Cement and Concrete Composites*. **2017**;81:25-34.
- [12] Silva R, De Brito J, Dhir R. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*. **2016**;105:400-15.
- [13] Morlion D, Venstermans J, Vyncke J. Demolition of the Zandvliet lock as aggregates for concrete. *RILEM Demolition and reuse of concrete and masonry, Chapman and Hall Ltd, Londres*. **1988**.
- [14] De Pauw C, Vyncke J, Desmyter J. Reuse of demolition waste as aggregates. In Sustainable Construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16, November 6-9, 1994, Tampa, Florida, USA: University of Florida Center; 1994. p. 385.
- [15] Duan ZH, Poon CS. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*. **2014**;58:19-29.

- [16] Nagataki S, Gokce A, Saeki T, Hisada M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34(6):965-71.
- [17] Shi C, Li Y, Zhang J, Li W, Chong L, Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. *Journal of Cleaner Production*. **2016**;112:466-72.
- [18] Zhao Z. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers: Thèse de doctorat, Lille 1, France; 2014.
- [19] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*. **2007**;37(5):735-42.
- [20] Ogawa H, Nawa T. Improving the quality of recycled fine aggregate by selective removal of brittle defects. *Journal of advanced concrete technology*. **2012**;10(12):395-410.
- [21] Tam VW, Tam CM. Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. *Construction and Building Materials*. **2007**;21(4):879-86.
- [22] de Andrade Salgado F, de Andrade Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. **2022**;52:104452.
- [23] Quattrone M, Angulo SC, John VM. Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production. *Resources, Conservation and Recycling*. **2014**;90:21-33.
- [24] Mulder E, de Jong TP, Feenstra L. Closed cycle construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management*. **2007**;27(10):1408-15.
- [25] Shima H, Tateyashiki H, Matsushashi R, Yoshida Y. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. *Journal of advanced concrete technology*. **2005**;3(1):53-67.
- [26] Akbarnezhad A, Ong K, Zhang M, Tam C, Foo T. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **2011**;25(8):3469-79.
- [27] De Juan MS, Gutiérrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. **2009**;23(2):872-7.
- [28] Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EA, Martinelli E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*. **2014**;69:124-32.
- [29] Tam VW. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*. **2008**;52(5):821-8.
- [30] Zhang N, Konyalıoğlu AK, Duan H, Feng H, Li H. The impact of innovative technologies in construction activities on concrete debris recycling in China: a system dynamics-based analysis. *Environment, Development and Sustainability*. **2023**:1-26.
- [31] Akhtar A, Sarmah AK. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*. **2018**;186:262-81.
- [32] Di Filippo J, Karpman J, DeShazo J. The impacts of policies to reduce CO2 emissions within the concrete supply chain. *Cement and Concrete Composites*. **2019**;101:67-82.

- [33] Bai J, Kang P, Zhang W, Chen K, Zhang Y, Zhou D, et al. Feasibility study on using excavated soil and rock to sintering utilization. *Circular Economy*. **2022**;1(1):100007.
- [34] Zhang N, Duan H, Miller TR, Tam VW, Liu G, Zuo J. Mitigation of carbon dioxide by accelerated sequestration in concrete debris. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2020**;117:109495.
- [35] Zhang C, Hu M, Di Maio F, Sprecher B, Yang X, Tukker A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of the Total Environment*. **2022**;803:149892.
- [36] Neto RO, Gastineau P, Cazacliu BG, Le Guen L, Paranhos RS, Petter CO. An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms. *Waste Management*. **2017**;60:277-89.
- [37] Winter M. A conceptual framework for the recycling of aggregates and other wastes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer: Thomas Telford Ltd; 2002. p. 177-87.
- [38] Tam VW, Soomro M, Evangelista ACJ. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. **2018**;172:272-92.
- [39] ABNT NBR-15116. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil—utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural—requisitos. Rio de Janeiro, Brazil 2021.
- [40] DIN 4226-100. Aggregates for concrete and mortar - part 100: recycled aggregates. Berlin, Germany; 2002.
- [41] Seara-Paz S, González-Fontebo B, Martínez-Abella F, Eiras-López J. Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate. *Engineering structures*. **2018**;156:32-45.
- [42] Choi W-C, Yun H-D, Kim S-W. Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams. *Magazine of Concrete Research*. **2012**;64(9):837-48.
- [43] Ignjatović IS, Marinković SB, Mišković ZM, Savić AR. Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading. *Materials and Structures*. **2013**;46:1045-59.
- [44] Arezoumandi M, Smith A, Volz JS, Khayat KH. An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. *Engineering structures*. **2015**;88:154-62.
- [45] Zhao SL, Sun C. Experimental study of the recycled aggregate concrete beam flexural performance. *Applied Mechanics and Materials*. **2013**;368:1074-9.
- [46] Pradhan S, Kumar S, Barai SV. Performance of reinforced recycled aggregate concrete beams in flexure: experimental and critical comparative analysis. *Materials and Structures*. **2018**;51:1-17.
- [47] Kang TH-K, Kim W, Kwak Y-K, Hong S-G. Flexural testing of reinforced concrete beams with recycled concrete aggregates. *ACI Structural Journal*. **2014**;111(3).
- [48] Bai WH, Sun BX. Experimental study on flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete beam. *Applied Mechanics and Materials*. **2010**;29:543-8.
- [49] Zhang H, Zhao Y. Performance of recycled aggregate concrete in a real project. *Advances in Structural Engineering*. **2014**;17(6):895-906.

- [50] Hamad BS, Dawi AH, Daou A, Chehab GR. Studies of the effect of recycled aggregates on flexural, shear, and bond splitting beam structural behavior. *Case Studies in Construction Materials*. **2018**;9:e00186.
- [51] Al Mahmoud F, Boissiere R, Mercier C, Khelil A. Shear behavior of reinforced concrete beams made from recycled coarse and fine aggregates. *Structures: Elsevier*; 2020. p. 660-9.
- [52] Mohammed TU, Shikdar KH, Awal M. Shear strength of RC beam made with recycled brick aggregate. *Engineering structures*. **2019**;189:497-508.
- [53] Pradhan S, Kumar S, Barai SV. Shear performance of recycled aggregate concrete beams: An insight for design aspects. *Construction and Building Materials*. **2018**;178:593-611.
- [54] Etman EE, Afefy HM, Baraghith AT, Khedr SA. Improving the shear performance of reinforced concrete beams made of recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. **2018**;185:310-24.
- [55] Tošić N, Marinković S, Ignjatović I. A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions. *Construction and Building Materials*. **2016**;127:932-44.
- [56] Pacheco JN, De Brito J, Chastre C, Evangelista L. Uncertainty of shear resistance models: Influence of recycled concrete aggregate on beams with and without shear reinforcement. *Engineering structures*. **2020**;204:109905.
- [57] Li X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. **2008**;53(1-2):36-44.
- [58] Hassan KE-G, Reid JM, Al-Kuwari MS. Recycled aggregates in structural concrete—a Qatar case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*. **2016**;169(2):72-82.
- [59] Abreu V, Evangelista L, De Brito J. The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. **2018**;188:480-9.
- [60] Silva S, Evangelista L, De Brito J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **2021**;272:121645.
- [61] Huda SB, Alam MS. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2014**;65:574-82.
- [62] Thomas C, De Brito J, Gil V, Sainz-Aja J, Cimentada A. Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography. *Construction and Building Materials*. **2018**;166:171-80.
- [63] Dadd L, Xie T, Bennett B, Visintin P. Exploring the physical and mechanical characteristics of multi-generation recycled aggregate concrete at equivalent compressive strengths. *Journal of Cleaner Production*. **2024**;451:141965.
- [64] Visintin P, Dadd L, Alam MU, Xie T, Bennett B. Flexural performance and life-cycle assessment of multi-generation recycled aggregate concrete beams. *Journal of Cleaner Production*. **2022**;360:132214.
- [65] Zhu P, Zhang X, Wu J, Wang X. Performance degradation of the repeated recycled aggregate concrete with 70% replacement of three-generation recycled coarse aggregate. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*. **2016**;31(5):989-95.

- [66] Gomes PCC, Ulsen C, Pereira FA, Quattrone M, Angulo SC. Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. *Waste Management*. **2015**;45:171-9.
- [67] Hansen TC. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and Structures*. **1986**;19:201-46.
- [68] Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. **2001**;31(5):707-12.
- [69] Shayan A, Xu A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. *Materials Journal*. **2003**;100(5):371-80.
- [70] Eckert M, Oliveira M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. *Construction and Building Materials*. **2017**;133:416-24.
- [71] Salesa Á, Pérez-Benedicto JA, Colorado-Aranguren D, López-Julián PL, Esteban LM, Sanz-Baldúz LJ, et al. Physico-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*. **2017**;141:248-55.
- [72] Martinez Hernandez H. Amélioration de granulats de béton recyclé par bioprécipitation: Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, France; 2022.
- [73] Limbachiya M, Leelawat T, Dhir R. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*. **2000**;33:574-80.
- [74] EHE. Instrucción de Hormigón Estructural (Spanish structural concrete code). Ministerio de Fomento; 2000.
- [75] Azzaz Rahmani A, Chemrouk M, Ammar-Boudjelal A. Rheological, physico-mechanical and durability properties of multi-recycled concrete. *Advances in Concrete Construction*. **2020**;9(1):9-22.
- [76] Spaeth V, Tegguer AD. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*. **2013**;2(2):143-52.
- [77] Khodabakhshian A, Ghalehnovi M, De Brito J, Shamsabadi EA. Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*. **2018**;170:42-60.
- [78] Omrane M, Rabehi M. Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. **2020**;247:118576.
- [79] Larbi J, Heijnen W, Brouwer J, Mulder E. Preliminary laboratory investigation of thermally treated recycled concrete aggregate for general use in concrete. Waste management series: Elsevier; 2000. p. 129-39.
- [80] Kou S-c, Poon C-s, Agrela F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*. **2011**;33(8):788-95.
- [81] Aldred JM, Holland TC, Morgan DR, Roy DM, Bury MA, Hooton RD, et al. Guide for the use of silica fume in concrete. *ACI-American Concrete Institute-Committee: Farmington Hills, MI, USA*. **2006**;234.
- [82] Montgomery D. Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate:

- Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit. University of Dundee , London, UK: Thomas Telford Publishing; 1998. p. 287-96.
- [83] Tateyashiki H, Shima H, Matsumoto Y, Koga Y. Properties of concrete with high quality recycled aggregate by heat and rubbing method. *Proc JCI*. **2001**;23(2):61-6.
- [84] Ma X, Han Z, Li X, Meng F. Thermal treatment of waste concrete and the rehydration properties of the dehydrated cement paste. *Journal of Qingdao Technological University*. **2009**;30(4):9.
- [85] Katz A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **2004**;16(6):597-603.
- [86] Tam VW, Tam CM, Le KN. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*. **2007**;50(1):82-101.
- [87] Kou S-C, Poon C-S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. **2010**;32(8):649-54.
- [88] Wan H, Xu J, Shui Z, Jiang J. Study on the structure and properties of interfacial transition zone (ITZ) of the regenerated concrete. *J Wuhan Univ Technol*. **2004**;26(11):2.
- [89] Zhao T, Wittmann F, Jiang R, Li W. Application of silane-based compounds for the production of integral water repellent concrete. HVI, 6th International conference on WR treatment of building materials 2011. p. 137-44.
- [90] Bai G, Zhu C, Liu C, Liu B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*. **2020**;240:117978.
- [91] Kou S, Poon CS. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*. **2012**;35:69-76.
- [92] Tam VW, Gao X, Tam CM. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete research*. **2005**;35(6):1195-203.
- [93] Tam VW, Tam CM. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Construction and Building Materials*. **2008**;22(10):2068-77.
- [94] Kou SC, Poon CS, Chan D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **2007**;19(9):709-17.
- [95] Otsuki N, Miyazato S-i, Yodsudjai W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **2003**;15(5):443-51.
- [96] Lovato PS, Possan E, Dal Molin DCC, Masuero ÂB, Ribeiro JLD. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*. **2012**;26(1):437-47.
- [97] Marie I, Quiasrawi H. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*. **2012**;37:243-8.
- [98] Salas A, Roesler JR, Lange D. Batching effects on properties of recycled concrete aggregates for airfield rigid pavements. 2010 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Federal Aviation Administration American Association of Airport Executives 2010.

- [99] Kim K-H, Shin M-S, Kong Y-S, Cha S-W. Effect of fly ash on rheology and strength of recycled aggregate concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. **2013**;25(2):241-50.
- [100] Yang I-H, Kim K-C. Mechanical properties and predictions of strength of concrete containing recycled coarse aggregates. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. **2016**;20(2):49-59.
- [101] Wardeh G, Ghorbel E, Gomart H. Mix design and properties of recycled aggregate concretes: applicability of Eurocode 2. *International journal of concrete structures and materials*. **2015**;9:1-20.
- [102] Poon CS, Shui Z, Lam L, Fok H, Kou S. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34(1):31-6.
- [103] Matias D, De Brito J, Rosa A, Pedro D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*. **2013**;44:101-9.
- [104] Butler L, West J, Tighe S. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*. **2011**;41(10):1037-49.
- [105] Bae J-M, Kim Y-S. A study on the chloride diffusivity of recycled aggregate concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. **2010**;10(1):147-53.
- [106] Neville AM. Properties of concrete: Longman London; 1995.
- [107] Hamad BS, Dawi AH. Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. *Case Studies in Construction Materials*. **2017**;7:228-39.
- [108] Dosho Y. Effect of mineral admixtures on the performance of low-quality recycled aggregate concrete. *Crystals*. **2021**;11(6):596.
- [109] Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*. **2003**;33(5):703-11.
- [110] Faleschini F, Jiménez C, Barra M, Aponte D, Vázquez E, Pellegrino C. Rheology of fresh concretes with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2014**;73:407-16.
- [111] Amario M, Pepe M, Martinelli E, Toledo Filho RD. Rheological behavior at fresh state of structural recycled aggregate concrete. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proceedings of the 2017 fib Symposium, Maastricht, The Netherlands: Springer; 2017. p. 215-23.
- [112] Amer AAM, Ezziane K, Bougara A. Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **2016**;123:300-8.
- [113] Kenai S, Menadi B, Debbih A, Kadri EH. Effect of recycled concrete aggregates and natural pozzolana on rheology of self-compacting concrete. *Key Engineering Materials*. **2014**;600:256-63.
- [114] Medina C, Frías M, De Rojas MS. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. **2012**;31:112-8.

- [115] Poon CS, Shui Z, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2004**;18(6):461-8.
- [116] Bentur A, Alexander M. A review of the work of the RILEM TC 159-ETC: Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites. *Materials and Structures*. **2000**;33:82-7.
- [117] Bentz DP. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. *Cement and Concrete Composites*. **2009**;31(5):285-9.
- [118] Feng JC, Zhu PH, Xia Q. Mechanical behaviors of structural concrete using recycled aggregates from repeatedly recycling waste concrete. *Advanced Materials Research*. **2012**;450:1379-82.
- [119] Ferreira L, De Brito J, Barra M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. **2011**;63(8):617-27.
- [120] Rahal K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*. **2007**;42(1):407-15.
- [121] Poon CS, Kou S, Lam L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*. **2007**;40:981-8.
- [122] Pavón E, Etxeberria M, Díaz N. Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado en La Habana, Cuba. *Materiales de Construcción*. **2012**;62(307):431-41.
- [123] Etxeberria M, Marí AR, Vázquez E. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*. **2007**;40:529-41.
- [124] Tu T-Y, Chen Y-Y, Hwang C-L. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and concrete research*. **2006**;36(5):943-50.
- [125] Yang K-H, Chung H-S, Ashour AF. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*. **2008**;105(3):289-96.
- [126] Malešev M, Radonjanin V, Marinković S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*. **2010**;2(5):1204-25.
- [127] Kim J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*. **2022**;328:127071.
- [128] Kim N, Kim J, Yang S. Mechanical strength properties of RCA concrete made by a modified EMV method. *Sustainability*. **2016**;8(9):924.
- [129] Cho S-K, Kim G-Y, Eu H-M, Kim Y-R, Lee C-M. The effect of recycled aggregate produced by the new crushing device with multi-turn wings and guide plate on the mechanical properties and carbonation resistance of concrete. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. **2021**;9(2):135-42.
- [130] Kim S-H, Jeon C-S, Lee S-H. An experimental study on the estimation of compressive strength and the physical properties of recycled aggregate concrete of fixed slump. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. **2018**;22(2):51-8.
- [131] Jang Y-H, Choi K-S, You Y-C, Kim K-H, Yun H-D. Effect of recycled coarse aggregate (RCA) replacement level on the bond behaviour between RCA concrete and deformed rebars. *Journal of the Korea Concrete Institute*. **2010**;22(1):123-30.

- [132] Zhang H, Wang Y, Lehman DE, Geng Y, Kuder K. Time-dependent drying shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*. **2020**;105:103426.
- [133] Zaharieva R, Buyle-Bodin F, Skoczylas F, Wirquin E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. **2003**;25(2):223-32.
- [134] Tijani AI, Yang J, Dirar S. Enhancing the performance of recycled aggregate concrete with microsilica. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. **2015**;4(4):347-53.
- [135] Bui NK, Satomi T, Takahashi H. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. *Construction and Building Materials*. **2017**;148:376-85.
- [136] Andreu G, Miren E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2014**;52:227-35.
- [137] Kou S-c, Poon C-s. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2015**;77:501-8.
- [138] Silva R, De Brito J, Dhir R. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2015**;83:108-18.
- [139] Shahria Alam M, Slater E, Muntasir Billah A. Green concrete made with RCA and FRP scrap aggregate: Fresh and hardened properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **2013**;25(12):1783-94.
- [140] Yang I-H, Jeong J-Y. Effect of recycled coarse aggregate on compressive strength and mechanical properties of concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. **2016**;28(1):105-13.
- [141] Thomas J, Thaickavil NN, Wilson P. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*. **2018**;19:349-65.
- [142] Kou S-C, Poon C-S, Etxeberria M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*. **2011**;33(2):286-91.
- [143] Martín-Morales M, Zamorano M, Ruiz-Moyano A, Valverde-Espinosa I. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*. **2011**;25(2):742-8.
- [144] Xiao J, Li J, Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*. **2005**;35(6):1187-94.
- [145] Dimitriou G, Savva P, Petrou MF. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2018**;158:228-35.
- [146] Behera M, Bhattacharyya S, Minocha A, Deoliya R, Maiti S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*. **2014**;68:501-16.
- [147] Kim J. The effect of residual mortar in recycled aggregate on behavior of recycled aggregate concrete. *Korea University of Technology and Education, Cheonan, Korea*. **2016**.

- [148] Fonseca N, De Brito J, Evangelista L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*. **2011**;33(6):637-43.
- [149] Gholampour A, Ozbakkaloglu T. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. *Engineering structures*. **2018**;157:224-34.
- [150] Salesa Á, Pérez-Benedicto JÁ, Esteban LM, Vicente-Vas R, Orna-Carmona M. Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. *Construction and Building Materials*. **2017**;153:364-73.
- [151] Mao Y, Liu J, Shi C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*. **2021**;295:126435.
- [152] Silva R, De Brito J, Dhir R. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*. **2015**;77:327-39.
- [153] Medjigbodo S, Bendimerad AZ, Rozière E, Loukili A. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? *Cement and Concrete Composites*. **2018**;86:72-86.
- [154] Gomes M, de Brito J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Materials and Structures*. **2009**;42:663-75.
- [155] Abate SY, Song K-I, Song J-K, Lee BY, Kim H-K. Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar. *Construction and Building Materials*. **2018**;165:64-71.
- [156] Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M. Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. *Construction and Building Materials*. **2016**;115:32-41.
- [157] Zhang H, Wang Y-Y, Lehman DE, Geng Y. Autogenous-shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*. **2020**;111:103600.
- [158] Narayanan R. EN1992 Eurocode 2: Design of concrete structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering: Thomas Telford Ltd; 2001. p. 23-8.
- [159] Zhang SJ. Water Absorption and Desorption Behavior of Recycled Aggregate and its Effect on Concrete Shrinkage. Beijing, China (in Chinese): Beijing University of engineering and architecture; 2019.
- [160] Corinaldesi V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. **2010**;24(9):1616-20.
- [161] Nassar R-U-D, Soroushian P. Use of milled waste glass in recycled aggregate concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*. **2013**;166(5):304-15.
- [162] Kirthika S, Singh S. Durability studies on recycled fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2020**;250:118850.
- [163] Brand AS, Roesler JR, Salas A. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2015**;79:83-9.
- [164] Yanweerasak T, Kea TM, Ishibashi H, Akiyama M. Effect of recycled aggregate quality on the bond behavior and shear strength of RC members. *Applied Sciences*. **2018**;8(11):2054.

- [165] Domingo-Cabo A, Lázaro C, López-Gayarre F, Serrano-López M, Serna P, Castaño-Tabares JO. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2009**;23(7):2545-53.
- [166] Fathifazl G, Razaqpur AG, Isgor OB, Abbas A, Fournier B, Foo S. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*. **2011**;33(10):1026-37.
- [167] Gómez Soberón JMV. Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate. **2002**.
- [168] Gómez Soberón JMV. Relationship between gas adsorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete. *Cement, Concrete & Aggregates*. **2003**;25(2):1-7.
- [169] Fan Y, Xiao J, Tam VW. Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*. **2014**;15(2):169-78.
- [170] Tam VW, Tam CM. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*. **2007**;42:3592-602.
- [171] Sri Ravindrarajah R, Tam C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*. **1985**;37(130):29-38.
- [172] Ye H. Experimental study on mechanical properties of concrete made with high quality recycled aggregates. *Sichuan Build Sci*. **2009**;35(5):195-9.
- [173] Mehta PK, Monteiro PJ. Concrete: microstructure, properties, and materials: McGraw-Hill Education 2014.
- [174] He Z-h, Hu H-b, Casanova I, Liang C-f, Du S-g. Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2020**;254:119312.
- [175] Zou C, Wang Y, Hu Q. Experimental study and model predictive of recycled aggregate concrete creep. *Journal of Wuhan University of Technology*. **2009**;31(12):94-8.
- [176] Vázquez E, Barra M. Hormigón de áridos reciclados: retracción. V Seminario Desenvolvimento Sustentavel ea Reciclagem na Construção Civil Comité Técnico. **2002**;206:7-14.
- [177] de Oliveira MB. Etude de la durabilité du béton de granulats recyclés dans son application comme béton armé. Thèse de doctorat, Université polytechnique de Catalunya, Espagne 1997.
- [178] Zhutovsky S, Shishkin A. Recycling of hydrated Portland cement paste into new clinker. *Construction and Building Materials*. **2021**;280:122510.
- [179] NF EN 12390-7. Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci. AFNOR; 2019.
- [180] NF EN 12350-2. Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement. AFNOR; 2019.
- [181] ASTM C1723. Standard guide for examination of hardened concrete using scanning electron microscopy. ASTM International, West Conshohocken (PA) 2016.
- [182] NF EN 12390-3. Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes. AFNOR; 2019.
- [183] Barcellos CA. Tensile strength of concretes. *RILEM Bull*. **1953**;13:103-7.
- [184] Oluokun FA, Burdette EG, Deatherage JH. Splitting tensile strength and compressive strength relationships at early ages. *Materials Journal*. **1991**;88(2):115-21.

- [185] Kadleček V, Modrý S. Size effect of test specimens on tensile splitting strength of concrete: general relation. *Materials and Structures*. **2002**;35:28-34.
- [186] NF EN 12390-6. Essais pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes. AFNOR; 2012.
- [187] ASTM C469. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. ASTM International, West Conshohocken (PA); 2014.
- [188] NF EN 12504-4. Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son. AFNOR; 2005.
- [189] Naik TR, Malhotra VM, Popovics JS. The ultrasonic pulse velocity method. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition: CRC Press; 2003. p. 8-1-8-19.
- [190] Pons G, Torrenti JM. Retrait et fluage. Presses de l'ENPC; 2008.
- [191] Guo H, Shi C, Guan X, Zhu J, Ding Y, Ling T-C, et al. Durability of recycled aggregate concrete—A review. *Cement and Concrete Composites*. **2018**;89:251-9.
- [192] Chaudhary SK, Sinha AK. Effect of silica fume on permeability and microstructure of high strength concrete. *Civil Engineering Journal*. **2020**;6(9):1697-703.
- [193] Pickel D, Tighe S, West JS. Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete. *Construction and Building Materials*. **2017**;141:245-52.
- [194] El-Hawary M, Al-Sulily A. Internal curing of recycled aggregates concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2020**;275:122911.
- [195] Thomas C, De Brito J, Cimentada A, Sainz-Aja J. Macro-and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2020**;245:118843.
- [196] Zhang M, Zhu L, Gao S, Dong Y, Yuan H. Mechanical properties of recycled aggregate concrete prepared from waste concrete treated at high temperature. *Journal of Building Engineering*. **2023**:107045.
- [197] Lahmar N, Bouziadi F, Boulekbache B, Meziane E-H, Hamrat M, Haddi A, et al. Experimental and finite element analysis of shrinkage of concrete made with recycled coarse aggregates subjected to thermal loading. *Construction and Building Materials*. **2020**;247:118564.
- [198] Fiol F, Thomas C, Muñoz C, Ortega-López V, Manso J. The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. **2018**;182:309-23.
- [199] Butler L, West JS, Tighe SL. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*. **2011**;41(10):1037-49.
- [200] Abd Elhakam A, Awad E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. **2012**;35:421-7.
- [201] de Brito JMCL, Gonçalves AP, Dos Santos JR. Recycled concrete production. Multiple recycling of concrete coarse aggregates. *Revista Ingeniería de Construcción*. **2006**;21(1):33-40.
- [202] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Carro-Lopez D, Martínez-Lage I. Design of recycled concrete under ultimate limit state by normal stresses. 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo, Brazil 2009. p. 275-85.

- [203] Zain MFM, Mahmud H, Ilham A, Faizal M. Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. **2002**;32(8):1251-8.
- [204] CEB-FIP MC 90. Model code for concrete structures. Comité, Euro-International du Béton, Lausanne, Switzerland 1990. p. 462.
- [205] ACI 363R-10. Report on high-strength concrete ACI; 2010.
- [206] BAEL 91/99. Règles Techniques de Conception et de Calcul des Ouvrages et Constructions en Béton Armé suivant la méthode des états limites. Fascicule n° 62, Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme, France; 1999.
- [207] Carino N, Lew H. Re-examination of the relation between splitting tensile strength and compressive strength of normal weight concrete. *ACI Journal Proceeding* 1972. p. 136-47.
- [208] Ahmad SH, Shah SP. Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete. *PCI journal*. **1985**;30(6):92-119.
- [209] Arıoglu N, Girgin ZC, Arıoglu E. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion. *ACI Materials Journal*. **2006**;103(1):18-24.
- [210] Pinsonneault P. Influence des fumées de silice sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons et des mortiers: Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada; 1986.
- [211] Almusallam AA, Beshr H, Maslehuddin M, Al-Amoudi OS. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. **2004**;26(7):891-900.
- [212] Feidman RF. Essais non destructifs du béton. CBD-187-F 2005. p. 6.
- [213] Shooshpasha I, Hasanzadeh A, Kharun M. Effect of silica fume on the ultrasonic pulse velocity of cemented sand. *Journal of Physics: Conference Series: IOP Publishing*; 2020. p. 012017.
- [214] Bravo M, De Brito J, Evangelista L, Pacheco J. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. *Construction and Building Materials*. **2018**;168:818-30.
- [215] Leemann A, Lura P, Loser R. Shrinkage and creep of SCC–The influence of paste volume and binder composition. *Construction and Building Materials*. **2011**;25(5):2283-9.
- [216] Al-Amoudi O, Maslehuddin M, Shameem M, Ibrahim M. Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather. *Cement and Concrete Composites*. **2007**;29(9):690-9.
- [217] Nmai CK, Suchorski DM, Bell LW, Huffman MS, Rear K, Bohan R. Cementitious materials for concrete. *ACI Education Bulletin E3-01, ACI commite E-701*. **2001**.
- [218] Hooton R. Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *Materials Journal*. **1993**;90(2):143-51.
- [219] Lura P, van Breugel K, Maruyama I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. **2001**;31(12):1867-72.
- [220] Bouziadi F, Boulekbache B, Hamrat M. The effects of fibres on the shrinkage of high-strength concrete under various curing temperatures. *Construction and Building Materials*. **2016**;114:40-8.

- [221] Moon H-J, Koo K-M, Kim H-S, Seok W-K, Lee B-G, Kim G-Y. Suggestion of the prediction model for material properties and creep of 60~ 80MPa grade high strength concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. **2018**;18(6):517-25.
- [222] Zou D, Liu T, Teng J, Du C, Li B. Influence of creep and drying shrinkage of reinforced concrete shear walls on the axial shortening of high-rise buildings. *Construction and Building Materials*. **2014**;55:46-56.
- [223] Wendling A, Sadhasivam K, Floyd RW. Creep and shrinkage of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. *Construction and Building Materials*. **2018**;167:205-15.
- [224] Chen H-J, Wu K-C, Tang C-W, Huang C-H. Engineering properties of self-consolidating lightweight aggregate concrete and its application in prestressed concrete members. *Sustainability*. **2018**;10(1):142.
- [225] Asamoto S, Kato K, Maki T. Effect of creep induction at an early age on subsequent prestress loss and structural response of prestressed concrete beam. *Construction and Building Materials*. **2014**;70:158-64.
- [226] Lopez M. Prestress losses in high performance lightweight concrete pretensioned bridge girders. *PCI journal*. **2005**;50(5):84-94.
- [227] Bischoff PH, Torres L. Rational approach for computing long-term deflection of reinforced concrete. *ACI Structural Journal*. **2021**;118(2).
- [228] Wang Z, Li X, Jiang L, Wang M, Xu Q, Harries K. Long-term performance of lightweight aggregate reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*. **2020**;264:120231.
- [229] Choi W-C, Yun H-D. Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate. *Materials & Design*. **2013**;51:742-50.
- [230] Vakhshouri B. Time-dependent deflection of conventional, self-compacting and lightweight concrete slabs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Structures and Buildings*. **2018**;171(6):434-43.
- [231] Park H-G, Hwang H-J, Hong G-H, Kim Y-N, Kim J-Y. Immediate and long-term deflections of reinforced concrete slabs affected by early-age loading and low temperature. *ACI Structural Journal*. **2012**;109(3):413-22.
- [232] Bouziadi F, Boulekbache B, Haddi A, Djelal C. Experimental and finite element analysis of creep behaviour of steel fibre reinforced high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*. **2018**;173:101-10.
- [233] Domingo A, Lázaro C, Gayarre F, Serrano M, López-Colina C. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*. **2010**;43:1147-60.
- [234] Ranaivomanana N, Multon S, Turatsinze A. Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels. *Cement and Concrete Research*. **2013**;52:1-10.
- [235] Persson B. Correlating laboratory and field tests of creep in high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. **2001**;31(3):389-95.
- [236] Mazloom M, Ramezani-pour A, Brooks J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*. **2004**;26(4):347-57.
- [237] Vandewalle L. Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions. *Cement and Concrete Composites*. **2000**;22(3):201-8.

- [238] Maia L, Figueiras J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. **2012**;34:602-10.
- [239] Loukili A. Etude du retrait et du fluage de Bétons à Ultra-Hautes Performances: Thèse de doctorat, Université de Nantes, France; 1996.
- [240] Eurocode 2. Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. British Standard Institution, London; 2005.
- [241] JSCE. Guidelines for concrete: standard specifications for concrete structures. Japan Society of Civil Engineers; 2007.
- [242] ANSYS Release 15.0. Mechanical user's guide. 2013.
- [243] ASTM C1074. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM International, West Conshohocken (PA); 2017.
- [244] Ezziane K, Bougara A, Kadri A, Khelafi H, Kadri E. Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature. *Cement and Concrete Composites*. **2007**;29(8):587-93.
- [245] Schindler AK. Effect of temperature on hydration of cementitious materials. *Materials Journal*. **2004**;101(1):72-81.
- [246] Radević A, Đureković A, Zakić D, Mladenović G. Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. **2017**;136:386-93.
- [247] Gruyaert E, Robeyst N, De BN. Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. **2010**;102(3):941-51.
- [248] Wu S, Huang D, Lin F-B, Zhao H, Wang P. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. **2011**;105(1):171-86.
- [249] Zhang W, Min H, Gu X, Xi Y, Xing Y. Mesoscale model for thermal conductivity of concrete. *Construction and Building Materials*. **2015**;98:8-16.
- [250] Kim K-H, Jeon S-E, Kim J-K, Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. **2003**;33(3):363-71.
- [251] Shen D, Jiang J, Shen J, Yao P, Jiang G. Influence of prewetted lightweight aggregates on the behavior and cracking potential of internally cured concrete at an early age. *Construction and Building Materials*. **2015**;99:260-71.
- [252] Balaji A, Luquman MK, Nagarajan P, Pillai T. Prediction of response of reinforced concrete frames exposed to fire. *Advances in Computational Design*. **2016**;1(1):105-17.
- [253] Amadio C, Fragiaco M. Simplified approach to evaluate creep and shrinkage effects in steel-concrete composite beams. *Journal of Structural Engineering*. **1997**;123(9):1153-62.
- [254] Bazant Z, Bawej S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-Model B3. *Materials and Structures*. **1995**;28:357-65.
- [255] Le Roy R. Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances: Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris; 1995.
- [256] Gardner N, Lockman M. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete. *Materials Journal*. **2001**;98(2):159-67.