

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 et Structures

Par

Nassira LAHMAR

Thème

Propriétés physico-mécaniques et durabilité des bétons à base de granulats recyclés

Soutenue le 01/04/2021, devant le jury composé de :

Abdelkader BOUGARA	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
Karim EZZIANE	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examinateur
Farid DEBIEB	Professeur	Université Yahia Fares de Médéa	Examinateur
Khadra BENDJILLALI	MCA	Université Amar Telidji de Laghouat	Examinateur
Bensaid BOULEKBACHE	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Rapporteur
El-Hadj MEZIANE	MCA	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Co-Rapporteur

Remerciements

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

Avant toute chose nous remercions "ALLAH" le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté de réaliser ce travail.

Je tiens à remercier tous particulièrement :

*Mon directeur de thèse, **Bensaid BOULEKBACHE**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali 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, son aide et sa sympathie, sa grande gentillesse, de ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.*

*Mon co-directeur de thèse, **El-Hadj MEZIANE**, MCA à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir partagé ses connaissances sur le sujet.*

*Un grand merci au **Dr Abdelkader BOUGARA**, Professeur à l'Université de Chlef, pour avoir accepté de présider le jury. Merci aux examinateurs **Karim EZZIANE**, Professeur à l'Université de Chlef, **Farid DEBIEB**, Professeur à l'Université de Médéa et **Dr Khadra BENDJILLALI**, MCA à l'université de Laghouat d'avoir accepté d'examiner cette thèse et dont leur présence au jury a donné une dimension supplémentaire à cette thèse.*

*Je tiens à remercier vivement **Dr Farid BOUZIADI**, MCB à l'Université de Chlef, pour avoir m'aider à réaliser la partie numérique.*

*Je tiens à remercier également **Dr Abdelkader HADDI**, HDR à l'Université d'Artois, Béthune et **Dr Chafika DJELAL**, Professeure des universités à l'université d'Artois, Béthune qui m'ont accueilli dans leur laboratoire et m'ont donné l'opportunité d'effectuer la partie numérique et d'avoir partagé l'ensemble de leurs connaissances.*

*Je tiens à remercier tous les enseignants et ingénieurs de laboratoire de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'UHB Chlef, en particulier l'ingénieur **Fouad OUALI** pour sa disponibilité durant la campagne expérimentale.*

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.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, mille fois merci pour tous tes sacrifices. Les mots sont très faibles pour te l'affirmer : tu es et tu resteras la personne la plus importante pour moi.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes nièces Birihane, Rihana et Afnane.

Ma grand-mère que dieu la bénisse.

Toute la famille Lahmar et Ezziane.

Résumé

L'utilisation des granulats recyclés obtenus des constructions démolies est l'une des solutions envisageables. Ce travail de recherche vise à étudier les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons à base de gravier recyclé. Le gravier naturel (GN) est substitué partiellement ou totalement par le gravier recyclé (GR) avec des pourcentages massiques de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Les GR sont pré-saturés avant leur utilisation afin d'atteindre la même ouvrabilité de tous les bétons étudiés. Plusieurs essais ont été effectués. Tout d'abord, des essais mécaniques (résistances à la compression et à la traction et module d'élasticité) sont réalisés pour évaluer les propriétés de résistance du béton, le test de vitesse des ondes ultrasoniques a été testé pour étudier la connectivité des pores dans le béton et sa qualité. Ensuite l'essai de retrait sous trois températures de cure 20 °C, 35 °C et 50 °C. Enfin la durabilité a été étudié par des essais d'absorption par immersion et par capillarité, l'essai de perméabilité à l'eau et aux ions chlore et l'attaque par les acides et les sulfates.

Les résultats obtenus indiquent que les propriétés mécaniques sont affectées négativement par le taux de remplacement des GR. Le retrait total augmente avec l'augmentation du taux de remplacement de GR et de la température de cure. De plus le BGR est moins durable que le BGN aux attaques par les agents agressives. Par conséquent, les résultats trouvés montrent que le gravier recyclé peut être une alternative au gravier naturel, malgré ses effets négatifs sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton. Ces effets peuvent être négligés vu son apport sur l'aspect économique et environnemental.

D'autre part, l'analyse par éléments finis à l'aide du logiciel "ANSYS" est utilisée pour prédire le retrait du béton en ce qui concerne les propriétés thermiques et mécaniques. Le retrait est estimé au moyen de l'approche par maturité et du modèle série en deux phases. Les résultats montrent une bonne précision avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Gravier recyclé, gravier naturel, pré-saturation, résistance mécanique, retrait, température de cure, durabilité, Simulation numérique.

Abstract

One of the possible solutions is the use of recycled aggregates obtained from demolished constructions. This research work aims to study the physical and mechanical properties and durability of concrete made with recycled gravel. Natural coarse aggregates (NA) are partially or totally replaced by recycled coarse aggregates (RA) with mass percentages of 0%, 25%, 50%, 75% and 100%. The RA are pre-saturated before their use in order to achieve the same workability of all the concretes studied. Several tests have been carried out. First of all, mechanical tests like the compressive and tensile strengths and the modulus of elasticity were carried out to evaluate the mechanical properties of the concrete; the speed test of ultrasonic waves was tested to study the connectivity of pores in concrete and the quality of concrete. Then the shrinkage test under three curing temperatures of 20 °C, 35 °C and 50 °C is performed out. Finally, durability has been studied using absorption by immersion and by capillarity tests, the permeability test for water and chloride ions and the attack by acids and sulfates.

The obtained results indicate that the mechanical properties are negatively affected by the RA replacement ratio. Total shrinkage increases with increasing RA replacement rate and cure temperature. In addition the recycled aggregate concrete is less durable than that natural aggregate concrete to attacks by aggressive agents. Consequently, the results found show that recycled aggregate can be an alternative to natural aggregate, despite its harmful effects on the physical-mechanical properties and durability of concrete. These effects can be overlooked given its contribution to the economic and environmental aspect.

On the other hand, finite element analysis using ANSYS software is used to predict the shrinkage of concrete with regard to thermal and mechanical properties. Withdrawal is estimated using the maturity approach and the two-phase serial model. The results show a good correlation with the experimental ones.

Keywords: Recycled coarse aggregates; Pre-saturation; Natural coarse aggregates; Mechanical strengths; Shrinkage; Curing temperature; Durability; Numerical simulation.

ملخص

يتراكم اليوم جزء كبير من النفايات وقد يشكل مصدرا محتملا لمشاكل اقتصادية وبيئية كبيرة. من أجل الحفاظ على البيئة وعلى الموارد الطبيعية بشكل أفضل، تم تنفيذ العديد من مشاريع البحث، لاسيما في مجال مواد البناء. أحد الحلول الممكنة هو استخدام الحصى المعاد تدويره الذي تم الحصول عليه من المباني المهتمة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية و الديمومة للخرسانة المصنوعة من الحصى المعاد تدويره. يتم استبدال الحصى الطبيعي جزئياً أو كلياً بالحصى المعاد تدويره بنسب مئوية 0%، 25%، 50%، 75% و 100%. يتم تشبع الحصى المعاد تدويره مسبقاً قبل الاستخدام من أجل تحقيق نفس قابلية التشغيل لجميع الخرسانات المدروسة. وقد تم إجراء العديد من الاختبارات. أولاً، تم إجراء اختبارات ميكانيكية مثل مقاومة ضغط و الشد ومعامل المرونة لتقييم خصائص مقاومة الخرسانة، تم اختبار سرعة الموجات فوق الصوتية لدراسة اتصال المسامات في الخرسانة وجودتها. ثم اختبار الانكماش تحت ثلاث درجات حرارة علاج 20°C و 35°C و 50°C وأخيراً، تمت دراسة الديمومة عن طريق اختبارات الامتصاص عن طريق الغمر والشعيرية، واختبار نفاذية الماء وشوارد الكلور وتأثير الأحماض والكبريتات.

تشير النتائج المتحصل عليها إلى أن الخصائص الميكانيكية تتأثر سلباً بنسبة استبدال الحصى المعاد تدويره ويزداد الانكماش الكلي مع زيادة معدل استبدال الحصى المعاد تدويره ودرجة حرارة المعالجة. بالإضافة إلى أن الخرسانة المصنوعة من الحصى المعاد تدويره أقل متانة من الخرسانة العادية لتأثير الأحماض والكبريتات. ونتيجة لذلك، أظهرت النتائج أن الحصى المعاد تدويره يمكن أن تكون بديلاً لحصى الطبيعي، على الرغم من آثاره السلبية على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وديمومة الخرسانة. يمكن تجاهل هذه الآثار نظراً لمساهمتها في الجانب الاقتصادي والبيئي.

من ناحية أخرى، يتم استعمال تحليل العناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS للنتنبؤ بانكماش الخرسانة فيما يتعلق بالخصائص الحرارية والميكانيكية. ويقدر الانكماش بواسطة مبدأ النضج ونموذج التسلسلي على مرحلتين. توضح النتائج إلى الدقة الجيدة مع نتائج التجارب.

الكلمات المفتاحية: الحصى المعاد تدويره، الحصى الطبيعي، ما قبل التشبع، المقاومة الميكانيكية، الانكماش، درجة حرارة المعالجة، المتانة، المحاكاة العددية.

Table des matières

Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xv
Liste des symboles	xvi
Introduction générale	2
Chapitre 1 : Valorisation des déchets	7
1.1. Introduction	7
1.2. Origine de la production des déchets	9
1.3. Différents types de déchets	9
1.4. Gestion des déchets	10
1.5. Recyclage des déchets dans le monde	10
1.6. Chiffres mondiaux	12
1.6.1. Europe	12
1.6.2. Asie	13
1.6.3. Amérique	14
1.6.4. Algérie	14
1.7. Reglementation de l'utilisation des granulats recyclés	15
1.7.1. Allemagne	15
1.7.2. Danemark	15
1.7.3. Grande-Bretagne	16
1.7.4. RILEM	16
1.7.5. Japon	16
1.7.6. Australie	16
1.7.7. Chine	17
1.7.8. Hong Kong	17
1.8. Aspect économique	17
Chapitre 2 : Caractéristiques des granulats recyclés	20
2.1. Granulat recyclé	20
2.2. Granulats recyclés issus de déchets de démolition	20
2.3. Description du granulat recyclé	20
2.4. Processus de fabrication des granulats recyclés	21
2.5. Caractéristiques des granulats recyclés	22
2.5.1. Microstructure des granulats recyclés	22
2.5.2. Mortier attaché aux granulats recyclés	23
2.5.3. Relation entre le taux de mortier attaché et la taille des granulats	24
2.5.4. Relation entre le taux de mortier attaché et la qualité du béton parent	24
2.5.5. Méthodes de mesure de la quantité de mortier attaché aux GR	25

2.5.5.1. Traitement chimique	25
2.5.5.2. Traitement thermique	26
2.5.5.3. Traitement thermique et chimique	26
2.5.5.4. Production d'un nouveau béton	26
2.5.6. Résistance à l'abrasion.....	28
2.5.7. Granulométrie	30
2.5.8. Forme et texture des granulats recyclés	32
2.5.9. Densité.....	32
2.5.10. Absorption d'eau.....	33
Chapitre 3 : Influence des GR sur les propriétés des BGR	38
3.1. Influence des GR sur les propriétés du BGR frais	38
3.2. Influence des GR sur les propriétés du BGR durci	40
3.2.1. Densité du BGR	40
3.2.2. Zone de transition interfaciale (ITZ).....	41
3.2.3. Résistance à la compression.....	42
3.2.4. Résistance à la traction.....	48
3.2.5. Résistance à la flexion.....	48
3.2.6. Résistance au fendage	49
3.2.7. Module d'élasticité	51
3.2.8. Effet de la qualité du béton parent sur les propriétés mécaniques du BGR	54
3.3. Retrait des BGR	56
3.4. Fluage des BGR	59
3.5. Durabilité des BGR	59
3.5.1. Absorption capillaire	60
3.5.2. Perméabilité à l'eau.....	61
3.5.3. Carbonatation	62
3.5.4. Résistance à la pénétration des ions chlore	64
3.5.5. Résistance au gel-dégel	65
3.5.6. Résistance aux sulfates.....	66
3.5.7. Résistance aux acides	67
3.6. Effet des ajouts minéraux sur les propriétés du BGR	67
3.7. Techniques utilisées pour l'amélioration des performances des BGR.....	69
3.7.1. Amélioration de la qualité des GR	69
3.7.2. Ajustement du rapport eau/ciment	69
3.7.3. Modification de la composition du béton.....	69
3.7.4. Limitation de la quantité de GR	69
3.7.5. Utilisation des ajouts minéraux	70
3.7.6. Approche de durcissement prolongé	70

3.7.7. Saturation des granulats recyclés	70
3.7.8. Revêtement des GR par une poudre pouzzolanique.....	71
3.7.9. Méthode de malaxage en deux étapes	72
3.7.10. Approche de malaxage de mortier.....	73
3.7.11. Méthode d'auto-cicatrisation	74
3.7.12. Incorporation des fibres.....	74
3.7.13. Traitement mécanique du gravier recyclé	74
3.7.14. Technique de l'injection du CO ₂	75
3.7.15. Traitement biologique	76
3.8. Conclusion de la revue bibliographique	78
Chapitre 4. Matériaux et matériel d'essai	82
4.1. Introduction	82
4.2. Matériaux utilisés	82
4.2.1. Ciment	82
4.2.2. Eau de gâchage.....	83
4.2.3. Sable	83
4.2.4. Graviers	83
4.2.5. Quantité de mortier attaché aux granulats recyclés.....	85
4.3. Formulation des bétons	86
4.4. Essai sur les bétons frais.....	88
4.4.1. Masse volumique.....	88
4.4.2. Ouvrabilité et rhéologie des bétons	88
4.5. Essais sur les bétons durcis	90
4.5.1. Masse volumique du béton durci	91
4.5.2. Résistance à la compression.....	91
4.5.3. Résistance à la traction par flexion.....	92
4.5.4. Module d'élasticité.....	93
4.5.5. Essai d'auscultation dynamique	94
4.5.6. Retrait.....	96
4.5.7. Durabilité.....	98
4.5.7.1. Absorption par immersion.....	98
4.5.7.2. Absorption par capillarité.....	99
4.5.7.3. Perméabilité à l'eau	100
4.5.7.4. Essai de diffusion des ions chlore	101
4.5.7.5. Attaques chimiques externes.....	104
4.6. Conclusion.....	106

Chapitre 5 : Analyse des résultats expérimentaux.....	109
5.1. Introduction.....	109
5.2. Influence du gravier recyclé sur les propriétés du béton frais.....	109
5.2.1. Influence du GR sur la masse volumique du béton frais.....	109
5.2.2. Influence du GR sur la rhéologie des bétons.....	110
5.3. Influence du gravier recyclé sur les propriétés du béton durci.....	111
5.3.1. Influence du GR sur la masse volumique du béton durci.....	111
5.3.2. Influence du GR sur la résistance à la compression.....	112
5.3.3. Influence du GR sur la résistance à la traction par flexion.....	113
5.3.4. Influence du GR sur le module d'élasticité.....	114
5.3.5. Influence du GR sur les auscultations dynamiques.....	115
5.3.6. Influence du GR sur le retrait total.....	116
5.3.7. Influence de la température de cure sur le retrait total.....	119
5.3.8. Influence du gravier recyclé sur la durabilité du béton.....	121
5.3.8.1. Influence du GR sur l'absorption par immersion.....	121
5.3.8.2. Influence du GR sur l'absorption par capillarité.....	122
5.3.8.3. Influence du GR sur la perméabilité à l'eau des BGR.....	125
5.3.7.4. Influence des GR sur la perméabilité des BGR aux ions chlore.....	127
5.3.7.5. Attaque des BGR par les acides.....	129
5.3.7.6. Attaque des BGR par les sulfates.....	133
5.4. Conclusion.....	137
Chapitre 6 : Simulation numérique du retrait.....	139
6.1. Introduction.....	139
6.2. Equations du concept de maturité.....	139
6.3. Propriétés thermiques du béton.....	140
6.4. Propriétés mécaniques du béton.....	142
6.4.1. Résistance à la traction.....	142
6.4.2. Résistance à la compression.....	142
6.4.3. Module de Young.....	142
6.5. Conduction de transfert de chaleur.....	142
6.6. Analyse par méthodes des éléments finis.....	144
6.6.1. Condition aux limites.....	146
6.6.2. Résumé du processus de simulation.....	146
6.7. Validation du modèle numérique.....	147
Conclusion générale et perspectives.....	152
Références bibliographiques.....	157

Liste des figures

Figure 1. 1. Consommation mondiale des granulats (par région) [4].....	11
Figure 1. 2. Comparaison entre la production totale des granulats et des granulats recyclés de certains pays européens en 2015 [2].....	13
Figure 2. 1. Exemple de granulats recyclés [13].....	21
Figure 2. 2. Images MEB de spécimen de béton après 28 jours (a) 0 % GR; (b) 20 % GR; (c) 50 % GR; (d) 100 % GR [17].....	22
Figure 2. 3. Détail d'un granulats recyclés [21].....	23
Figure 2. 4. Quantité de mortier attaché en fonction de la taille des granulats [21].....	24
Figure 2. 5. Quantité de mortier attaché selon différentes méthodes de mesure [21].	27
Figure 2. 6. Relation entre la teneur en mortier attaché et l'abrasion de Los Angeles [21].....	29
Figure 2. 7. Analyse granulométrique des granulats [18].....	31
Figure 2. 8. Proportion pour différentes fractions granulaires avant et après la pré-saturation avec $W = 11 \%$ pendant 2 semaines [47].....	31
Figure 2. 9. Relation entre la teneur en mortier attaché et la masse volumique des GR [21].	33
Figure 2. 10. Relation entre l'absorption du GR et la quantité de mortier attaché [21].....	34
Figure 2. 11. Capacité d'absorption totale des GR dans les 60 min [18].....	35
Figure 3. 1. Variation des paramètres rhéologique du béton sans superplastifiant en fonction du taux de GR ($E/C = 0.6$) [68].....	40
Figure 3. 2. Densité spécifique du BGR en fonction des quantités de GR [16, 35, 72, 88, 89].	41
Figure 3. 3. Illustration des différentes ITZ dans un GR [92].	41
Figure 3. 4. Résistance à la compression en fonction de la teneur en GR [93].	43
Figure 3. 5. Résistance à la compression du béton en fonction du taux de GR [17].	44
Figure 3. 6. Variation de la résistance à la compression du béton avec le taux de GR pour différentes conditions d'humidité initiales [97].	46
Figure 3. 7. Relation entre l'abrasion et la résistance à la compression de béton parent [21].	47
Figure 3. 8. Résultats de résistance à la flexion [93].....	49
Figure 3. 9. Evolution de la résistance au fendage en fonction du taux de GR [95].	50
Figure 3. 10. Module d'élasticité des BGR en fonction du taux de GR [53, 55, 64, 87, 112].....	52

Figure 3. 11. Module d'élasticité du béton en fonction du taux de GR de brique et tuile [117].....	53
Figure 3. 12. Effet de la quantité de mortier attaché sur le module élasticité [27].....	54
Figure 3. 13. Influence de la résistance du béton parent sur la résistance du BGR [60].....	55
Figure 3. 14. Retrait du béton avec différents granulats recyclés.....	58
Figure 3. 15. Retrait des bétons à base de granulats de béton concassé [59].	59
Figure 3. 16. Absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés [59].	60
Figure 3. 17. Evolution du taux d'absorption en fonction du taux de GR à 28 jours [17].....	61
Figure 3. 18. Variation de la pénétration d'eau des bétons recyclés [59].....	62
Figure 3. 19. Profondeur de carbonatation du BGR en fonction de la resistance du béton et du taux de GR [138].....	63
Figure 3. 20. Profondeur de carbonatation du BGR en fonction du taux de GR [17].	63
Figure 3. 21. Processus de revêtement des GR avec la PP [36].	71
Figure 3. 22. Procédure de malaxage en deux étapes proposée par Abd Elhakam <i>et al.</i> [83].....	72
Figure 3. 23. Procédure de malaxage en deux étapes proposée par Tam <i>et al.</i> [82].	72
Figure 3. 24. Approche du mélange de mortier [169].	73
Figure 3. 25. Carbonatation des granulats recyclés	75
Figure 3. 26. Traitement des GR par bio-précipitation: (a) immersion (b) pulvérisation.	77
Figure 3. 27. Résumé de l'influence des GR sur les propriétés du BGR.	79
Figure 4. 1. Processus de production du gravier recyclé.....	84
Figure 4. 2. Analyse granulométrique des granulats.	84
Figure 4. 3. Méthode de la dissolution dans l'acide Chloridrique.....	85
Figure 4. 4. Méthode de l'expansion thermique.....	86
Figure 4. 5. Séchage de l'eau adsorbée des GR pré-saturés à l'aide d'un chiffon absorbant.	87
Figure 4. 6. Essai d'affaissement.....	88
Figure 4. 7. Rhéomètre à béton.	89
Figure 4. 8. Vibration des éprouvettes à l'aide d'une table vibrante.....	90
Figure 4. 9. Mode de conservation des éprouvettes.	91
Figure 4. 10. Essai de compression simple.....	92

Figure 4. 11. Essai de traction par flexion trois points.....	93
Figure 4. 12. Dispositif de mesure du module d'élasticité.....	94
Figure 4. 13. Surfaçage au soufre des éprouvettes cylindriques.....	94
Figure 4. 14. Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion.....	95
Figure 4. 15. Conservation des éprouvettes dans une étuve.....	96
Figure 4. 16. Chronologie de mesure du retrait.....	97
Figure 4. 17. Essai d'absorption par immersion.....	99
Figure 4. 18. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	100
Figure 4. 19. Essai de perméabilité à l'eau.....	101
Figure 4. 20. Ensemble de l'essai de perméabilité aux ions chlore.....	103
Figure 4. 21. Essai de perméabilité aux ions chlore [203].	104
Figure 4. 22. Immersion des éprouvettes dans les solutions agressives.....	105
Figure 4. 23. Mesure de l'expansion.....	106
Figure 5. 1. Masse volumique des bétons frais en fonction du taux de GR.....	109
Figure 5. 2. Paramètres rhéologiques des bétons testés.....	110
Figure 5. 3. Masse volumique des bétons durcis à 28 jours en fonction du taux de GR.....	111
Figure 5. 4. Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de GR.....	113
Figure 5. 5. Résistance à la flexion des bétons en fonction du taux de GR.....	114
Figure 5. 6. Module d'élasticité des bétons testés à 28 jours en fonction du taux de GR.....	115
Figure 5. 7. Vitesse ultrasonique des bétons à 28 et 90 jours en fonction du taux de GR.....	116
Figure 5. 8. Influence du GR sur le retrait total à différentes températures de cure.....	118
Figure 5. 9. Influence de la température de cure sur le retrait total des bétons.....	120
Figure 5. 10. Absorption par immersion des bétons en fonction du taux de GR.....	122
Figure 5. 11. Absorption capillaire des bétons à 28 et 90 jours.....	124
Figure 5. 12. Effet des GR sur la sorptivité des BGR à 28 et 90 jours.....	125
Figure 5. 13. Profondeur de pénétration d'eau en fonction du taux de GR.....	127
Figure 5. 14. Charge moyenne de pénétration des ions chlore.....	128
Figure 5. 15. Pourcentage de perte de masse des éprouvettes immergées dans 1 % HCl.....	131

Figure 5. 16. Pourcentage de perte de masse des éprouvettes immergées dans 3 % H ₂ SO ₄	131
Figure 5. 17. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 1 % HCl.....	132
Figure 5. 18. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 3 % H ₂ SO ₄	132
Figure 5. 19. Expansion des éprouvettes immergées dans 5 % MgSO ₄	135
Figure 5. 20. Expansion des éprouvettes immergées dans 5 % Na ₂ SO ₄	135
Figure 5. 21. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 5 % MgSO ₄	136
Figure 5. 22. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 5 % Na ₂ SO ₄	136
Figure 6. 1. Modèle à deux phase en série [239].....	141
Figure 6. 2. Eléments structurel et thermique [246, 250] : (a) SOLID65; b) SOLID70.....	145
Figure 6. 3. Conditions aux limites (a) Analyse thermique transitoire (b) Analyse structurelle.	146
Figure 6. 4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux du retrait total.....	148

Liste des tableaux

Tableau 1. 1. Classification des graviers recyclés selon la DG/TJ08-2018-2007.....	17
Tableau 1. 2. Comparaison entre la méthode classique et la méthode de recyclage [14].	18
Tableau 2. 1. Taux de mortier attaché aux GR dans la littérature.....	28
Tableau 2. 2. Résultats de l'essai d'abrasion des GN et GR obtenus par différents chercheurs.	30
Tableau 2. 3. Absorption d'eau des granulats naturels et recyclés (%).	36
Tableau 3. 1. Variation de la résistance à la compression des BGR à 28 jours.	47
Tableau 4. 1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.....	82
Tableau 4. 2. Caractéristiques des granulats utilisés.	85
Tableau 4. 3. Formulation des différents mélanges.	87
Tableau 4. 4. Paramètres d'études.	97
Tableau 4. 5. Valeurs limites de l'essai de perméabilité à l'eau [201].	101
Tableau 4. 6. Techniques de mesure de la pénétration des chlorures dans le béton [202].	102
Tableau 4. 7. Evaluation de la perméabilité aux ions chlore du béton [203].	103
Tableau 6. 1. Eléments thermique et structurel utilisés en simulation numérique.	144
Tableau 6. 2. Propriétés thermiques et mécaniques des bétons pour la simulation numérique.	145
Tableau 6. 3. Valeurs expérimentales et numériques du retrait total des éprouvettes à 20 °C.....	149
Tableau 6. 4. Valeurs expérimentales et numériques du retrait total des éprouvettes à 35 °C.....	149
Tableau 6. 5. Valeurs expérimentales et numériques du retrait total des éprouvettes à 50 °C.....	150

Liste des symboles

C & D	Construction et démolition
GR	Granulat recyclé
GN	Granulat naturel
BGR	Béton à base de granulats recyclés
BGN	Béton à base de granulats naturels
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton à hautes performances
Ca(OH) ₂	Portlandite (Chaux)
CSH	Calcium de silicates hydratés
ITZ	Zone de transition interfaciale
E/C	Rapport eau/ciment
Na ₂ SO ₄	Sulfate de sodium
MgSO ₄	Sulfate de magnésium
HCl	Acide chlorhydrique
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
NaOH	Hydroxyde de sodium
NaCl	Chlorure de sodium

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde après l'eau et le plus communément utilisé dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, en raison de son faible coût, sa bonne durabilité, la disponibilité de ses matériaux constitutifs, sa facilité de façonnage à toute forme, etc. L'industrie de la construction est l'un des plus gros consommateurs d'agrégats naturels. Chaque année, 15 milliards de tonnes de béton sont produites dans le monde, soit 2 tonnes de béton par habitant et par an [1]. Les granulats représentent en général 60 à 80 % de la composition du béton, de très grandes quantités sont donc nécessaires pour de la construction d'ouvrages de génie civil.

La croissance démographique, le développement industriel continu, la construction de routes, de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil créent d'énormes quantités de déchets de construction & démolition (C & D). Le secteur de la construction est un grand consommateur de ressources naturelles et la production globale a presque doublé, passant de 21 milliards tonnes en 2007 à 40 milliards tonnes en 2014 [2]. Des pays comme la Chine, l'Inde, l'Indonésie, la Malaisie, la Thaïlande, les États du Golfe, la Turquie, la Russie, le Brésil et le Mexique ont enregistré une des plus fortes augmentations de la demande de recyclage des déchets. Par conséquent, l'épuisement progressif des ressources naturelles et la production importante des déchets ont donné lieu à une demande progressive du recyclage et de la réutilisation des déchets de C & D dans les projets de génie civil.

En parallèle, la démolition de structures en béton produit de grandes quantités de déchets et pourraient être recyclés sous forme de granulats de béton afin de diminuer les quantités de granulats naturels utilisés.

La protection de l'environnement est un élément fondamental, qui est directement liée à la survie de l'être humain. Paramètres comme l'environnement, la protection de la nature, le développement durable jouent un rôle important dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction.

Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Ces structures de génie civil ayant une durée de vie limitée et la disposition des rebus de démolition et de réparation des structures de génie civil représente un défi considérable. Le recyclage des

déchets C & D en tant que source de granulats pour la production de béton, a attiré des intérêts croissants de l'industrie du bâtiment.

La production des granulats recyclés s'est développée au début des années 80, elle répond au besoin d'une autre source de granulats et de la réduction des volumes de déchets. L'utilisation des granulats recyclés dans les bétons présente plusieurs avantages tant au niveau environnementale, humain, technologique qu'économique.

Dans ce contexte, l'utilisation de granulats recyclés devient une alternative incontournable, tant au niveau économique qu'environnemental. Actuellement, la valorisation des déchets C & D a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et connaît un développement assez important et le taux de recyclage a atteint dans certains pays les 80 %.

Le recyclage des granulats issus des matériaux de démolition semble être une solution idéale, la plus prometteuse pour les problèmes de gestion des déchets de C & D. Il a connu une grande évolution dans les pays développés, répond aux soucis de manque de granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages de gravats.

Dans le monde, le processus d'utilisation des déchets de C & D varie d'un pays à l'autre et il existe d'énormes variations dans le niveau d'utilisation de ces déchets, par exemple Brésil (6.14 %), Danemark (94 %), Pays-Bas (98 %) [2]. Cette variation est due à de grandes différences dans les traditions de construction et à la législation sur l'utilisation des déchets de C & D.

En Algérie, bien qu'une partie importante de matériaux de construction puisse être remplacée par des déchets de C & D, cette alternative n'est pas encore envisagée, en raison d'absence de cadre juridique et de norme relatifs à la gestion des déchets et le manque d'intérêt de la part des entreprises de construction, des industriels et des bureaux d'études de cette technologie, et du manque de centres de tri et de recyclage des déchets inertes de C & D. On s'attend à ce que l'utilisation des granulats recyclés devienne une partie substantielle du marché dans le futur proche. Cependant, le nombre trop insuffisant de décharges et l'incivisme de certains citoyens, ont favorisé la création de dépôts anarchiques le long des routes, des rives des oueds et à proximité des espaces verts.

Jusqu'à présent, seule une petite fraction de ces matériaux est réutilisée pour la fabrication de béton et une meilleure compréhension des propriétés des granulats recyclés et des bétons à

base de granulats recyclés permettrait de réduire les quantités de déchets à valoriser qui sont éliminés dans des décharges et, par conséquent, préserveraient les ressources naturelles.

La plupart des études se sont focalisées sur les propriétés mécaniques des bétons à base de granulats recyclés (BGR) et de nombreuses études confirment la même influence des GR sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la densité, l'ouvrabilité, la perméabilité des BGR. Par contre, peu d'études se sont concentrées sur des paramètres qui influencent les performances des BGR à long-terme, tels que le retrait, le fluage et la résistance aux sulfates et aux acides.

Les objectifs de cette recherche sont doubles. Dans un premier temps, nous visons à étudier les principales propriétés physiques des granulats recyclés utilisés pour la confection des bétons. Deuxièmement, l'influence des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton frais et durci, en particulier leur effet sur le retrait de séchage sous différentes températures de cure. Les travaux ont été réalisés au niveau du laboratoire des sciences des matériaux en environnement (LSME) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef. Le gravier recyclé utilisé provient du concassage d'un béton fabriqué avec la même composition que le béton utilisé dans cette étude.

La thèse est composée de deux parties distinctes, une synthèse bibliographique et un travail expérimental.

La première partie est une synthèse bibliographie composée de trois chapitres. Le chapitre 1 est consacré à une revue sur la valorisation des déchets à travers le monde.

Le deuxième chapitre est consacré à une revue sur les caractéristiques des granulats recyclés.

Le troisième chapitre fait l'objet de l'influence des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques du béton.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les matériaux utilisés dans notre étude pour confectionner des bétons de granulats recyclés. Une étude complète des caractéristiques des granulats recyclés est présentée.

Dans le cinquième chapitre, une valorisation des granulats recyclés issus des bétons préalablement préparés au laboratoire sera mise en évidence. Ce chapitre s'attachera à l'influence du gravier recyclé ainsi que le taux de substitution de ce gravier sur les propriétés physico-mécanique et sur la durabilité des bétons. On s'intéresse à l'étude de la compression,

la traction par flexion, le module d'élasticité, le retrait, l'absorption, la pénétration des ions chlore et l'attaque par les agents agressifs (acides et sulfates).

Le sixième chapitre est consacré à une étude numérique par la méthode des éléments finis du retrait des bétons testés en utilisant le logiciel ANSYS et une comparaison avec les résultats expérimentaux.

Nous terminerons la thèse par les principales conclusions des résultats obtenus et des perspectives aux travaux futurs.

Chapitre 1 :

Valorisation des déchets

Chapitre 1 : Valorisation des déchets

1.1. Introduction

Depuis le début des années 1990, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation collective. Chaque année les activités du bâtiment et des travaux publics produisent des centaines de millions de tonnes de déchets de démolition, qui dans le cas général sont des déchets inertes. Leur réutilisation dans un contexte d'économie de la ressource naturelle a vite été considérée comme une priorité pour le développement durable.

Par ailleurs, le béton consomme presque 75 %, en poids de matériaux de construction utilisés dans le génie civil en général en plus des quantités fournies par les sinistres, ce qui résulte que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. De ce fait, la maîtrise de la gestion des déchets du bâtiment et des travaux publics participe activement à la protection de l'environnement.

L'utilisation généralisée des granulats naturels dans les activités de construction, conjuguée à l'augmentation de la population mondiale, a entraîné un épuisement de cette ressource naturelle. La réutilisation des déchets de construction et de démolition dans la préparation du béton serait une bonne solution à ce problème.

L'utilisation de granulats recyclés peut minimiser l'impact sur l'environnement et ralentir la consommation énorme de ressources naturelles utilisées pour les applications concrètes. Les granulats recyclés diffèrent principalement des granulats naturels, ils sont composés de deux matériaux de nature différente: granulats naturels et mortier de ciment qui s'y rattachent. Ce dernier matériau est à l'origine des propriétés différentes et pires des granulats recyclés: densité faible, absorption plus élevée, abrasion plus élevée. Ces propriétés ont une influence néfaste sur la qualité du béton recyclé, affectant principalement les résistances mécaniques, les propriétés liées à la déformation (retrait et fluage) ainsi que la durabilité.

Après la démolition de vieux bâtiments, le béton enlevé est souvent considéré comme inutile et éliminé comme déchet de démolition. En collectant le béton usagé et en le décomposant, un granulats de béton recyclé (GR) est créé. L'une des principales raisons d'utiliser les GR dans le béton structurel est de rendre la construction plus «verte» et écologique, en réutilisant les déchets et en empêchant l'exploitation des granulats naturels.

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être de béton démolé (déchets des éprouvettes écrasés dans laboratoire, déchets du bâtiment, des plates-formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton, etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits "Granulats Recyclés" GR, et le béton fabriqué à base de ces granulats est dit : "Béton de Granulats Recyclés" BGR.

L'utilisation généralisée des granulats naturels dans les activités de construction, associée à l'augmentation de la population mondiale, a entraîné un épuisement de cette ressource naturelle et une augmentation progressive de ses distances de transport. Donc, l'utilisation des granulats recyclés est une étape importante vers le développement durable dans l'industrie du béton et la gestion des déchets de construction. Les granulats recyclés est une alternative viable aux granulats naturels, ce qui contribue à la préservation de l'environnement.

Les principaux objectifs d'utilisation des déchets sont :

- Réduire la production des déchets;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- Réduire : regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets;
- Réutiliser : regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- Recycler : désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Plusieurs avantages économiques et environnementaux pourraient être obtenus si les granulats recyclés sont utilisés :

- Economiques en raison de la rentabilité de l'obtention de granulats recyclés, en particulier dans les pays ayant des coûts élevés d'élimination des déchets, et les terres rares.
- Réduction considérable des déchets d'enfouissement; le béton est un matériau non organique et ne se décompose pas avec le temps.
- Réduction des émissions de dioxyde de carbone pendant la production globale de 23 % à 28 %, réduisant ainsi la quantité de déchets rejetés dans les installations d'élimination.

1.2. Origine de la production des déchets

La production des déchets est inévitable pour les raisons suivantes :

- Biologique : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- Chimique : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès qu'on veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième;
- Technologique : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- Economique : les produits ont une durée de vie limitée ;
- Ecologique : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- Accidentelle : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

1.3. Différents types de déchets

Les déchets C & D sont divisés en cinq fractions principales, à savoir le métal, le béton et les minéraux, le bois, les fractions mixtes diverses et non triées. Plus précisément, ils peuvent contenir :

- Béton
- Briques, tuiles et céramiques
- Bois
- Verre
- Plastique
- Mélanges bitumineux et goudrons
- Métaux (ferreux et non ferreux)
- Sols (contaminés) et pierres
- Matériaux d'isolation (y compris l'amiante)
- Matériaux à base de gypse (y compris les plaques de plâtre)
- Déchets d'équipements électroniques et électriques
- Produits chimiques (y compris les solvants)
- Matériaux d'emballage
- Substances dangereuses.

1.4. Gestion des déchets

C'est dans ce contexte, que le monde s'est penché, il y a une cinquantaine d'années sur le problème de gestion des déchets. S'il n'est pas possible de supprimer la production de déchets, sous-produits ou résidus industriels ou urbains, il convient alors de définir les meilleures conditions de valorisation.

Les déchets doivent être gérés dans les conditions nécessaires pour en limiter les effets négatifs sur l'air, le sol, la flore, la faune, éviter les inconvénients par le bruit et les odeurs d'une façon générale, éviter de porter atteinte à l'environnement et à la santé de l'homme. La gestion des déchets doit être effectuée prioritairement par la voie de la valorisation ou, à défaut, par la voie de l'élimination.

1.5. Recyclage des déchets dans le monde

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. L'un des exemples qui illustre ce procédé est celui de la fabrication de bouteilles neuves avec le verre de bouteilles usagées. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Certains procédés sont simples et bon marché, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 1970, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés. La valorisation des déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation et connaît un développement assez important.

En 2005, la production de matériaux recyclés sous forme de granulats représentait 60 % de la production totale de granulats utilisés dans le domaine du BTP. Le principe de recyclage se met cependant petit à petit en place. Le traitement des déchets de démolition représente aujourd'hui une vraie industrie, mais dont le profit dépend fortement de l'environnement technique, économique, géologique et politique de la zone dans laquelle elle opère [3].

Au cours de la présente décennie, l'Asie, la Russie et les pays d'Amérique du Sud se sont révélées être l'un des plus grands producteurs de granulats, en raison de leurs projets de construction en BTP et TP, en particulier en Chine, Inde, Indonésie, en Malaisie, en Thaïlande, États du Golfe, Turquie, Russie, Brésil et Mexique. La Chine à elle seule

représente la moitié de la nouvelle demande globale dans le monde au cours des périodes 2010-2015. Les estimations de la consommation globale de granulats par région sont présentées sur la figure 1.1 [4].

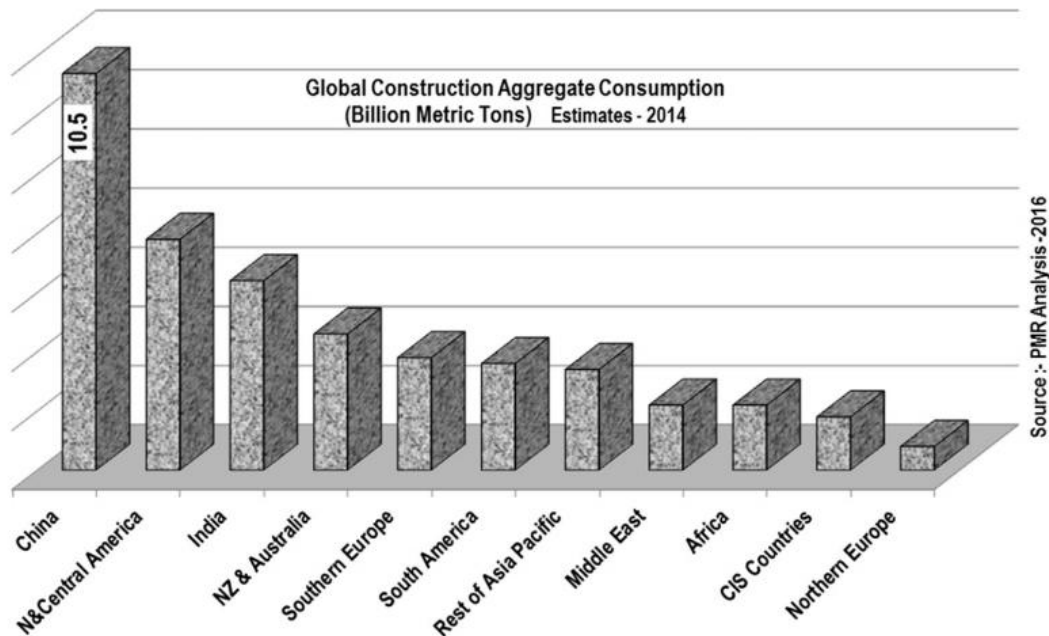


Figure 1. 1. Consommation mondiale des granulats (par région) [4].

L'évolution de l'industrie de la construction soulève plusieurs préoccupations concernant la disponibilité des ressources naturelles agrégées, car elles sont rapidement épuisées. Les statistiques récentes montrent une demande croissante de granulats de construction pour atteindre 48.3 milliards de tonnes en 2015. Cette demande croissante s'accompagne d'une augmentation des déchets de construction. Par exemple, les déchets de construction des pays de l'Union européenne représentent environ 31 % de la production totale de déchets par an. De même, à Hong Kong, la production de déchets a atteint près de 20 millions de tonnes en 2011, ce qui représente environ 50 % de la production mondiale de déchets. L'élimination dans les décharges est la méthode courante pour gérer les déchets de construction, ce qui crée de grands dépôts de chantiers de C & D.

1.6. Chiffres mondiaux

Les premiers essais sur le recyclage des bétons ont débuté aux USA et au Japon à la fin des années 1970. L'Europe, les Etats-Unis et le Japon produisent chaque année environ 900 millions de tonnes de déchets de C & D. Comme la Chine et l'Inde produisent maintenant plus de 50 % du béton mondial, leurs déchets de béton seront aussi considérables.

1.6.1. Europe

Dans les pays développés, les premières initiatives pour recycler les déchets de C & D ont commencé dans les années 1980. En Europe, le taux de recyclage varie du minimum (comme au Portugal) jusqu'à 95 % en Suisse, en passant par la France, avec 63 %, mais dépassée par les 80 % de l'Allemagne. Certains pays recyclent presque tout leur béton, comme la Suisse.

En Allemagne, l'association fédérale de la qualité pour les matériaux de construction recyclés a été créée en 1984 à Berlin. La principale fonction de cette association était d'unir les principales entreprises de recyclage en Allemagne et en 2006, elle est devenue le siège de l'Association européenne de la qualité pour le recyclage. Depuis lors, des progrès considérables ont été accomplis dans la gestion des déchets de C&D, en particulier en Australie, en Europe occidentale et en Amérique du Nord.

En France, ce n'est qu'à la fin des années 1980 qu'est née, en région parisienne, l'idée de transformer les blocs de béton en matériaux valorisables dans les travaux publics. Elle consiste à broyer le béton, comme on le ferait avec une roche, afin d'en extraire un grave (mélange de sables et de gravier). Le matériau ressemble à celui utilisé dans une carrière de roche massive classique. A partir de 2012, la réglementation exige d'éliminer complètement le béton des décharges, une obligation déjà en vigueur dans les pays scandinaves.

La génération des déchets de C & D dans l'union européenne atteint 850 millions de tonnes en 2008, ce qui représente 31 % de la production totale de déchets dans l'UE [5]. Etant donné que la population totale de l'UE est de 500 millions, la production annuelle de C & D par habitant dans l'UE est d'environ 1.7 tonne. La figure 1.2 montre que la plupart des pays de l'Europe du nord ont un pourcentage de recyclage supérieur à 60 %. Le Danemark, les Pays-Bas, l'Allemagne recyclent près de 90 %, tandis que le Royaume-Uni et la France ne recyclent que 60 %.

Dans l'Union européenne, le niveau de recyclage et de valorisation des matériaux issus des déchets C & D fluctuait entre 1 et 22 % avec des différences significatives selon les pays. Les principaux utilisateurs sont le Royaume-Uni, les Pays-Bas, la Belgique, la France et l'Allemagne, comme le montre la figure 1.2 [2].

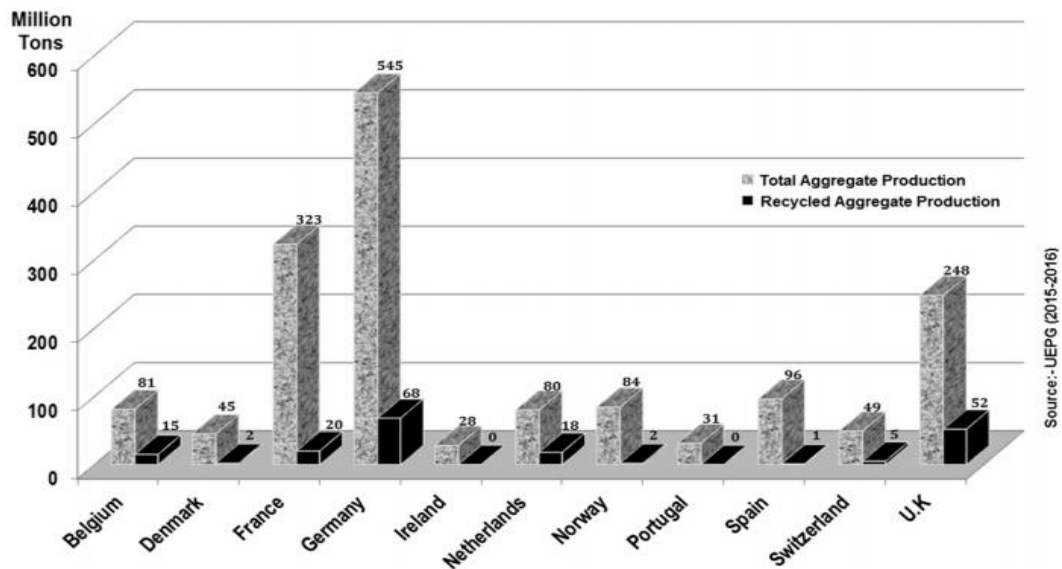


Figure 1. 2. Comparaison entre la production totale des granulats et des granulats recyclés de certains pays européens en 2015 [2].

Au Royaume-Uni, les quantités de granulats recyclés produites ont augmenté progressivement et sont utilisées dans un large éventail d'applications de construction. En 1980, l'utilisation estimée granulats recyclés était de 20 millions tonnes par an, en 2015, l'utilisation a augmenté à 71 millions de tonnes par an mais a diminué à 52 millions de tonnes par an en 2009, ce qui représente 26 % du total des granulats utilisés au Royaume-Uni [6].

1.6.2. Asie

En Chine, la production de recyclât provient de la démolition des constructions et de la démolition issues des tremblements de terre et des catastrophes naturelles. Par exemple, le tremblement de terre de Wenchuan qui s'est produit en 2008 dans la province du Sichuan a tué 90 000 personnes et a causé environ 380 millions de tonnes de déchets de C & D [7]. La quantité de déchets de C & D a atteint 239 millions de tonnes en 2010. En raison de la construction et développement rapide, environ 820 millions de tonnes de ciment et 8 milliards de tonnes de granulats sont consommés pour satisfaire cette grande demande. La réutilisation

et le recyclage en Chine sont moins développés que dans l'UE, et la plupart des déchets de C & D sont déversés dans des sites d'enfouissement [8].

A Taiwan, un plan complet de gestion des déchets de C&D a été lancé en 1999, après le terrible tremblement de terre dans le centre de Taiwan qui a causé de graves dommages structurels à environ 100 000 logements [9]. On s'attendait à ce que des déchets C & D de plus de 30 millions de tonnes soient générés lors de la réhabilitation des structures endommagées. Des usines recyclent environ 80 % du matériel utilisé dans les sites d'enfouissement et 30 % du matériel utilisé comme base routière à Taiwan.

Le Japon est un pays leader dans le recyclage des C & D et a mis en œuvre un recyclage de 98 % et l'utilise pour des applications de béton structurel [2].

1.6.3. Amérique

Au Québec, 4.6 millions de tonnes de C & D ont été générées en 2008. De ce volume, 74 % ont été récupérées. L'industrie québécoise se démarque par son dynamisme. Réunie depuis 1997 au sein d'une association, le regroupement des récupérateurs et des recycleurs de matériaux de C & D du Québec (3R MCDQ) pose des gestes concrets pour l'avancement de la récupération, du recyclage, de la valorisation et du réemploi. Dans ce contexte, le centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) a réalisé une recherche en matière de recyclage des bétons (bétons, briques et asphalte), incluant les moyens mis en place pour favoriser la valorisation, les principales utilisations faites des matières, etc., afin d'obtenir une meilleure connaissance des façons de faire à l'extérieur du Québec.

1.6.4. Algérie

En Algérie, en plus du déficit important (10 à 20 %) connu ces dernières années en granulats, les déchets de construction et de démolition sont importants et rarement valorisés; une seule tentative de valorisation dans ce domaine a été entreprise à El-Asnam (Chlef actuellement) à la suite du tremblement de terre de 1980 en collaboration avec le Centre Scientifique et Technique de Construction Belge (CSTC) [10]. Selon les données sur la gestion des déchets solides en Algérie (avril 2014), la production de déchets de C & D est estimée à 11 millions de tonnes/an. Ces derniers peuvent présenter un gisement valorisable rentable. Malheureusement, le processus d'industrialisation et de développement urbain ne s'est effectué qu'au début des années 2010 sans que les précautions environnementales ne soient réellement prises en considération.

1.7. Réglementation de l'utilisation des granulats recyclés

Dans le monde entier, plusieurs codes et réglementations concernant l'utilisation des granulats recyclés dans des applications pratiques sont disponibles, parmi lesquels des documents provenant de pays tels que le Japon, Hong Kong, le Portugal, le Brésil, l'Union européenne et l'Australie. Dans ces pays, l'élimination des déchets de C & D représente un problème crucial en raison de l'expansion urbaine rapide, de l'industrialisation, de la rareté des zones d'enfouissement et des réglementations environnementales strictes. On présente les normes des différents pays du monde pour la réglementation et l'utilisation des granulats recyclés produits.

La plupart des normes limitent le niveau de substitution des sables recyclés de 0 % à 20 % et des graviers recyclés de 20 % à 100 % selon la qualité des granulats recyclés, la classe de résistance du béton et les conditions d'exposition environnementale.

1.7.1. Allemagne

La norme allemande DIN 4226-100 classe les GR en quatre catégories en fonction de la densité apparente et l'absorption d'eau maximale. Des limites sont fixées pour les granulats recyclés fins et grossiers en fonction des conditions d'exposition et du type de GR.

- Classe 1 : Composé principalement de déchets de béton (≥ 90 %).
- Classe 2 : Le constituant majeur de ce type béton provient de la démolition des bâtiments, avec une partie de la maçonnerie qui peut être incluse.
- Classe 3 : Il comprend la maçonnerie qui est le composant essentiel (≥ 80 %), avec une partie de béton, qui doit être également incluse.
- Classe 4 : Scénario d'un centre de recyclage où on peut trouver un peu de tous les matériaux, mais le béton est le composant dominant.

1.7.2. Danemark

La norme danoise DS 2426 - EN 206-1 recommande que le GR peut être utilisé pour le béton armé et non armé avec des résistances à la compression jusqu'à 40 MPa dans des conditions environnementales modérées et passives.

1.7.3. Grande-Bretagne

La norme britannique BS 8500 spécifie que les granulats recyclés du béton peuvent être utilisée dans le béton B25 jusqu'à B50 avec un maximum de 20% de granulats recyclés grossiers dans la plupart des classes d'exposition.

1.7.4. RILEM

RILEM [11] a classé les GR en trois types. Ces recommandations suggèrent des valeurs maximales admissibles pour les impuretés des GR.

- Type I : composé principalement de gravats de maçonnerie.
- Type II : composé principalement de gravats de béton.
- Type III : qui consiste en un mélange de granulats recyclés (max. 20 %) et de granulats naturels (min. 80 %).

1.7.5. Japon

Le Japon a une histoire de plus d'un siècle de recherche sur la réutilisation des granulats recyclés pour la confection du béton. Trois classes de BGR sont définis selon la norme japonaise JIS A5021 [12] : "Normal", "Chloride controlled" et "Flexible use". Le béton recyclé "normal" est utilisé pour le remplissage de béton et le béton de nivellement qui ne sont pas des éléments structurels où une résistance élevée et une grande durabilité ne sont pas nécessaires. Le béton recyclé "contrôlé par des chlorures" est utilisé de la même manière que le béton "normal", mais pour les éléments à renforcement métallique. Le béton recyclé "utilisation flexible" est utilisé pour une plus large gamme, parfois à usage structurel.

Les normes japonaises limitent l'utilisation des granulats recyclés dans le béton ayant une résistance de calcul supérieure à 18 MPa et n'impose aucune exigence quant à leur origine. Une quantité de granulats recyclés allant jusqu'à 30 % de la masse totale des granulats est autorisée [13].

1.7.6. Australie

La norme australienne Cement Concrete & Aggregate Australia (CCAA) a classé les granulats recyclés en cinq types, granulats de béton recyclé, béton recyclé et maçonnerie, régénérés granulats de revêtement en asphalte régénéré et granulats d'asphalte récupéré. Cependant, les granulats de béton recyclé est les déchets de C & D le plus utilisé dans la production de béton.

1.7.7. Chine

La première norme pour le béton de granulats recyclés en Chine est le code technique sur l'application du béton recyclé publié en 2007 à Shanghai (DG/TJ08-2018-2007). Dans ce code, seul le GR grossier (taille minimale de 5 mm) est autorisé à être utilisé dans le béton recyclé. En termes de densité, d'absorption d'eau et de teneur en maçonnerie, deux classes de GR sont définies dans le tableau 1.1.

Tableau 1. 1. Classification des graviers recyclés selon la DG/TJ08-2018-2007.

	Type 1	Type 2
Densité apparente (kg/m ³)	≥ 2400	≥ 2200
Absorption d'eau (%)	≤ 7	≤ 10
Taux de maçonnerie	≤ 5	≤ 10
indice de fragilité	≤ 15	
valeur d'écrasement	≤ 30	
Impureté (%)	≤ 1	

1.7.8. Hong Kong

La norme WBTC 12/2002 limite l'utilisation des graviers recyclés à 20 % pour le béton B35 et 100 % pour le B20. Les spécifications donnent des limites sur certaines propriétés des granulats telles que la densité sèche, l'absorption d'eau et la granulométrie.

La résistance à la compression du béton sur cubes à 28 jours doit être supérieure à 20 MPa. En ce qui concerne l'ouvrabilité du béton, seuls les granulats recyclés pré-saturés peuvent être utilisés. Il est recommandé que l'affaissement du béton de granulats recyclés soit supérieur ou égal à 75 mm au moment du coulage.

1.8. Aspect économique

Tam [14] a réalisé une étude économique en comparant les coûts et bénéfices engendrés par la méthode classique de production de granulats et par la méthode de recyclage (Tableau 1.2). Il convient de souligner que la méthode de recyclage du béton est plus avantageuse que la méthode classique. Il a démontré que les granulats recyclés sont économiquement plus intéressants à long-terme que les granulats naturels, mais leur disponibilité affecte la viabilité de cette méthode. La méthode de recyclage du béton fournit un bénéfice net positif d'environ

+30 916 000 \$/an, tandis que la méthode classique fournit un bénéfice net négatif d'environ -44 076 000 \$/an.

Mais, l'un des facteurs affectant la viabilité des producteurs de granulats recyclés est la disponibilité des matières premières. En effet, si les déchets de C & D ne sont pas toujours disponibles et quand les producteurs de granulats recyclés échouent à fournir la quantité souhaitée, alors les granulats naturels redeviennent la source d'approvisionnement numéro un.

Tableau 1. 2. Comparaison entre la méthode classique et la méthode de recyclage [14].

	Méthode actuelle (\$/an)	Méthode recyclage (\$/an)
Coût total	44 097 000.16	6 738 000.06
Bénéfice total	20 000.30	37 654 000.61
Bénéfice net	-44 076 000.84	+30 916 000.55

Chapitre 2 :
Caractéristiques des granulats recyclés

Chapitre 2 : Caractéristiques des granulats recyclés

2.1. Granulat recyclé

Dans le cadre de cette revue bibliographique, il est nécessaire de bien définir le terme "granulat recyclé". On entend par "granulat recyclé", un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux "granulats naturels" provenant de carrières ou de sablières. Le terme "granulat recyclé" peut aussi être utilisé pour décrire un granulat provenant du retour de béton. Les granulats recyclés GR dont traite cette revue de littérature sont donc des granulats recyclés de démolition. Le terme granulats est utilisé dans ce document pour décrire la fraction grossière (5 mm à 20 mm) des granulats incorporés aux mélanges de béton puisque l'étude se concentre sur celle-ci.

2.2. Granulats recyclés issus de déchets de démolition

Le béton constitue presque 75 %, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constitué de béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature [15].

- Matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.;
- Matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.;
- Mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique supérieure à 10 %;
- Autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

2.3. Description du granulat recyclé

Les granulats recyclés sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ils sont considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine. Le taux de mortier attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé et permet d'évaluer sa qualité. Une des conséquences de la présence du mortier attaché est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier attaché en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La figure 2.1 représente la configuration d'un granulat recyclé [13].

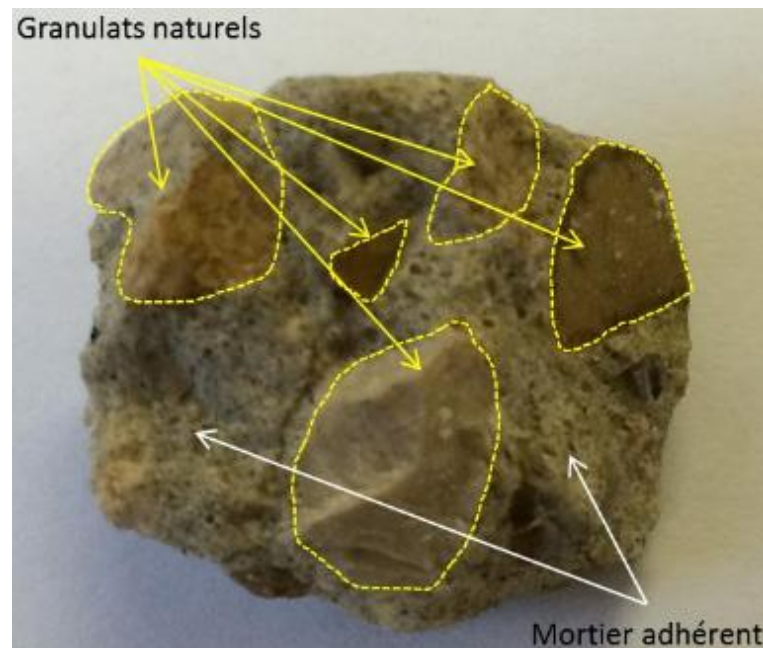


Figure 2. 1. Exemple de granulat recyclé [13].

2.4. Processus de fabrication des granulats recyclés

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont les suivantes :

- Sélection et stockage des produits bruts ;
- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un marteau hydraulique;
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires suivi d'un déferraillage électromagnétique;
- Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné à retirer les impuretés;
- Eventuellement, concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire;
- Stockage;
- Analyse avant l'utilisation.

2.5. Caractéristiques des granulats recyclés

La présence du mortier attaché au granulat original affecte plusieurs propriétés du granulat recyclé [16]. Dans cette partie sont détaillées les propriétés les plus indicatives dans la qualification des granulats recyclés.

2.5.1. Microstructure des granulats recyclés

Ayob *et al.* [17] ont étudié la microstructure des GR par images MEB de spécimen de béton après 28 jours de durcissement, comme montre la figure 2.2. Le béton classique a un granulat de surface plus propre et moins poreux et exempte de particules lâches, comme la poussière (Figure 2.2(a)). Les microstructures du béton avec 20 % de GR et le béton classique n'ont pas été significativement différentes (Figure 2.2(b) et 2.2(c)). La forme angulaire et la surface rugueuse du béton avec 50 % et 100 % de GR sont plus compliquées, comme le montre la figure 2.2(d). La surface était poreuse et recouverte de particules lâches et friables, soit de la poussière, soit des sources provenant du mortier attaché au GR. La porosité et la quantité de particules lâches recouvertes à la surface dépendent de la teneur en GR utilisée dans le béton d'origine.

L'épaisseur ITZ de GR peut aller de 10 à 50 μm autour du granulat. Cette épaisseur est liée au degré d'hydratation et au taux en mortier attaché (Figure 2.2(c) et 2.2(d)).

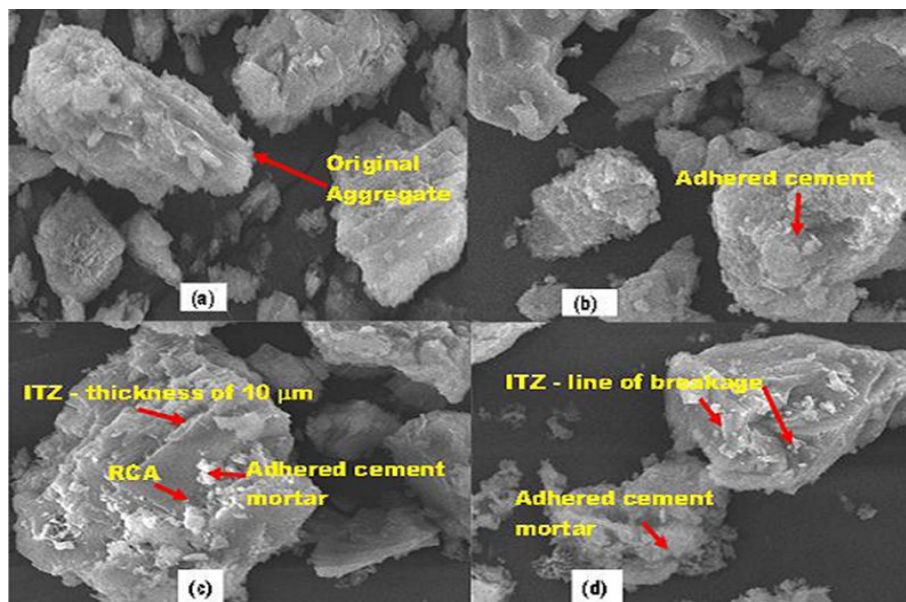


Figure 2. 2. Images MEB de spécimen de béton après 28 jours (a) 0 % GR; (b) 20 % GR; (c) 50 % GR; (d) 100 % GR [17].

2.5.2. Mortier attaché aux granulats recyclés

Lorsque le béton est concassé, un mortier reste attaché autour des granulats parents. La pâte de ciment adhère aux granulats naturels beaucoup plus poreux. Par conséquent, la qualité et la quantité du mortier attaché ont un effet néfaste sur les propriétés du BGR comparativement aux granulats naturels, qui sont: une densité plus faible, une absorption d'eau plus élevée, une abrasion de Los Angeles plus élevée et une teneur plus élevée en sulfate [18]. Le mortier attaché au GR est inclus dans le mortier total, le rapport de mortier total du BGR dans la conception du mélange conventionnel est supérieur à celui du mélange de béton avec granulat naturel [19]. Selon Hansen et Narud [20], la quantité de mortier attaché au GR varie de 30 à 60 % (en volume de GR) selon la taille des granulats. La figure 2.3 montre les composants qui peuvent être trouvés dans un GR.

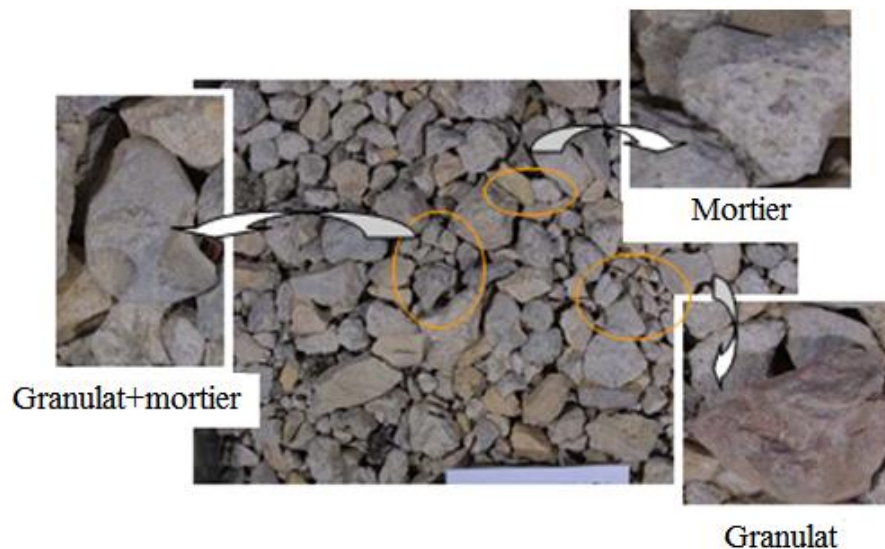


Figure 2. 3. Détail d'un granulat recyclé [21].

La quantité de mortier attaché dépend de plusieurs facteurs :

- Granulométrie des granulats: la quantité de mortier résiduel est inversement proportionnelle à la taille des granulats ;
- Qualité du béton parent: le taux de mortier attaché aux GR augmente avec la résistance du béton original ;
- Type de concasseur utilisé pour le recyclage : le concasseur à mâchoire élimine mieux la gangue d'ancien mortier que le concasseur à percussion [16, 22].
- Cycle de recyclage : un concassage secondaire contribue à une réduction considérable de la quantité de mortier résiduel.

2.5.3. Relation entre le taux de mortier attaché et la taille des granulats

La quantité de mortier attaché dépend de la taille des granulats du béton parent. Généralement, les GR contiennent de 30 % à 60 % de mortier attaché, selon la taille des granulats.

Hansen et Narud [20] ont rapporté que la quantité du mortier attaché aux GR (pourcentage du volume) est estimé entre 25 à 35 % pour la fraction de granulats 16/32 mm, de 40% pour la fraction 8/16 mm et 60% pour la fraction de 4/8 mm.

Ettxeberria *et al.* [16] ont rapporté que dans les GR utilisés, la quantité de mortier attaché est environ 20 % pour la fraction 10/25 mm et 40 % pour la fraction 4/10 mm.

De Juan et Gutiérrez [21] ont montré que la quantité de mortier attaché au GR augmente lorsque la taille de gravier diminue (Figure 2.4). Ils ont indiqué la présence de 33-55 % et 23-44 % de mortier attaché dans les graviers recyclés de taille 4/8 mm et 8/16 mm, respectivement. De plus, la régression n'est pas linéaire, ce qui signifie que d'autres facteurs influencent également la quantité de mortier attaché aux granulats recyclés.

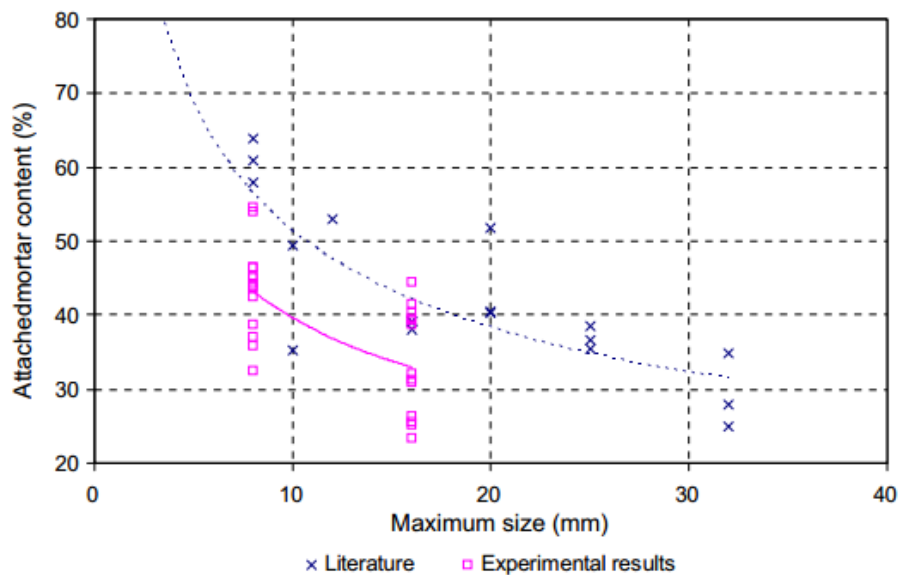


Figure 2. 4. Quantité de mortier attaché en fonction de la taille des granulats [21].

2.5.4. Relation entre le taux de mortier attaché et la qualité du béton parent

Liu *et al.* [23] ont trouvé que le taux de mortier attaché aux GR augmente légèrement avec l'augmentation de la résistance à la compression du béton parent. Ils ont trouvé un taux de 42.22 % pour un béton parent de 20 MPa et 46.51 % pour un béton parent de 30 MPa. La même constatation a été relevée par Sri Ravindrarajah et Tam [24]. Cependant, Hansen [25] a

trouvé que le rapport E/C d'ancien béton n'influe pratiquement pas sur le taux de mortier attaché aux GR.

2.5.5. Méthodes de mesure de la quantité de mortier attaché aux GR

Il n'y a pas une norme internationale qui permet de mesurer la quantité de mortier attaché aux GR. Cependant, plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour l'évaluer et aucune méthode n'est satisfaisante pour déterminer la quantité de mortier attaché. Nous citons dans ce qui suit les plus utilisées :

2.5.5.1. Traitement chimique

Cette méthode consiste à dissoudre le mortier attaché au GR par différents traitements chimiques (solution d'acide nitrique HNO_3 ou d'acide chlorhydrique (HCl) [26, 27]). Cette méthode ne peut pas être utilisée avec les granulats naturels calcaires, car l'acide attaque également le granulats calcaire.

Le principe de cette méthode est le suivant :

- Après lavage à l'eau distillée et tamisage pour éliminer les fines particules, un échantillon de GR est séché dans une étuve à une température de 105 °C pendant 24 h.
- Une quantité de l'échantillon (m_1) d'environ 100 g est immergée dans une solution 10 % d'acide chlorhydrique pendant 8 h.
- L'échantillon est de nouveau lavé à l'eau distillée pour éliminer les particules fines, et séché dans un four à une température de 105 °C pendant 24 h.
- De cette façon, la plupart du mortier de ciment attaché au GR pouvait être facilement détachable et le mortier restant pouvait être retiré à l'aide d'un marteau en caoutchouc ou d'une brosse métallique.
- L'échantillon est enfin tamisé à travers un tamis 5 mm pour obtenir la masse du granulats parent (m_2).

La quantité du mortier attaché est calculée en utilisant l'équation (2.1). Six échantillons doivent être testés pour obtenir la valeur moyenne.

$$\% \text{ mortier attaché} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

2.5.5.2. Traitement thermique

Cette méthode, développée par De Juan et Gutiérrez [21], consiste en plusieurs cycles de trempe dans l'eau et chauffage à 500 °C des GR, ce qui permet de détacher progressivement le mortier attaché de la surface des graviers en raison des microfissures qui apparaissent à l'interface entre les granulats et le mortier. La dilatation inégale entre les graviers et le mortier conduit à des microfissurations entre les graviers et le mortier.

Après plusieurs étapes, du mortier reste attaché au GR et un marteau en caoutchouc est utilisé pour rayer la surface. L'échantillon est tamisé pour obtenir le gravier dont tout le mortier a été détaché. La quantité du mortier est calculée par la perte de masse entre les graviers recyclés d'origine et les graviers obtenus. Le principe de cette méthode est le suivant :

- Un échantillon de granulat recyclé (m_1) est préparé en éliminant préalablement toutes sortes d'impuretés. L'échantillon est immergé dans l'eau pendant 2 h, de sorte que le mortier attaché soit presque complètement saturé.
- Ensuite, l'échantillon est séché dans un four à moufle à une température de 500 °C pendant 2 h. Ensuite, l'échantillon est immergé dans de l'eau froide. Ce chauffage crée de la vapeur d'eau dans le mortier saturé et le refroidissement brusque provoque un choc thermique et des fissures dans le mortier, et peut être facilement détachable du GR.
- Après ces étapes, un mortier reste parfois attaché au GR, il est donc nécessaire de l'enlever au moyen d'un marteau en caoutchouc ou de gratter la surface par une brosse métallique.
- Lorsque tout le mortier a été éliminé, l'échantillon est passé dans un tamis de 4 mm. On note à la fin la masse (m_2) du granulat parent.
- La quantité en mortier attaché est calculée selon la formule (2.1).

2.5.5.3. Traitement thermique et chimique

Une combinaison entre les traitements thermique et chimique a été proposée par Abbas *et al.* [28], en immergeant les granulats recyclés dans une solution de sulfate de sodium et utilisant des cycles de gel-dégel (16 h à -17 °C et 8 h à 80 °C). La dilatation inégale entre le sulfate de sodium piégé dans les pores des granulats et le mortier attaché après les cycles de gel-dégel va détruire la microstructure du mortier attaché.

2.5.5.4. Production d'un nouveau béton

Cette méthode développée par Sri Ravindrarajah [24] consiste en la production d'un nouveau béton fabriqué avec des granulats recyclés au moyen d'un ciment coloré (blanc), de

sorte que la surface du mortier est facilement détectée dans un échantillon au moyen de la couleur différente entre les deux granulats naturels et nouveaux mortiers.

Pour déterminer la teneur en mortier attaché au GR, des cubes de 150 mm sont coulés à partir de béton ayant les mêmes proportions de mélange que les bétons à base de granulats recyclés mais avec un ciment Portland blanc.

Chaque cube représentant les BGR a été découpé en trois morceaux, la pièce centrale ayant une épaisseur de 20 mm. Au moyen d'un planimètre numérique électronique, les quatre surfaces exposées ont été traversées pour déterminer les zones de mortier et de gravier du béton parent. En raison du caractère aléatoire de la taille des grains de gravier et de l'épaisseur du revêtement de mortier, aucune valeur exacte pour la quantité du mortier n'est attendue. Cependant, une valeur moyenne peut être obtenue par la méthode adoptée, bien que cette méthode se soit révélée difficile et longue. En général, les granulats de béton recyclé contiennent en moyenne environ 50 %, en volume, de mortier provenant des bétons d'origine.

En général, les GR contiennent en moyenne 50 %, en volume, de mortier provenant des bétons d'origine [24]. Des valeurs significatives du coefficient de variation trouvé indiquent le caractère aléatoire de la distribution de la quantité de mortier attaché aux GR.

De Juan et Gutiérrez [21] ont fait une comparaison des résultats obtenus avec les trois méthodes. Ils ont constaté que les résultats sont très différents selon la méthode utilisée. (25-70 %) pour la méthode avec une solution d'acide chlorhydrique, (25-65 %) pour la production d'un nouveau béton et (40-55 %) pour le traitement thermique, comme le montre la figure 2.5. Des résultats fiables ont été trouvés par la méthode de traitement thermique.

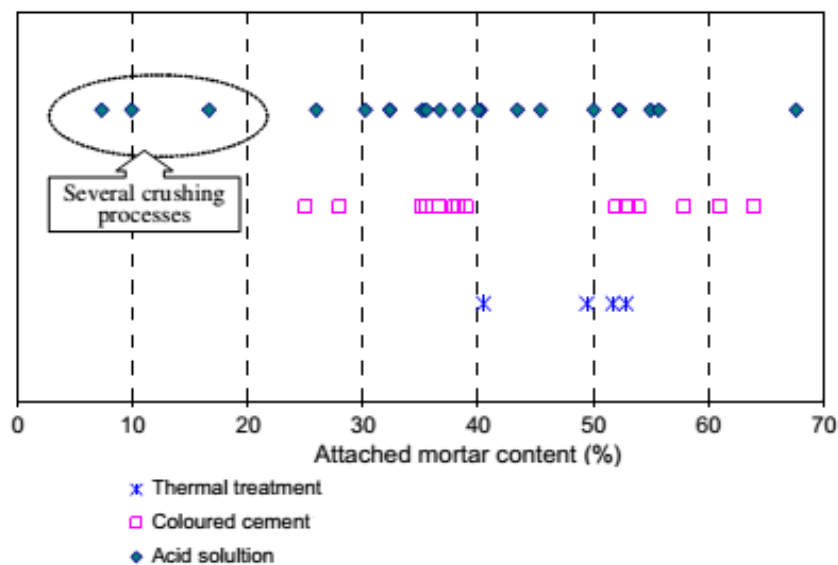


Figure 2. 5. Quantité de mortier attaché selon différentes méthodes de mesure [21].

Le tableau 2.1 résume les résultats des différentes études sur le taux de mortier attaché en fonction de la classe granulaire.

Tableau 2. 1. Taux de mortier attaché aux GR dans la littérature.

Auteurs	Classe granulaire (mm)	Taux de mortier attaché (%)
Hansen et Narud [20]	4/8	60
	8/16	40
	16/32	30
Abbas <i>et al.</i> [28]	4.75/9.5	26
	9.5/12.7	22
	12.7/19	21
Etxeberria <i>et al.</i> [16]	4/10	40
	10/25	20
De Juan et Gutiérrez [21]	4/8	33-55
	8/16	23-44
Topçu <i>et al.</i> [29]	4/8	60
	16/32	30
Nagataki <i>et al.</i> [30]	5/20	52.3

2.5.6. Résistance à l'abrasion

Le test d'abrasion Los Angeles (LA) résulte en un pourcentage de perte de masse par les granulats qui se produit lors de l'essai d'impact de billes d'acier et les granulats. Les valeurs de perte de masse par abrasion LA sont généralement plus élevées pour GR que pour GN. Cette perte de masse plus élevée est causée par la présence d'ancien mortier moins résistant et moins dense que le gravier parent et la présence de particules qui se sont fissurées pendant le processus de concassage du béton parent [31].

La procédure de concassage affecte également la résistance à l'abrasion des GR. Li [32] a trouvé une valeur du coefficient de Los Angeles de 24.2 % pour des GR obtenus à l'aide d'un concasseur à mâchoires, et une valeur de 20 % quand un concasseur à percussion est utilisé après l'écrasement des granulats par un concasseur à mâchoires.

De Juan et Gutiérrez [21] ont indiqué que dans le test d'abrasion de Los Angeles, tout le mortier attaché est enlevé, outre l'abrasion subie par le granulat naturel. Plus la quantité de mortier attaché est élevée, plus la perte de masse est également élevée. Ainsi, la figure 2.6 montre que lorsque le taux de mortier attaché est élevé, l'abrasion de Los Angeles augmente également, il varie entre 25 et 45 %. D'autre part, De Juan et Gutiérrez [21] ont indiqué que

plus la résistance à la compression du béton parent est élevée plus la résistance à l'abrasion des granulats recyclés issus de ce béton est meilleure.

Conformément à la norme espagnole, le coefficient de Los Angeles des granulats doit être inférieur à 40. Les échantillons avec un taux de mortier attaché inférieure à 44% satisfont à cette limite, comme le montre la figure 2.6.

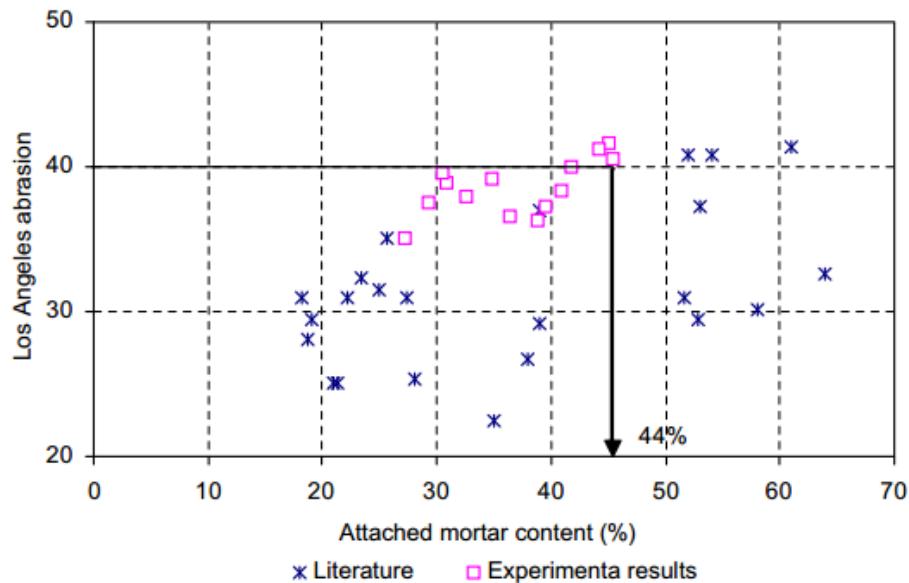


Figure 2. 6. Relation entre la teneur en mortier attaché et l'abrasion de Los Angeles [21].

Yehia *et al.* [33] ont montré que les GR avaient un coefficient de Los Angeles plus élevé par rapport aux granulats naturels. Les résultats ont montré que les granulats naturels avaient environ de 18 % de perte de masse, par contre les granulats recyclés avaient une perte de masse de 33 %. Les raisons de cette perte importante sont la faible résistance et la porosité élevée des granulats recyclés.

Eckert et Oliveira [18] ont trouvé que les coefficients de Los Angeles des GR sont beaucoup plus élevés que ceux des GN et augmentent avec la quantité en céramique, ce qui peut être lié à la densité. La perte masse du granulat recyclé variait de 35 % à 42 %.

Omray *et al.* [34] ont rapporté que le GR a un coefficient LA plus élevé que celui du GN avec $LA_{GN} \approx 2 LA_{GR}$. Le coefficient LA a une relation avec le coefficient d'absorption. Une augmentation de ce dernier conduit à une augmentation du coefficient LA.

Les résultats des tests d'abrasion des GR et GN trouvés par différents chercheurs sont présentés dans le tableau 2.2. On peut conclure que les granulats recyclés présentent

généralement une dureté acceptable pour la confection du béton car les valeurs de LA sont inférieures à la limite (40%) exigée par les normes.

Tableau 2. 2. Résultats de l'essai d'abrasion des GN et GR obtenus par différents chercheurs.

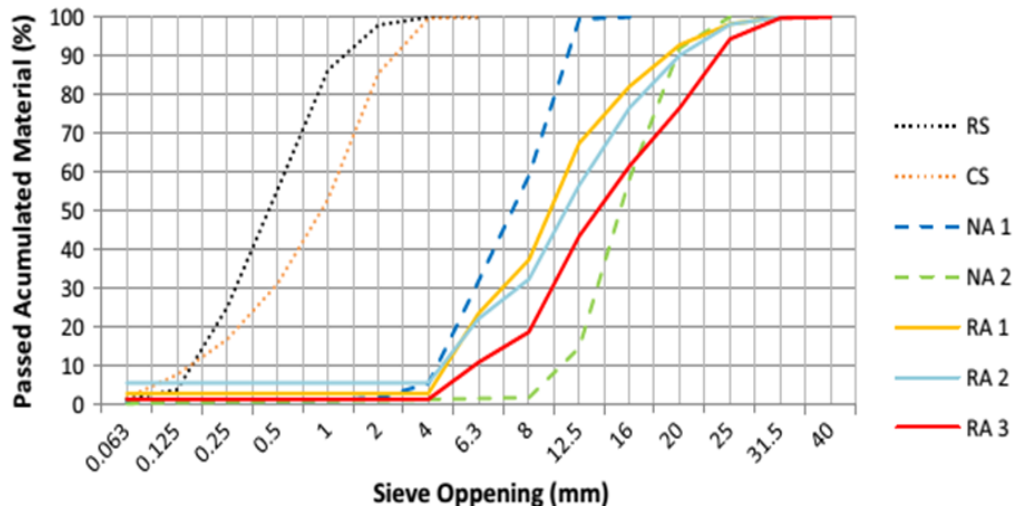
Références	Coefficient LA (%)	
	GN	GR
Snyder <i>et al.</i> [31]	15–30	20–45
Verian [35]	29–31	34–36
Li [36]	11.5	27.3
Wen <i>et al.</i> [37]	15	20–29
Yehia <i>et al.</i> [33]	18	33
Yehia et Abdelfatah [38]	19–25	21–35
Eckert et Oliveira [18]	43.3–53.3	31.5
Hansen et Narud [20]	20–30	22–41
Sri Ravindrarajah et Tam [24]	18	37–41
Kurda <i>et al.</i> [39]	28	43
Liu <i>et al.</i> [23]	31	42
Thomas <i>et al.</i> [40]	31	42
Eckert et Oliveira [18]	31.5	43.3
Omray <i>et al.</i> [34]	17.5	32
Debieb et Kenai [41]	22–24	34–36
Somna <i>et al.</i> [42]	23	37
Ait Mohamed Amer <i>et al.</i> [43]	38.9	51.5

2.5.7. Granulométrie

La granulométrie des granulats recyclés dépend de la qualité du béton parent. Un béton de faible qualité, une fois concassé, aura une plus grande teneur en fines [44]. Les GR présentent généralement une teneur en fines plus élevée que le GN.

Plusieurs recherches ont montré que la distribution granulaire des GR est légèrement différente de celle des GN. Sagoe-Crentsil *et al.* [45] et Shayan et Xu [46] ont constaté que les courbes granulométriques des GR se situaient dans la plage de référence spécifiée. Cela indique que les GR ont une granulométrie acceptable par rapport aux normes applicables sans recours à un ajustement.

Eckert et Oliveira [18] ont remarqué que tous les GR peuvent avoir une distribution de taille normale et continue (Figure 2.7).



RS = sable de rivière, CS = sable concassé, NA = gravier naturel, RA = gravier recyclé

Figure 2. 7. Analyse granulométrique des granulats [18].

Le *et al.* [47] ont étudié la granulométrie du sable recyclé avant et après pré-saturation. Ils ont constaté que la granulométrie du sable recyclé a beaucoup changé après la pré-saturation en fonction de la taille des particules, comme le montre la figure 2.8. La proportion de fraction inférieure à 0.5 mm a diminué de 30 % à 11 % après la pré-saturation. Au contraire, la proportion des autres fractions a augmenté. Ce résultat confirme que la pré-saturation conduit à la formation d'agglomérats de fines particules (< 0.5 mm).

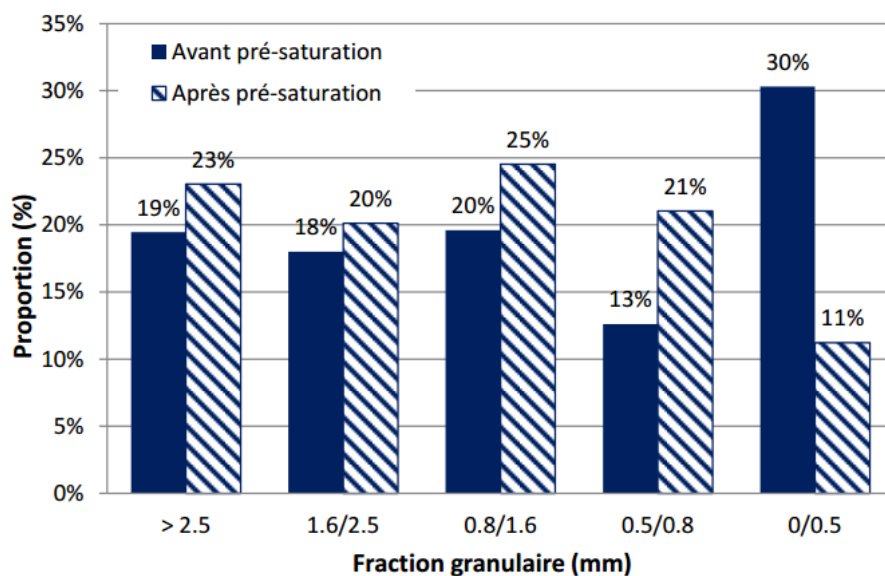


Figure 2. 8. Proportion pour différentes fractions granulaires avant et après la pré-saturation avec W = 11 % pendant 2 semaines [47].

2.5.8. Forme et texture des granulats recyclés

Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés ont tendance à être très rugueux en raison du concassage du béton et de la présence du mortier attaché aux surfaces des granulats d'origine. En effet, le mortier attaché apporte au GR une rugosité plus importante que celle d'un granulats naturel, mais en diminue l'angularité. En général, les GR contiennent de 30 % à 60 % de mortier attaché, selon leur taille. Une plus grande quantité de mortier est attachée aux granulats de plus petite taille [16, 48].

Exteberria *et al.* [16] ont confirmé que la méthode de production des granulats recyclés et le type de concasseur utilisé influent sur la forme des GR produits. Les GN ont généralement une forme angulaire avec des côtés lisses alors que les GR ont une forme irrégulière.

Sagoe-Crentsil *et al.* [45] ont montré que les GR ont une forme sphérique plus arrondie qui améliore la maniabilité. Le mortier attaché au GR peut lisser les bords durs du granulats d'origine. Cela permet au nouveau mortier de mieux couler autour du granulats.

2.5.9. Densité

La masse volumique et l'absorption d'eau d'un granulats sont deux paramètres fondamentaux, responsables des caractéristiques mécaniques du matériau et donc du béton et déterminant la quantité d'eau de gâchage nécessaire lors de la mise en œuvre. Les granulats recyclés ont la particularité d'être entourés d'une gangue de mortier, qui leur confère une plus grande porosité, soit par conséquent une masse volumique plus faible et un coefficient d'absorption d'eau plus élevé que les granulats naturels. Il est donc important de déterminer ces paramètres lorsqu'on travaille avec ces granulats.

En général, la densité des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels. La plus faible densité des GR est due à la faible densité du mortier attaché au granulats parent qui le rend moins dense [18, 21, 49-52]. Généralement, la densité spécifique des granulats recyclés se situe entre 2.4 et 2.5 (2400 à 2500 kg/m³), alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2.6 à 2.7 (2600 à 2700 kg/m³).

Une étude de Limbachiya *et al.* [53] a montré que la densité spécifique du GR est d'environ 7 à 9 % inférieure à celle du GN.

Sagoe-Crentsil *et al.* [45] ont trouvé des densités spécifiques de 2394 kg/m³ pour le GR et 2890 kg/m³ pour le GN, soit une différence de 17 %.

Selon les résultats expérimentaux de Debieb [54], la densité apparente des granulats recyclés est inférieure de 10 à 15 % pour les graviers et jusqu'à 20% pour le sable.

Selon De Juan et Gutiérrez [21], lorsque la quantité de mortier attaché augmente la masse volumique du GR diminue, comme le montre la figure 2.9.

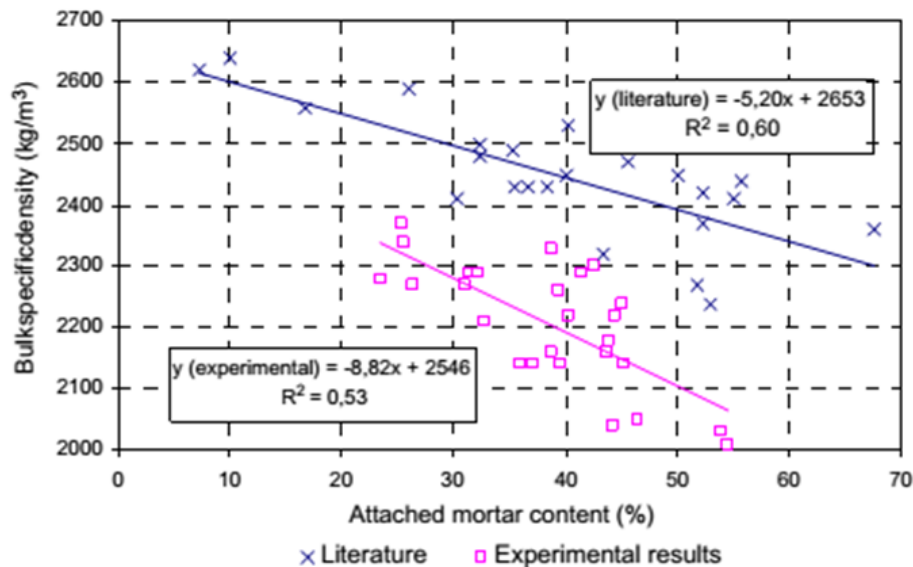


Figure 2. 9. Relation entre la teneur en mortier attaché et la masse volumique des GR [21].

2.5.10. Absorption d'eau

Toutes les études affirment que l'absorption d'eau d'un granulat recyclé est plus élevée que celle d'un granulat naturel (presque 3 fois) due à leur porosité élevée [18, 21, 33, 53, 55-59]. A la saturation, l'eau s'écoule de l'intérieur à la matrice de pâte de ciment engageante et à la sécheresse, le processus inverse se produit. Ce flux d'eau brise les liaisons pâte de ciment-granulat et augmente le rapport E/C dans la zone de transition interfaciale, cela dégrade les propriétés du béton frais et durci.

Braymand *et al.* [58] ont constaté que les granulats recyclés ont tendance à absorber plus d'eau que les granulats naturels du fait de leur porosité plus élevée.

De Juan et Gutiérrez [21] ont trouvé que l'absorption d'eau des granulats recyclés varie de 5.1 % à 11.5 % pour la fraction 4/8 mm et de 4.2 % à 8.8 % pour la fraction 8/16 mm. La figure 2.10 donne la relation entre la quantité de mortier attaché et l'absorption d'eau du GR. Elle montre que lorsque la quantité du mortier attaché augmente, l'absorption d'eau augmente également, spécialement dans la fraction plus fine 4/8 mm.

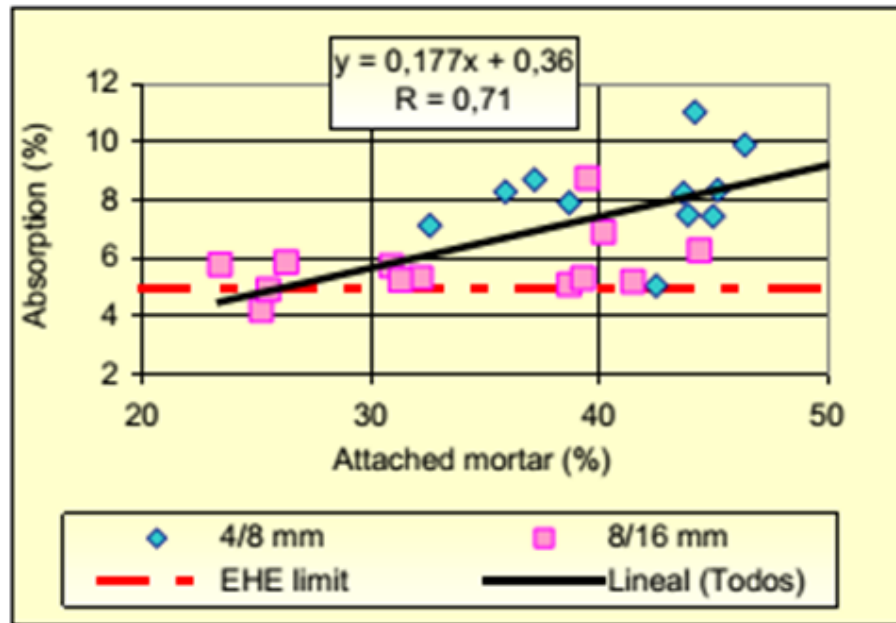


Figure 2. 10. Relation entre l'absorption du GR et la quantité de mortier attaché [21].

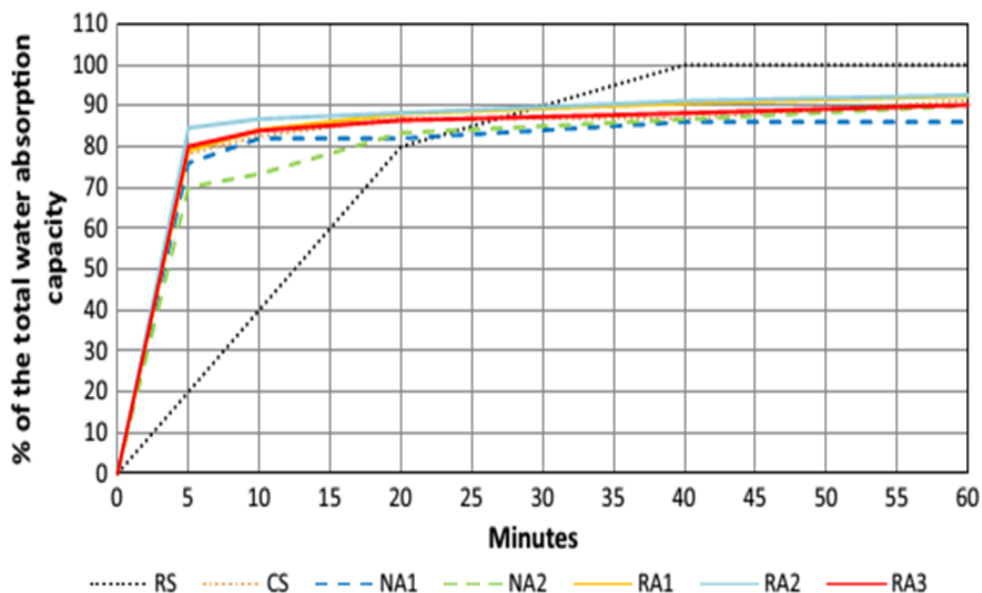
Yehia *et al.* [33] ont montré que les granulats recyclés ont une capacité d'absorption plus élevée (jusqu'à 8 %) à cause de la présence de mortier attaché, tandis qu'elle est de l'ordre de (1-2.5 %) pour les granulats naturels. Ces valeurs indiquent une porosité élevée qui nécessite des considérations spéciales pendant le malaxage pour le contrôle de la maniabilité et de la demande en eau.

Padmini *et al.* [60] ont montré que plusieurs paramètres régissent l'absorption d'eau des granulats recyclés :

- Type de granulat dans le béton parent.
- Performances mécaniques du béton parent.
- Taille maximale du granulat utilisé dans le béton parent.

Padmini *et al.* [60] ont observé que l'absorption d'eau des granulats recyclés augmente avec la résistance du béton parent dont les granulats recyclés sont dérivés, en effet, le béton à haute résistance nécessite généralement un plus grand dosage en ciment, ce qui augmente la quantité de mortier attaché aux granulats. Cette étude a également prouvé que la taille des granulats utilisés dans le béton parent influence l'absorption d'eau des granulats produits à partir de ce béton, en effet, plus le granulat naturel initial est petit, plus la surface spécifique totale disponible est grande, et donc plus les granulats recyclés sont riches en ancien mortier, autrement dit, plus ils sont poreux. De plus, le coefficient l'eau dépend de la granulométrie, elle est plus élevée pour les sables que pour les graviers.

Eckert & Oliveira [18] ont trouvé que le comportement d'absorption d'eau est similaire pour tous les granulats (Figure 2.11), à l'exception du sable de rivière (RS). Ce comportement est divisé en 2 phases, au cours de la 1^{re} phase, une absorption rapide entraîne la présence de grands pores superficiels. Dans la 2^e phase, l'absorption implique des pores plus profonds et plus petits et se déroule à un rythme plus lent. Pour les GR et GN, la transition de la 1^{re} à la 2^e phase se produit pendant 5 minutes, ce qui correspond à une absorption d'eau d'environ 80 % de son maximum. La quantité optimale d'eau de pré-mouillage et le temps de pré-mouillage devraient avoir lieu à la fin de la 1^e phase (i.e. après 5 min). Le taux d'absorption du GR est légèrement plus rapide que celui du GN mais les différences sont négligeables après 5 min.



RS = sable de rivière, CS = sable de concassage, NA = gravier naturel, RA = gravier recyclé

Figure 2. 11. Capacité d'absorption totale des GR dans les 60 min [18].

Les valeurs d'absorption d'eau des gros granulats de béton concassé restent tolérables dans les limites de (5%) exigées par différents normes.

Les résultats des tests d'absorption des granulats naturels et recyclés rapportés par différents chercheurs sont présentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2. 3. Absorption d'eau des granulats naturels et recyclés (%).

Auteurs	Granulats naturels		Granulats recyclés	
	Gravier	Sable	Gravier	Sable
Mulder [61]	1.13	1.49	6.8	8.16
Debieb et Kenai [41]	0.36	0.28	6.00	9.20
Debieb <i>et al.</i> [62]	1.5	1	11.5	14
Omrane <i>et al.</i> [63]	1.6	0.7	6.5	9.0
Corinaldesi et Moriconi [22]	2	3	8	10
Gesoglu <i>et al.</i> [64]	0.5	2.1	7.4	10.9
Yehia <i>et al.</i> [33]	1–2.5	--	8.5	--
Bélen Gonzalez [65]	1.95	--	5.01	--
Fonseca [66]	1.3	--	6.1	--
Kou <i>et al.</i> [67]	1.12	--	7.42	--
Ait Mohamed Amer [68]	0.96	--	5.05	--
Eckert & Oliveira [18]	0.74	--	5.8	--
Sri Ravindrarah et Tam [24]	0.3	--	4.7–5.4	--
Tam <i>et al.</i> [69]	0.8	--	5.8–8.7	--
Djebri [70]	0.5–0.8	--	3.1–5.5	--
Bendimerad <i>et al.</i> [71]	0.5	--	5.2	--
Xiao <i>et al.</i> [72]	0.4	--	9.25	--
Limbachiya <i>et al.</i> [53]	2.5	--	4.9–5.2	--
Abbas <i>et al.</i> (2009) [28]	0.34–0.89		3.3–5.4	

Chapitre 2 : Influence des GR sur les propriétés des BGR

Chapitre 3 : Influence des GR sur les propriétés des BGR

3.1. Influence des GR sur les propriétés du BGR frais

L'ouvrabilité d'un béton est un facteur important. Elle conditionne la facilité de mise en place du béton dans le coffrage et elle dépend du dosage en ciment et en eau. L'ouvrabilité des BGR est généralement affectée par la forte absorption d'eau des granulats recyclés. Si les GR sont secs avant leur utilisation, l'ouvrabilité du béton est considérablement réduite.

Les granulats recyclés créent plus de friction entre les particules en raison de leur surface rugueuse et de leur forme irrégulière, ce qui crée un frottement plus élevé entre les granulats, gênant ainsi la mobilité des particules et nécessitent une pâte de ciment et une énergie de vibration beaucoup plus élevées pour surpasser cette difficulté [16, 55].

Cependant, comme il a été vu dans la littérature, les granulats recyclés présentent une grande variabilité de leurs caractéristiques physiques, mais également une demande en eau plus importante que les granulats naturels. Le contrôle de la quantité d'eau efficace dans le béton devient alors un problème complexe pour les BGR. La maîtrise de la quantité d'eau dans le béton est cruciale pour assurer l'ouvrabilité souhaitée, la prise en compte de l'eau absorbée par les granulats recyclés doit intégrer leur état de pré-saturation et leur cinétique d'absorption.

Le béton fait avec du GR a un affaissement plus faible que le béton fait avec du GN au même rapport E/C. La diminution de l'ouvrabilité du béton contenant du GR est attribuée à l'absorption plus élevée du GR, à leur surfaces plus rugueuses et à leur formes plus irrégulières [39]. L'ouvrabilité dépend aussi du type de concasseur utilisé dans la préparation des granulats recyclés [49, 73].

Meftah et al. [74] a montré que l'utilisation des granulats recyclés secs dans la formulation des bétons joue un rôle d'éponge dans les 30 premières minutes. Au-delà, une partie de cette eau absorbée est relarguée dans le béton.

Afin d'obtenir une ouvrabilité similaire au BGN, le béton fabriqué avec du GR nécessite environ 5 % à 15 % d'eau supplémentaire dans le mélange lorsque le GR est utilisé à l'état sec [20, 24, 25, 35].

Evangelista et De Brito [55] considèrent que l'absorption d'eau des GR se stabilise pour une durée de 10 à 30 minutes après le malaxage. En effet, l'absorption des GR diminue considérablement après l'ajout du ciment au mélange, car il obture leurs pores, limitant ainsi les échanges d'eau.

L'absorption des granulats pendant le malaxage est considéré comme équivalant à 85 % de l'absorption qui se produit dans les mêmes granulats après immersion dans l'eau pendant 24 h. Ce pourcentage par rapport à la masse totale de GR correspond à l'absorption enregistrée au cours des 5 à 10 premières minutes de contact avec l'eau, période après laquelle l'absorption d'eau est très faible [75, 76].

L'utilisation d'adjuvants, de cendres volantes ou la combinaison des deux améliore la maniabilité du béton contenant des GR, et sont couramment utilisés pour limiter la quantité d'eau supplémentaire ajoutée à l'eau de malaxage [39, 77].

Plusieurs solutions ont été proposées pour minimiser l'effet néfaste des GR sur l'ouvrabilité des BGR et empêcher l'absorption d'eau par les GR. Mas *et al.* [78], Lavado *et al.* [75] et Etxeberria *et al.* [16] ont utilisé la méthode de compensation d'eau en ajoutant 80 % de l'eau totale absorbée par les GR comme une quantité d'eau supplémentaire à l'eau de malaxage, pour tenir compte de l'absorption des GR. D'autres ont proposé la pré-saturation des granulats recyclés avant le malaxage [16, 79-81], l'utilisation d'un superplastifiant, le revêtement des surfaces des GR par une poudre pouzzolanique [36], le malaxage en deux étapes [82, 83] et l'incorporation des ajouts minéraux en remplacement partiel du ciment.

La méthode de compensation d'eau a montré des valeurs plus cohérentes. En outre, cette méthode a également conduit à la production de BGR présentant des performances mécaniques légèrement améliorées [84].

Leite *et al.* [85] ont indiqué que le test d'affaissement au cône d'Abrams n'est pas adapté pour mesurer l'ouvrabilité des BGR. Par contre, les tests de table à secousse et VeBe sont plus adaptés pour déterminer l'ouvrabilité du béton recyclé, car ils utilisent un aspect dynamique, ce qui réduit la viscosité et le frottement interne des mélanges.

Par ailleurs, la rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée. Elle permet de déterminer les propriétés mécaniques macroscopiques à partir d'une étude basée sur la structure microscopique du matériau.

Le BGR est considéré comme un fluide non newtonien, dont le comportement peut être décrit par le modèle de Bingham, selon lequel le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ) peuvent décrire correctement son comportement rhéologique [86].

Adem [68] a trouvé que lorsque les GR sont employés à l'état sec, le seuil de cisaillement augmente de 30 % et 90 % lorsque le béton contient respectivement 20 % et 60 % de GR. Tandis que la viscosité augmente de 50 % et 170 % pour les mêmes pourcentages utilisés. Au-delà de 60 % de GR, le béton devient plus ferme (Figure 3.1).

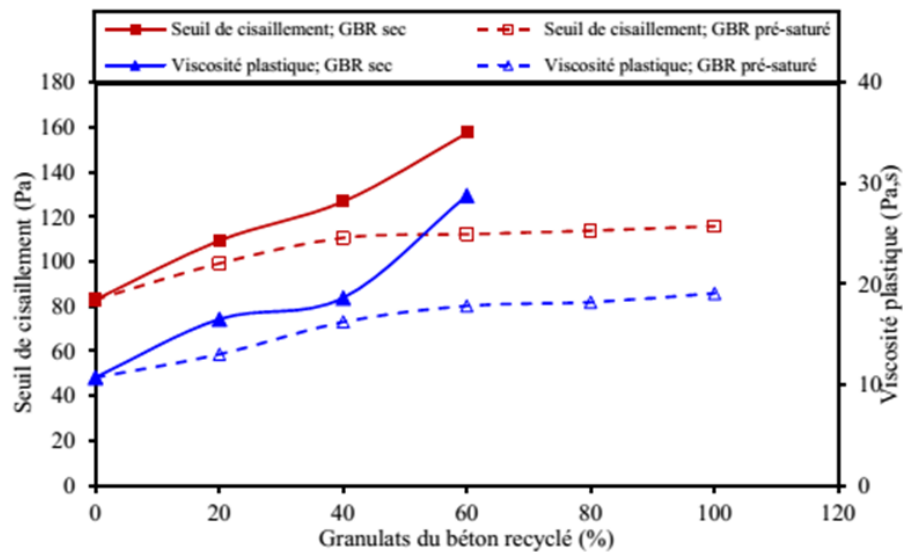


Figure 3. 1. Variation des paramètres rhéologique du béton sans superplastifiant en fonction du taux de GR (E/C = 0.6) [68].

3.2. Influence des GR sur les propriétés du BGR durci

Les caractéristiques des granulats recyclés ont une influence significative sur les propriétés mécaniques du béton. Par conséquent, la présence des GR pourrait faire la différence entre les performances des BGR et BGN.

3.2.1. Densité du BGR

La densité du BGR diminue avec l'augmentation du taux de GR [16, 35, 72, 87]. La densité sèche du BGR est généralement inférieure de 5 à 15 % à celle du béton BGN [20]. La faible densité du mortier attaché au GR est à l'origine de la faible densité du BGR. La densité des bétons contenant diverses quantités de gravier recyclé est présentée dans la figure 3.2.

La variation de densité du béton contenant du GR est en fonction de la quantité de GR utilisée et de la densité du GR. La densité du béton contenant 100 % de GR est environ 5 %

de moins que celle du BGN [35, 72]. Dans l'étude d'Etzeberria *et al.* [16], la densité du béton diminue de 3.3 % lorsque tout le GN est remplacé par le GR. Dans une étude de Dong *et al.* [88], 50 % de GR n'affecte pas significativement la densité du béton (réduction de 0.8 %). Marinković *et al.* [89] a utilisé trois fractions différentes de GR pour remplacer 65 % le GN, la densité diminue de 4.7 % à 4.9 % par rapport au BGN. Les valeurs typiques de la densité spécifique du BGR varient de 2.1 à 2.5 qui sont inférieures de 5 à 10 % à celles du BGN.

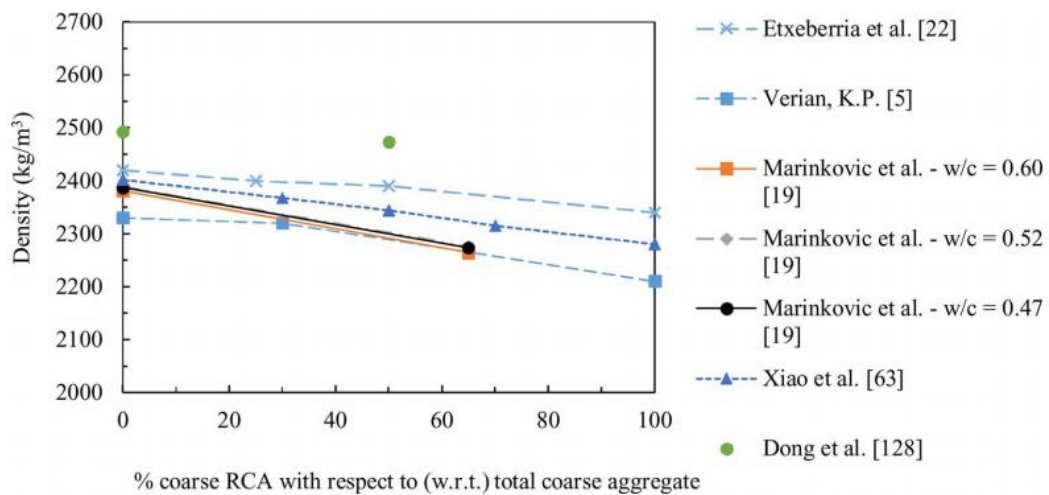


Figure 3. 2. Densité spécifique du BGR en fonction des quantités de GR [16, 35, 72, 88, 89].

3.2.2. Zone de transition interfaciale (ITZ)

Les GR sont composés d'un mélange de granulats naturels et de mortier. L'ITZ représente la liaison entre le granulat et la pâte. Pour le béton fabriqué avec des GN, il existe une seule ITZ située entre le granulat et le mortier, tandis que dans le béton fabriqué avec des GR, il existe deux ITZ, la première (ancienne) est située à l'interface granulat d'origine-mortier résiduel et la seconde (nouvelle) est située à l'interface mortier résiduel-nouveau mortier [16, 77, 82, 90-92], comme le montre la figure 3.3.

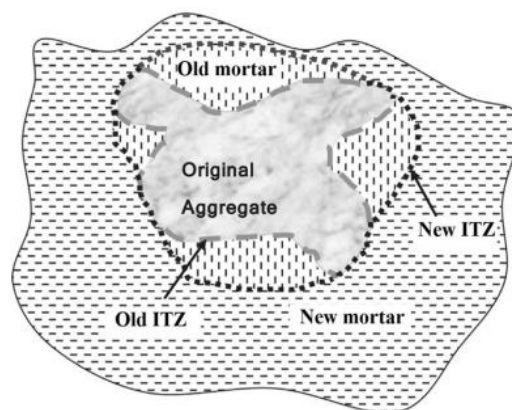


Figure 3. 3. Illustration des différentes ITZ dans un GR [92].

L'ITZ influence de manière importante les propriétés de transport, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Elle est généralement le point le plus faible dans le béton par rapport à la matrice de ciment et aux granulats.

La distribution de la porosité de la nouvelle ITZ est considérablement influencée par les conditions d'humidité initiale des GR et la résistance du béton parent. Selon Tam *et al.* [82], la qualité de la nouvelle ITZ est améliorée en utilisant des granulats pré-saturés.

3.2.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est la propriété la plus importante du béton durci, qui influe sur la durabilité et les performances du béton. Les propriétés du BGR dépendaient de nombreux facteurs tels que le rapport du liant aqueux, les différentes propriétés du GR, les propriétés du mortier adhérent, l'approche de mélange et les propriétés des adjuvants utilisés.

Plusieurs études ont montré que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés diminue de 5 à 40 % que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels [17, 18, 45, 50, 56, 59, 73, 77, 82, 90, 93-95].

Par contre, certains chercheurs ont rapporté que la résistance à la compression des BGR reste inchangée ou augmente légèrement par rapport à celle du BGN, en particulier à long-terme (exemple 28 jours) [16, 55, 64, 66, 83, 96-99]. Ce comportement peut être attribué dans une large mesure à un bon contrôle des granulats recyclés [83].

La diminution de la résistance à la compression du béton à base de GR est attribuée à la présence de deux zones de transition interfaciale dans la matrice du BGR. De plus, la diminution de la résistance à la compression des BGR est également due à l'effet de l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés car il possède des propriétés plus faibles que le nouveau béton. De plus, une plus grande quantité d'eau est utilisée dans le BGR afin d'obtenir une ouvrabilité souhaitable qui affecte le rapport E/C [39, 100].

Xiao *et al.* [72] ont observé que la résistance à la compression du BGR était inférieure de 5 %, 17.5 %, 15.6 % et 25.6 % par rapport à celle du BGN lorsque le béton contient de 30 %, 50 %, 70 % et 100 % de graviers recyclés, respectivement.

Folino *et al.* [101] ont trouvé une réduction de la résistance à la compression à 28 jours de l'ordre 8 %, 17 % et 20 % lorsque le béton contient de 30 %, 60 % et 100 % de graviers recyclés, respectivement.

Sagoe-Crentsil *et al.* [45] ont indiqué que la résistance à la compression du BGR est généralement inférieure à celle de BGN et cette réduction dépend du type et du taux du granulat recyclé.

Par ailleurs, Huoth *et al.* [93] ont constaté qu'une amélioration de la résistance à la compression pourrait être obtenue avec l'addition de la fumée de silice (Figure 3.4). Les échantillons de BGR avec addition de 10 % de fumée de silice ont néanmoins donné un béton avec une résistance à la compression comparable au béton classique à 28 jours. Il s'agit d'une amélioration de 7 % par rapport aux échantillons de BGR sans fumée de silice.

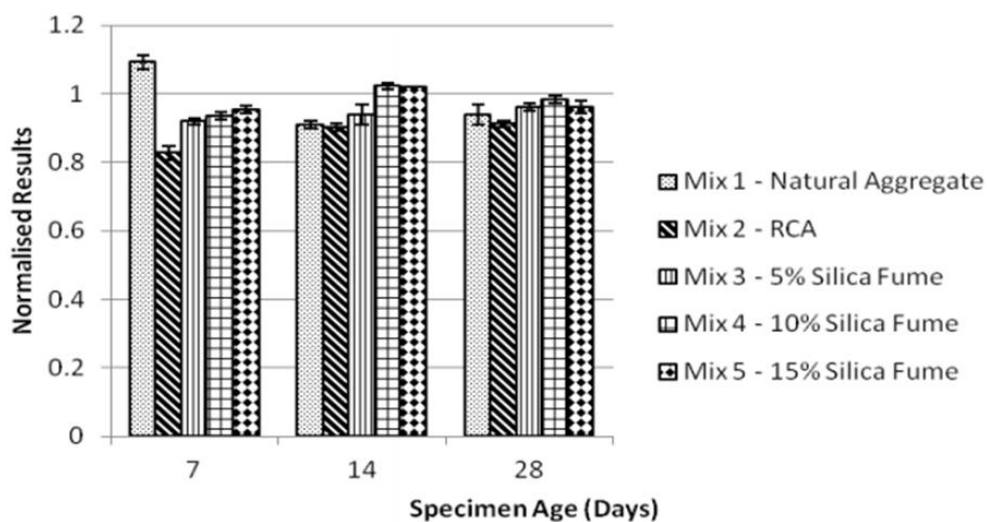


Figure 3. 4. Résistance à la compression en fonction de la teneur en GR [93].

Eckert et Oliveira [18] ont remarqué qu'à 28 jours, jusqu'à un taux en GR de 50 %, la réduction de la résistance à la compression par rapport au béton de référence est négligeable. A 91 jours, la différence de résistance entre un mélange 100 % BGR et un mélange de BGN a considérablement diminué. L'amélioration de la résistance du BGR par rapport à celle du BGN, de 28 à 91 jours, est d'environ 7 % dans les mélanges avec la céramique.

De même, Poon [97] a indiqué que jusqu'à 50% des granulats recyclés à l'état sec, la résistance à la compression du béton avec et sans granulats recyclés était comparable.

Exteberria *et al.* [16] ont conclu que jusqu'à 25 % de remplacement de GR aucun changement de la résistance à la compression n'a été constaté pour le même rapport E/C. Pour un béton ayant 100 % de GR, la résistance à la compression a été réduite de 20 % à 25 %.

Cependant, pour obtenir la même résistance avec 50 % à 100 % de remplacement de GR, le rapport E/C devait être inférieur de 4 % à 10 % de celui du BGN.

Abd Elhakam *et al.* [83] ont aussi trouvé que la résistance à la compression du béton n'est pas affectée jusqu'à 25 % de GR. Cependant, l'augmentation de la teneur en GR au-delà de cette limite a un effet négatif sur la résistance à la compression du BGR. La réduction de la résistance à la compression après 28 jours est de 3.0 %, 7.1 %, 11.6 % et 16.2 % pour le béton avec 25%, 50%, 75% et 100% de GR par rapport au BGN, respectivement.

Limbachiya *et al.* [53] a montré que le GR n'a pas d'effet sur la résistance à la compression du béton jusqu'au 30 % de remplacement de GR, mais au-dessus de 30 %, la résistance diminue progressivement à mesure que la teneur en gravier recyclé augmente.

Ayob *et al.* [17] ont constaté que la teneur en GR affecte considérablement la résistance à la compression du BGR (Figure 3.5). La figure 3.5 montre qu'au-dessous de 50 % de GR, la résistance à la compression est légèrement affectée. Pour 100 % de GR, une diminution importante de la résistance est enregistrée.

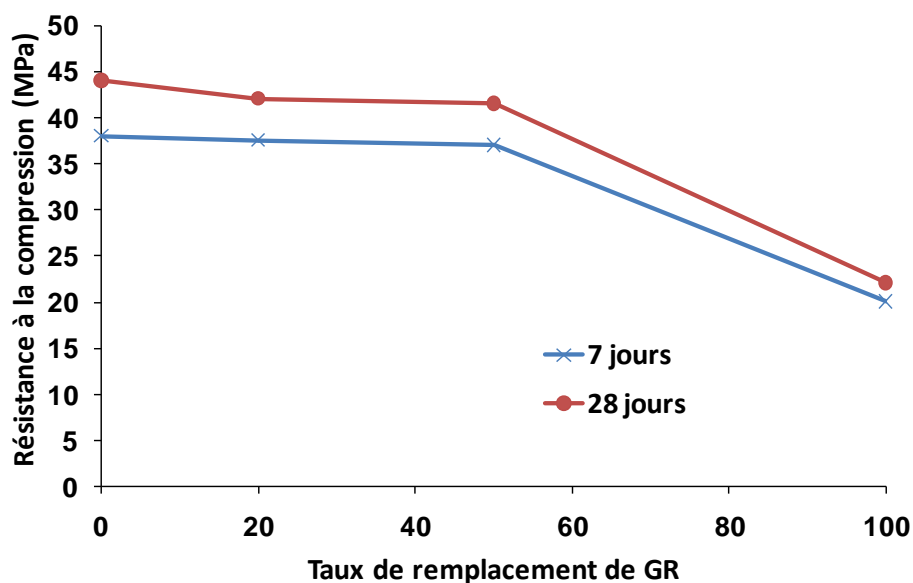


Figure 3. 5. Résistance à la compression du béton en fonction du taux de GR [17].

Tu *et al.* [50] ont étudié les propriétés des BHP à base de granulats recyclés. Ils ont trouvé une réduction de 20 à 30 % de la résistance à la compression. Ils ont conclu que les granulats recyclés ne conviennent pas pour la production d'un béton à hautes performances en raison de leurs propriétés instables et la faible résistance des granulats recyclés.

Plusieurs chercheurs [102-106] ont également montré que l'ajout de granulats recyclés de maçonnerie, malgré leur plus grande absorption d'eau, aura une influence marginale sur l'ouvrabilité du béton à condition qu'il soit compensé par une quantité d'eau supplémentaire. Toute différence perceptible est susceptible d'être associée à la forme plus irrégulière des particules de briques et en céramique concassés par rapport aux GR et GN.

Kenai et Debieb [59] ont trouvé que la résistance à la compression des bétons recyclés à base de briques et de béton concassé diminue en fonction du pourcentage de substitution des granulats recyclés (gros et fins). Cette diminution est due principalement à l'augmentation du rapport E_{eff}/C et à la présence des granulats recyclés qui augmentent la quantité d'eau efficace pour maintenir la consistance et par la suite la résistance diminue, et aussi à cause de l'effet du mortier attaché aux GR qui gêne le bon déroulement de l'hydratation du ciment. Par contre, pour le béton à base de granulats de briques concassées, cette chute de résistance est due principalement à la valeur élevée de l'absorption d'eau de ces granulats fins recyclés.

Par ailleurs, plusieurs études ont rapporté que la résistance à la compression des BGR est supérieure à celle du BGN, en particulier à long terme (par exemple 28 jours) [16, 55, 64, 96-98]. En effet, les granulats recyclés par leur grande absorption peuvent stocker plus d'eau, cette eau peut être libérée dans le nouveau mortier au fil du temps et hydrater plus longtemps le ciment, ce qui améliore la résistance à la compression des BGR avec l'âge [96, 98]. La présence de ciment non hydraté dans l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés peut améliorer la résistance à long-terme.

McNeil et Kang [48] ont montré qu'il est possible de confectionner un BGR plus résistant qu'un béton conventionnel si le béton parent duquel sont issues les GR est plus résistant que le béton à fabriquer.

Poon *et al.* [97] ont rapporté que l'influence des GR sur la résistance à la compression du BGR est significativement influencée par l'état d'humidité initial du GR où la diminution de la résistance est plus importante. Selon le niveau d'humidité, la résistance à la compression peut être réduite jusqu'à 30 % ou augmenter jusqu'à 20 % pour 100 % de GR utilisés, comme le montre la figure 3.6.

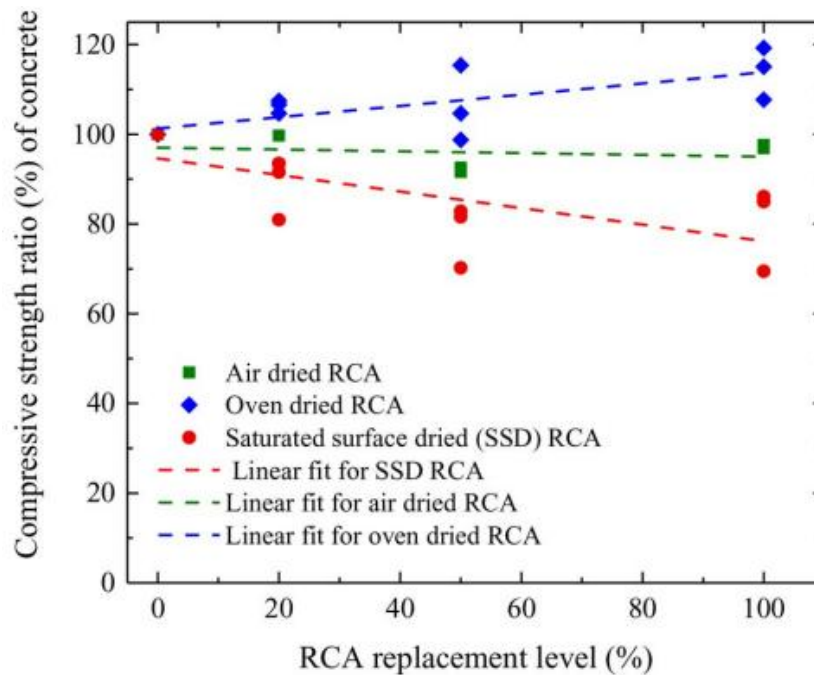


Figure 3. 6. Variation de la résistance à la compression du béton avec le taux de GR pour différentes conditions d'humidité initiales [97].

La résistance à la compression du béton à base de sable recyclé est comparable à celle du béton avec sable naturel. En effet, le sable recyclé contient une importante quantité de ciment hydraté et non hydraté pouvant atteindre jusqu'à 25 % de son poids, augmentant la quantité totale de ciment dans le mélange [55, 107].

La méthode de malaxage en deux étapes développée par Tam [82] et Abd Elhakam *et al.* [83], dans la production du béton recyclé permet d'avoir une résistance à la compression plus élevée que celui produit avec la méthode de malaxage classique.

Il a été constaté que la résistance du BGR peut être aussi supérieure à celle du béton parent, pourvu que le rapport E/C de la pâte entourant les granulats (soit celui du béton parent) soit identique ou inférieur à celui du béton recyclé [20, 97].

La relation entre la résistance du béton parent et la qualité de mortier attaché aux GR a été également étudiée par De Juan et Gutiérrez [21]. La figure 3.7 présente une relation entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression du béton parent. D'après la figure 3.7, pour les granulats recyclés avec un coefficient de Los Angeles inférieur à 40 % nécessitent des bétons parents avec une résistance à la compression supérieure à 25 MPa [21].

Le tableau 3.1 montre les diminutions de la résistance à la compression des BGR pour différent taux de remplacement des GR.

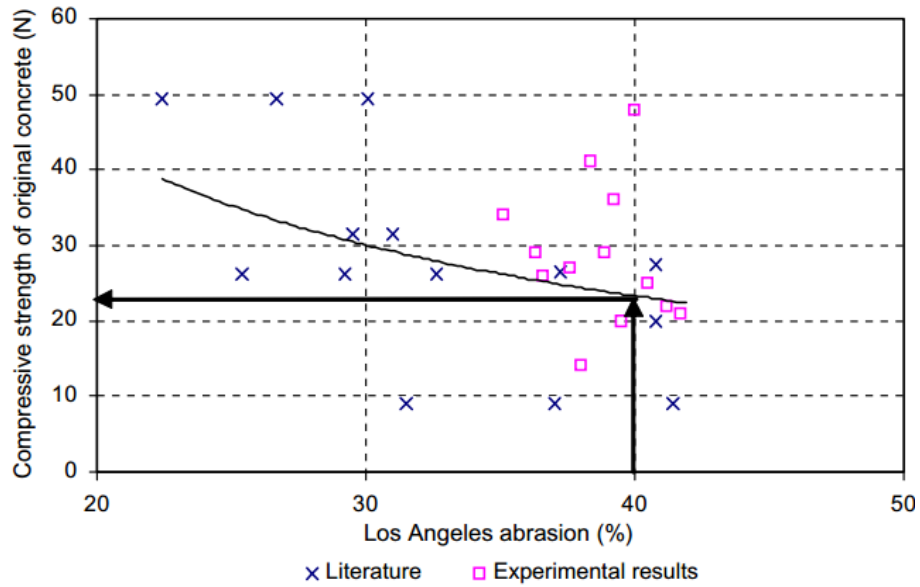


Figure 3. 7. Relation entre l'abrasion et la résistance à la compression de béton parent [21].

Tableau 3. 1. Variation de la résistance à la compression des BGR à 28 jours.

Auteurs	Taux de Remplacement du GR (%)	Variation de la résistance à la compression du BGR par rapport au BGN (%)
Alam <i>et al.</i> [108]	25	15
	50	14.7
Kwan <i>et al.</i> [109]	30	9.5
	60	30
Yang <i>et al.</i> [98]	30	10
	50	5
	100	11
McGinnis <i>et al.</i> [110]	50	16.6
	100	26.4
Pedro <i>et al.</i> [111]	100	13–19
Eckert [111]	25	0
	50	1.3
	100	5.1
Folino <i>et al.</i> [101]	30	8
	60	17
	100	20
Xiao <i>et al.</i> [72]	30	5
	50	17.5
	70	15.6
	100	25.6
Abd Elhakam <i>et al.</i> [83]	25	3
	50	7.1
	75	11.6
	100	16.2
Gesoglu [64]	100	11.8–16.9

3.2.4. Résistance à la traction

Une étude de Katz [107] a indiqué que la résistance à la traction du béton fabriqué avec du GR est environ 6 % inférieure à celle du BGN. D'autres études ont montré que la réduction de la résistance à la traction du béton contenant du GR peut atteindre 10 % lorsque seuls les graviers naturels étaient remplacés par des graviers recyclés. En cas de remplacement à la fois grossier et fin de GN par GR, la résistance à la traction a été réduite de 10 % à 20 % [44].

Etxeberria *et al.* [16] ont compensé la réduction potentielle de la résistance à la traction due à l'incorporation de GR en ajoutant du ciment (jusqu'à 25 kg/m³) tout en conservant la même quantité d'eau.

Brand *et al.* [81] ont amélioré la résistance à la traction du BGR par la méthode de malaxage en deux étapes et en utilisant des granulats pré-saturés.

3.2.5. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion du béton est un autre facteur affectant les performances structurelles du béton. Il a été observé que la résistance à la flexion du BGR diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du GR. Une étude de Katz (2003) [107] a indiqué que la résistance à la flexion du BGR est inférieure de 10 % à celle du BGN. La diminution de la résistance à la flexion BGR était importante lorsque des GR étaient utilisés saturés [77, 97]. Ceci est attribué à la mauvaise qualité de la liaison interfaciale développée entre l'ancien mortier attaché au GR et le nouveau mortier. Alors que, les études de Limbachiya *et al.* [53], Beltrán *et al.* [112] et Sri Ravindrarajah et Tam [24] ont indiqué que le GR n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la flexion du béton.

Parthiban & Saravana Raja Mohan [113] ont étudié l'influence des GR sur les propriétés mécaniques des BGR. Ils ont trouvé des résistances à la flexion à 28 jours de 4.84, 5.29, 5.28, 5.18 et 4.51 MPa pour 0, 25, 50, 75 et 100 % de taux de remplacement des granulats naturels respectivement. La résistance à la flexion pour 25, 50 et 75 % de GR est supérieure à celle du BGN. Cette amélioration est due principalement à la forme angulaire du GR utilisé, ce qui produit une bonne adhérence entre les granulats donnant lieu à une meilleure résistance à la flexion des BGR.

Gesoglu [64] ont trouvé à 56 jours une réduction de 16.3 à 23.7% de la résistance à la flexion pour un taux de 100 % de GR.

Barra et Vasquez [114] ont constaté que l'utilisation des GR saturées impliquait une réduction sensible de la résistance à la traction par flexion du BGR par rapport au béton conventionnel, car à des niveaux de saturation plus élevés, la liaison mécanique entre la pâte de ciment et les granulats recyclés s'affaiblit. Un meilleur comportement a été constaté en utilisant des GR semi-saturés.

Huoth *et al.* [93] ont étudié l'effet de la fumée de silice sur les propriétés du BGR. Ils ont trouvé que la résistance à la flexion du BGR à 28 jours est de 12 % inférieure à celle du BGN, en utilisant une substitution de 10 % de fumée de silice. Ils ont conclu que la résistance à la flexion a été augmentée de 6 % avec une addition de 10 % de fumée de silice qui semble être le pourcentage de remplacement optimal par rapport au BGN (Figure 3.8). Les résultats indiquent que l'inclusion de la fumée de silice améliore les propriétés du BGR et permet son utilisation dans les applications structurelles.

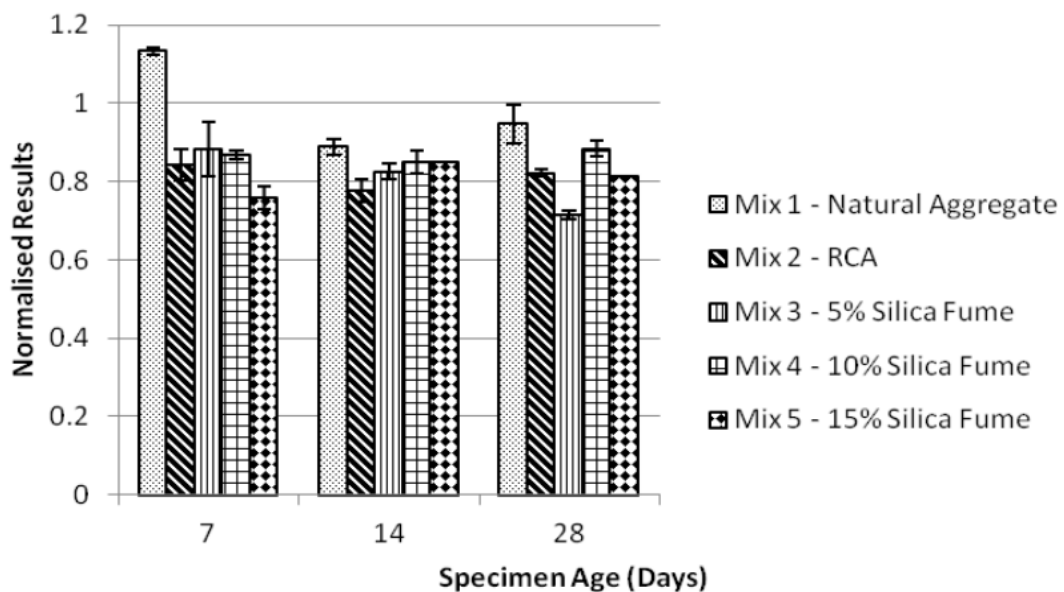


Figure 3. 8. Résultats de résistance à la flexion [93].

3.2.6. Résistance au fendage

Comme pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage des bétons à base de granulats recyclés est inférieure à celle du béton de granulats naturels et elle diminue lorsque la quantité des granulats recyclés augmente.

Folino *et al.* [101] ont trouvé une réduction de la résistance au fendage à 28 jours de l'ordre 4 %, 3 % et 18 % lorsque le béton contient de 30 %, 60 % et 100 % de graviers recyclés, respectivement.

Thomas *et al.* [40] ont trouvé une diminution de la résistance au fendage à 28 jours de l'ordre 10 %, 15 % et 20 % pour des taux de GR de 20 %, 50 % et 100 %, respectivement.

De même, Gesoglu [64] ont trouvé à 56 jours une réduction de 7.4 à 17.6 % de la résistance au fendage pour un taux de 100 % de GR.

Etxeberria *et al.* [16] ont trouvé que la résistance au fendage des BGR est supérieure à celle des bétons conventionnels, sauf pour le béton avec 100 % de GR.

Kou et Poon [95] ont constaté des améliorations de la résistance à la traction par fendage des bétons de granulats recyclés après 5 ans de durcissement et qui dépassent parfois la résistance à la traction des bétons de granulats naturels, due à l'amélioration de la microstructure de la zone de transition interfaciale et donc une augmentation de l'adhérence entre la nouvelle pâte de ciment et les GR, comme le montre la figure 3.9. A 1 an, la résistance au fendage des bétons préparés avec 100 % de GR étaient supérieures à celles du béton de GN. Après 5 ans, le béton avec 100 % de GR avait un gain de 42 % à 65 % par rapport au béton de granulats naturels.

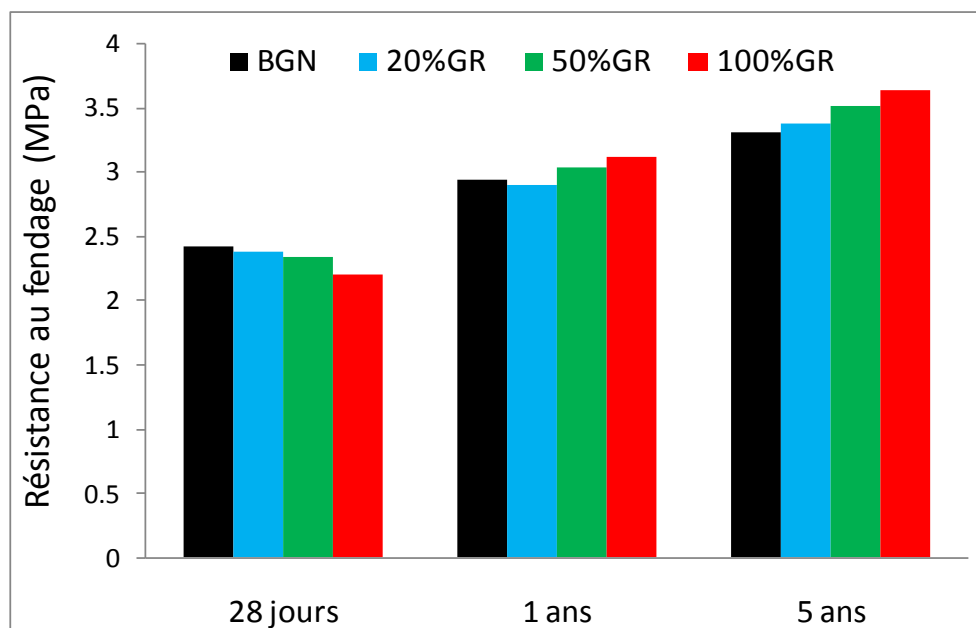


Figure 3. 9. Evolution de la résistance au fendage en fonction du taux de GR [95].

3.2.7. Module d'élasticité

Plusieurs études ont indiqué que le béton contenant du GR a un module d'élasticité inférieur à ceux contenant du GN, et la réduction est proportionnelle à l'augmentation du taux de GR utilisée [16, 35, 60, 72, 87, 115]. Généralement, la diminution du module d'élasticité du BGR est due à la grande quantité du mortier attaché au granulat d'origine avec un module d'élasticité relativement faible du GR par rapport au GN, du fait que le module d'élasticité du béton dépend principalement du module d'élasticité des granulats [116].

Hansen [44] a trouvé que la valeur du module d'élasticité pour le béton à base de BGR était de 10 à 33 % inférieure par rapport à celle du BGN.

Gesoglu [64] ont trouvé à 56 jours une réduction de 23.6 à 26.0 %, du module d'élasticité pour un taux de 100 % de GR.

Xiao *et al.* [72] ont indiqué que pour un béton à base de 100 % de GR, le module d'élasticité du béton diminue d'environ 45 %.

Kou *et al.* [115] ont également conclu que le module élastique du BGR diminue à mesure que le pourcentage de remplacement du GR augmente et que le module élastique du BGR avec 100 % de GR est environ 40 % inférieur à celui du BGN.

Etxeberria *et al.* [16] ont également constaté que le module d'élasticité des BGR diminue lorsque le taux de GR augmente. Le module d'élasticité du béton avec 100 % de GR est inférieur de 15 % à celui du BGN. En effet, les granulats recyclés sont plus déformables que les granulats naturels et ils ont un module d'élasticité plus faible que les granulats naturels. De plus, le module d'élasticité du béton dépend de manière significative du module d'élasticité des granulats.

La variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage de remplacement du GR dans le béton rapportée par plusieurs chercheurs est présentée à la figure 3.10. D'après cette figure, le module d'élasticité diminue jusqu'à 20 % pour un taux de remplacement de 100 % de GR. Cependant, sur la base des données de la littérature, la variation du module d'élasticité est plus faible (bande de 95 %).

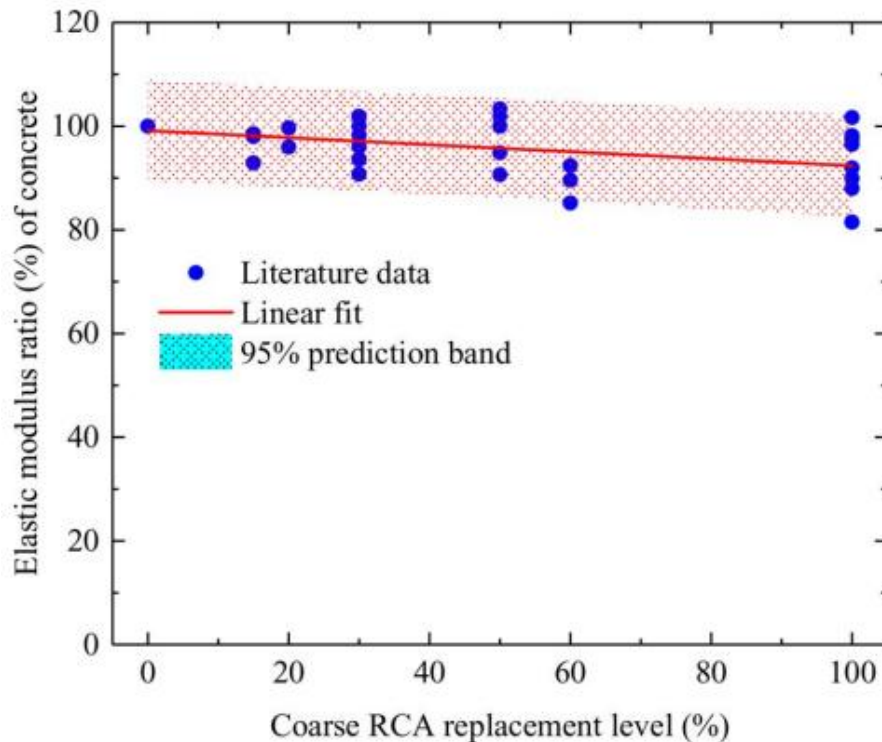


Figure 3. 10. Module d'élasticité des BGR en fonction du taux de GR [53, 55, 64, 87, 112].

Sri Ravindrarajah et Tam [24] ont montré que la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression pour le béton à base de granulats recyclés est différente de celle pour le béton conventionnel.

Chen *et al.* [117] ont utilisé la brique et la tuile comme granulats recyclés. Ils ont trouvé que le module d'élasticité du BGR, était d'environ 20 à 30 % inférieur à celui du béton normal, comme le montre la figure 3.11. Cela signifie que la brique et la tuile contenues dans les granulats recyclés ne modifie pas de manière significative les valeurs du module d'élasticité du béton recyclé. En outre, la modification du rapport eau/ciment ou la teneur en brique et en tuile dans le granulat recyclé n'a pas d'effet significatif sur le module d'élasticité.

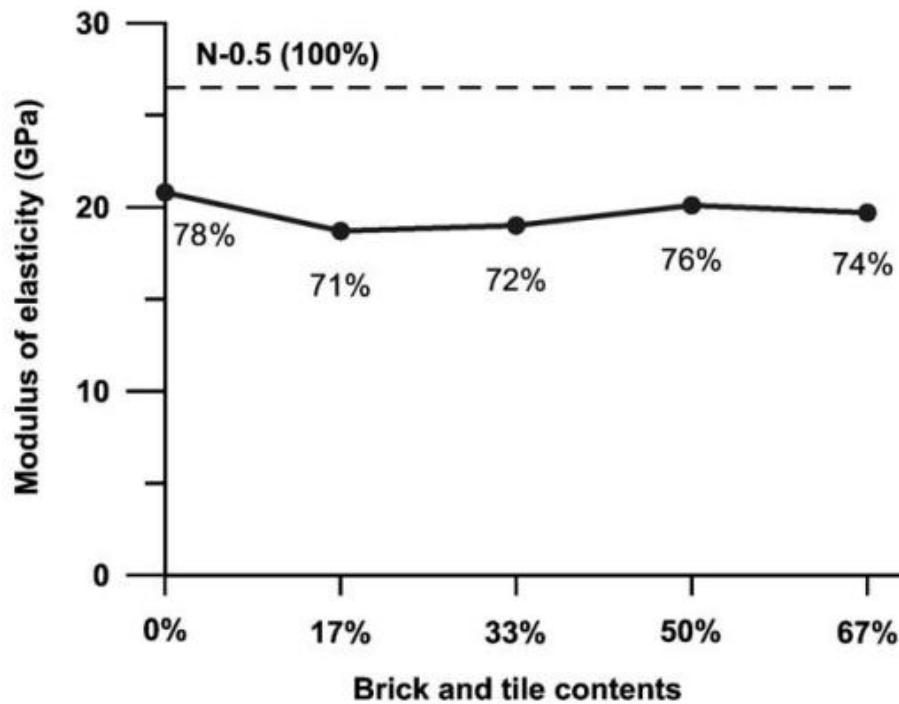


Figure 3. 11. Module d'élasticité du béton en fonction du taux de GR de brique et tuile [117].

De même, Debieb et Kenai [41], Akhtaruzzaman *et al.* [118] et Alves *et al.* [119] ont trouvé une réduction allant jusqu'à 30 % du module d'élasticité pour le béton à base de briques concassées par rapport au béton de granulats naturels.

Salesa *et al.* [120] ont étudié les propriétés physico-mécaniques du béton multi-recyclé de l'industrie du béton préfabriqué. Ils ont trouvé que le module d'élasticité du BGR à la fois diminue par rapport au béton témoin. Ceci est dû à l'augmentation du mortier attaché à chaque cycle de recyclage car la pâte de ciment a moins de module d'élasticité que les granulats naturels.

Duan et Poon [27] ont étudié l'effet de la quantité du mortier attaché aux GR sur le module d'élasticité (Figure 3.12). Ils ont montré que les valeurs du module d'élasticité du béton RA1 fabriqué avec un GR contenant 24 % de mortier attaché sont similaires à celles du BGN à 28 et 90 jours. Cependant, pour les bétons RA2 et RA3 fabriqués avec un GR contenant respectivement 34 % et 61 % de mortier attaché une diminution importante a été enregistrée.

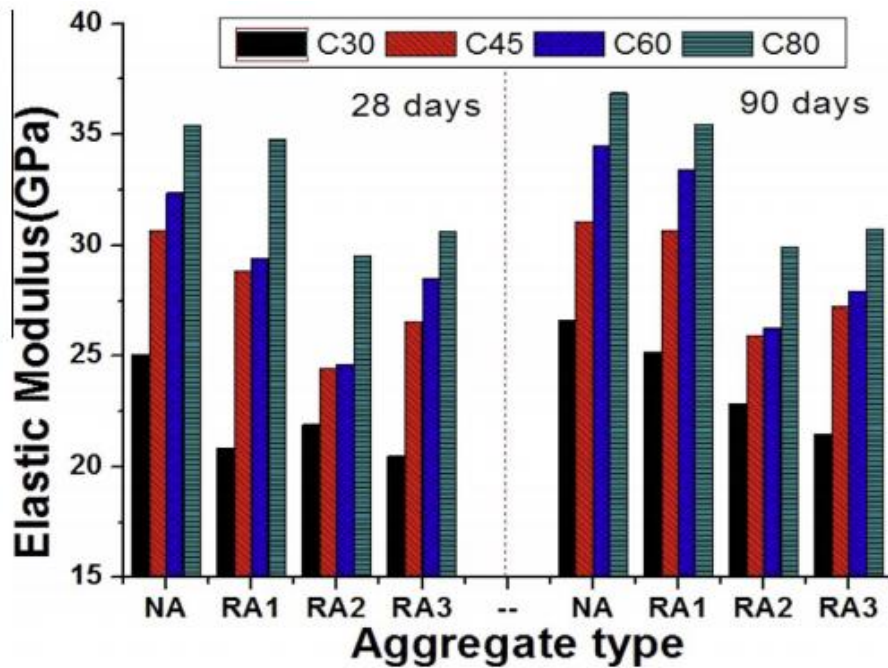


Figure 3. 12. Effet de la quantité de mortier attaché sur le module élasticité [27].

3.2.8. Effet de la qualité du béton parent sur les propriétés mécaniques du BGR

La résistance des bétons incorporant les granulats recyclés est liée à la qualité du béton dont sont initialement issus les granulats. La résistance d'un béton incorporant des granulats issus d'un béton à haute résistance sera plus élevée que celle d'un mélange incorporant des granulats recyclés issus d'un béton moins performant [16, 48, 53].

Padmini *et al.* [60] ont étudié l'influence de la qualité du béton parent sur les propriétés mécaniques du béton à base de GR. Ils ont montré que l'absorption d'eau du GR augmente avec la résistance du béton parent. En effet, dans un béton parent à haute résistance on utilise généralement une grande quantité de ciment, ce qui augmente la quantité de mortier attaché aux granulats. Par conséquent, l'ajustement de la teneur en eau du malaxage est obligatoire pour le nouveau béton, y compris le GR dérivé d'un béton parent de résistance plus élevée pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée. Le GR poreux affecte la résistance du béton. Le pourcentage de perte de résistance à la compression ou à la traction du BGR dû à l'utilisation de GR est plus significatif lorsqu'il est dérivé d'un béton de faible résistance que d'un béton plus résistant. Le rapport de la résistance du BGR sur la résistance du béton parent est représentée sur la figure 3.13 [60], les observations suivantes sont tirées de cette figure :

- Pour une résistance moyenne donnée, la résistance du BGR augmente avec la taille maximale des GR obtenus à partir du même béton parent;
- Pour un granulat recyclé donné, la résistance obtenue augmente avec l'augmentation de la résistance du BGR;
- Pour un granulat recyclé donné, la résistance du BGR diminue avec l'augmentation de la résistance du béton parent à partir duquel le granulat recyclé est fabriqué.

Les raisons d'un tel comportement sont dues à l'influence des propriétés des granulats recyclés sur le béton. A mesure que la taille maximale des granulats diminue, la quantité de mortier attaché augmente, ce qui entraîne une réduction importante de la résistance du BGR. A mesure que la résistance du béton parent augmente, la quantité de mortier attaché aux GR augmente quelle que soit la taille des granulats, cela a également une influence sur la résistance du BGR.

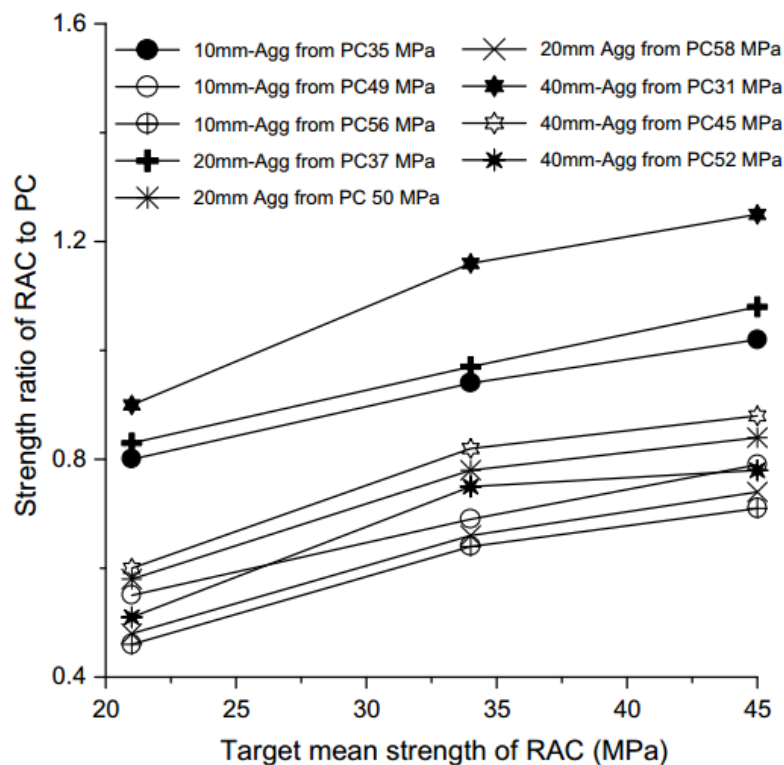


Figure 3. 13. Influence de la résistance du béton parent sur la résistance du BGR [60].

Tavakoli et Soroushian [121] ont rapporté que si la résistance à la compression du béton parent est supérieure à celle du béton témoin (BGN), alors la résistance à la compression du BGR peut être également supérieure à celle du BGN.

Ajdukiewicz et Kliszczewicz [122] ont étudié l'influence des GR obtenus à partir d'un béton de démolition de résistance moyenne élevée sur les propriétés du BGR. Ils ont trouvé que les propriétés du béton parent ont une influence significative sur les propriétés mécaniques du BGR; la résistance à la compression du BGR est plus élevée que celle du béton conventionnel lorsque le GR a été produit avec des granulats du BHP. La résistance à la compression de 80 MPa a été atteinte en utilisant des GR originaires d'un béton de 60 MPa de résistance.

Gonzalez-Corominas et Etxeberria [123] ont étudié la formulation d'un BHP en utilisant trois graviers recyclés GR40, GR60 et GR100 originaires de trois bétons de résistances 40, 60 et 100 MPa respectivement. Ils ont trouvé qu'à 28 jours, les BHP produits en utilisant 100 % de graviers recyclés GR100 et 50 % de gravier recyclés GR60 et GR40 ont eu des résistances à la compression similaires à celles du BGN. A 90 jours, les bétons à base de granulats recyclés présentaient des gains de résistance plus élevés que ceux du BGN. Les mêmes résultats ont été obtenus par Pedro *et al.* [124]. L'amélioration de l'ITZ et le durcissement interne pourraient être responsables de l'amélioration des performances mécaniques du BHP à base de granulats recyclés [16, 125].

Afroughsabet *et al.* [126] ont trouvé que la résistance à la compression des BGR fabriqués avec un GR issu d'un béton de 80 MPa est égale ou légèrement supérieure à celle du BGN à tous les âges d'essai. Cette amélioration de résistance peut être expliquée par les CSH supplémentaires provenant de l'hydratation du ciment contenu dans le mortier attaché. Cependant, le remplacement du GN par un GR issu d'un béton de 40 MPa a entraîné une réduction de la résistance à la compression du BGR, de ce fait, la résistance du béton d'origine affecte celle du BGR.

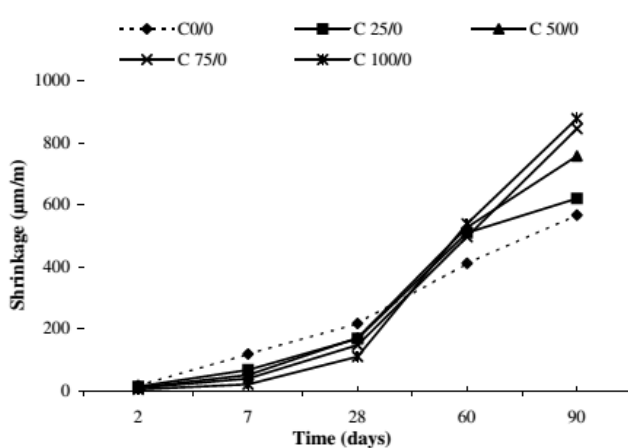
3.3. Retrait des BGR

Le retrait et le fluage sont deux déformations indissociables du comportement du béton. Ils trouvent leur origine dans la pâte de ciment. Les bétons à base de granulats recyclés tendent à avoir un retrait plus important. L'ampleur du retrait de séchage est affectée par la teneur en pâte et en E/C de béton. Le béton fabriqué avec du GR contient généralement une teneur en pâte plus élevée en raison de son ancien et nouveau mortier, et donc, le béton contenant du GR a une plus grande amplitude de retrait de séchage par rapport au béton conventionnel [35, 45, 112, 127].

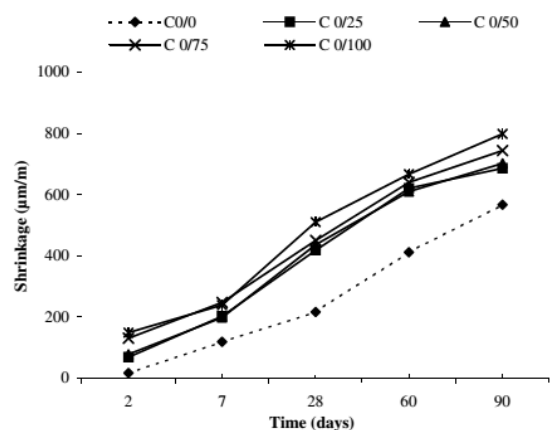
L'augmentation du retrait du BGR résulte de l'augmentation de la teneur en eau et du faible module d'élasticité du granulats recyclés.

Le béton fait avec du gravier recyclé et du sable naturel a un retrait plus élevé de 20 % à 50 % par rapport au béton conventionnel tandis que le béton fait avec les du gravier et sable recyclés a un retrait de 70 % à 100 % plus élevé que le BGN [128]. L'incorporation du sable recyclé induit un retrait de séchage plus élevé en raison de la teneur relativement de l'ancienne pâte de ciment par rapport au gravier recyclé qui conduit à une absorption élevée [129]. Dans une étude expérimentale. Verian [35] a trouvé un retrait de plus de 0.055 % pour le béton fabriqué avec 100 % de gravier recyclé après 150 jours, tandis que le béton témoin a eu un retrait inférieur à 0.03 %.

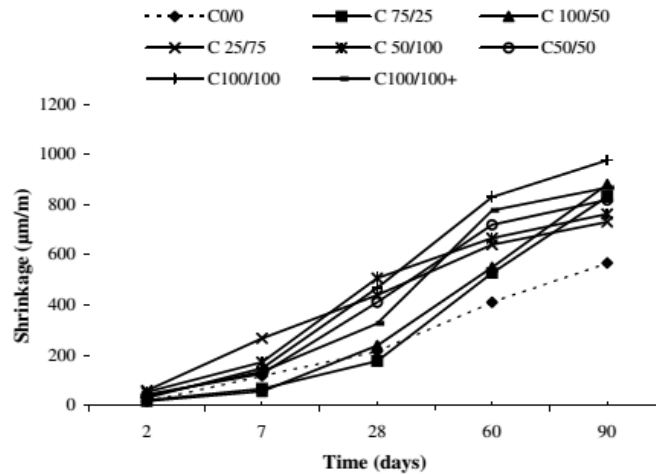
Debieb et Kenai [41] ont étudié l'effet de substitution des granulats naturels par des granulats de briques concassées sur le retrait du séchage, avec de pourcentage de remplacement de (25, 50, 75 et 100 %). Ils ont remarqué que le béton en briques concassées (CG/0) présente jusqu'à 28 jours un retrait différé par rapport aux bétons de granulats naturels; Ceci est suivi d'une augmentation abrupte jusqu'à 80 % à l'âge de 90 jours. Pour le béton en briques fines concassées (C0/S), le retrait à un âge précoce est presque six fois supérieur à celui de BGN et continue avec le même taux d'augmentation jusqu'à 90 jours, comme montre dans la figure 3.14. Cela est probablement dû au fait qu'il y aura un mouvement de l'eau dans les granulats de briques fines découlant des changements de la teneur en humidité en tant que produit de séchage.



(a) Retrait du béton contenant des gros granulats de la brique concassée.



(b) Retrait du béton contenant des fines de la brique concassée.



(c) Retrait du béton avec des granulats grossier et fine de brique concassé.

Figure 3. 14. Retrait du béton avec différents granulats recyclés.

Domingo-Cabo *et al.* [130] ont trouvé que le retrait du BGR avec un pourcentage de substitution de 50 % était d'environ 20 % supérieure à celle du béton témoin, alors qu'avec une substitution de 100 %, l'augmentation du retrait a atteint 70 % après 180 jours.

Le retrait augmente avec l'augmentation du rapport E/C [131], les effets de la température et de l'humidité relative sur le comportement de retrait sont prononcés.

Kenai et Debieb [59] ont remarqué que le retrait à l'air libre des BGR est nettement plus important que celui du BGN (Figure 3.15), cela est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier attaché. Ils ont observé qu'un retrait important ne se manifeste qu'au-delà d'un certain âge. Ceci est dû principalement au pré-mouillage des gros granulats de brique concassée avant le malaxage du béton recyclé. Les granulats pré-imbibés d'eau avant gâchage jouent le rôle d'une réserve d'eau qui permet de compenser pendant un certain temps le séchage de la pâte de ciment. L'incorporation d'un adjuvant superplastifiant, réduit le retrait du béton recyclé. Pour cela il est préférable de limiter le pourcentage de substitution en granulats recyclés et en particulier les granulats fins.

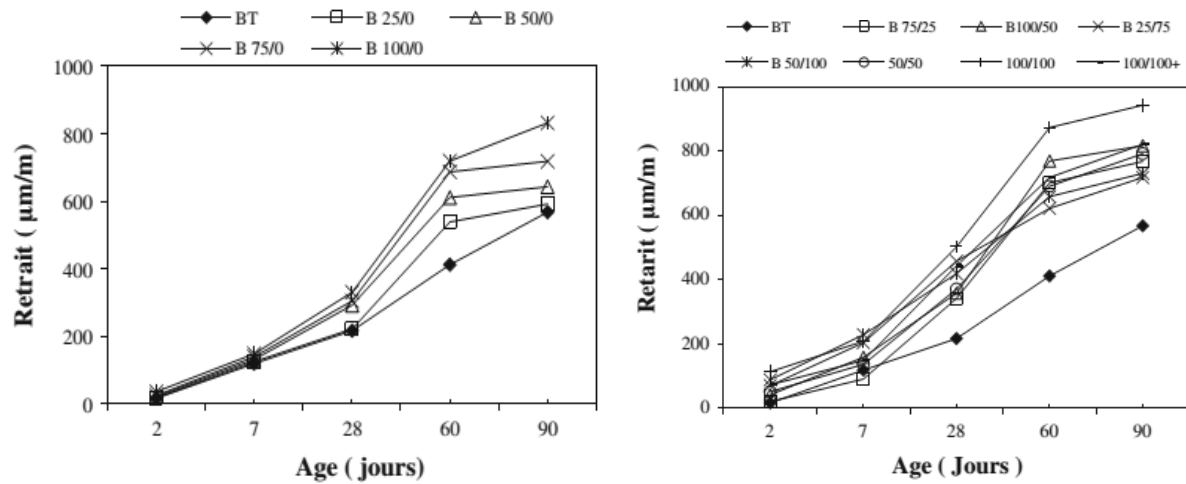


Figure 3. 15. Retrait des bétons à base de granulats de béton concassé [59].

3.4. Fluage des BGR

Des travaux de recherche limités ont été menés sur le fluage du béton à base de GR. Le fluage du BGR est généralement de 30 à 60 % supérieur à celui du BGN [24, 44, 132, 133]. En effet, le fluage est proportionnel à la teneur en pâte, qui peut être jusqu'à 50 % plus élevée dans le béton à base de GR [128].

Kou et Poon [134] ont rapporté que la déformation de fluage du BGR atteignait plus de 600 µm contre moins de 500 µm pour le BGN.

Domingo-Cabo *et al.* [130] ont trouvé que la déformation de fluage du BGR avec un pourcentage de substitution de 20 % était supérieure de 35 % à celle du BGN. Pour un niveau de substitution de 50 %, la déformation était de 42 % plus élevée, alors que pour le niveau de substitution à 100 %, l'augmentation de la déformation du fluage était de 51 %.

3.5. Durabilité des BGR

La durabilité du béton est sa capacité à résister à divers types de dommages, en maintenant sa résistance et son intégrité durant sa période d'exposition à un milieu environnant. La durabilité du BGR est généralement affectée par le mortier attaché au GR. plus la quantité de mortier attaché au GR est élevée, plus la porosité et l'absorption d'eau sont élevées, conduisant à des performances de durabilité plus faibles du BGR.

3.5.1. Absorption capillaire

L'ancienne pâte de ciment présente dans le GR contient des microfissures dues au processus de concassage d'anciens blocs de béton provenant des déchets de démolition des bâtiments. Ces fissures sont responsables de l'augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau des BGR. Le taux d'absorption capillaire du béton dépend de la pénétrabilité du système des pores [135].

Kenai et Debieb [59] ont constaté que l'absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés de béton et de brique (gros et fins) est plus élevée de 1.5 à 3.5 fois que celle du béton témoin (Figure 3.16), cette augmentation est due à la forte absorption d'eau des gros et fins granulats de bétons et de briques concassées (2-11 fois pour les gros et 5-14 fois pour les fins) que celui des granulats naturels.

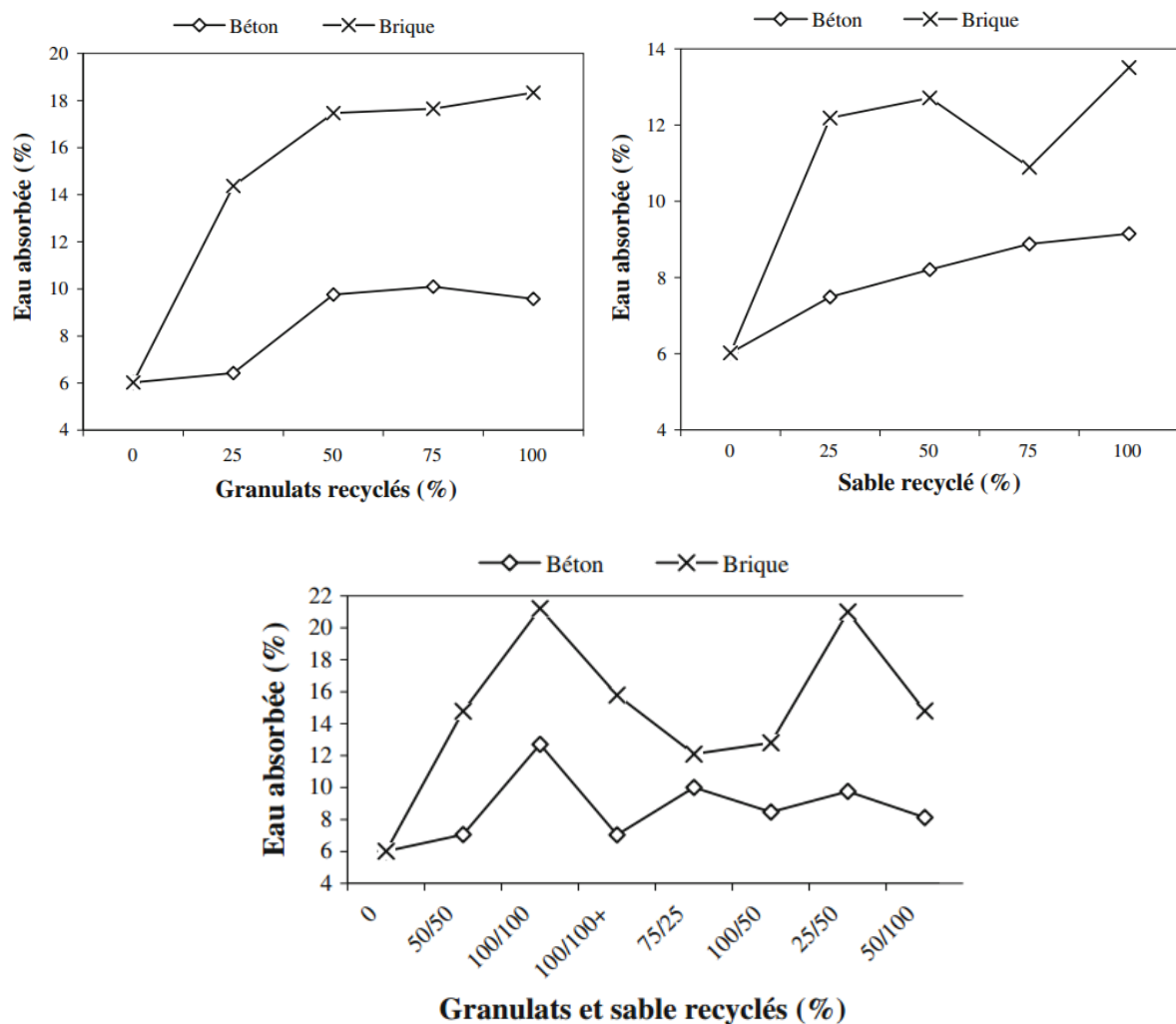


Figure 3. 16. Absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés [59].

Ayob *et al.* [17] ont remarqué que les taux d'absorption d'eau du BGR étaient plus élevés que ceux du béton normal (Figure 3.17). Le taux d'absorption d'eau du granulat naturel a été de 2.6 %. La valeur d'absorption d'eau la plus élevée a été obtenue pour un spécimen de 100 % de GR, soit 0.6 fois plus élevé que celui de la normale. Cela est dû à la plus grande capacité d'absorption des GR, résultant du mortier de ciment attachée à sa surface, et le niveau de substitution de GR, qui a ensuite développé une pression d'osmose plus élevée dans la matrice de béton.

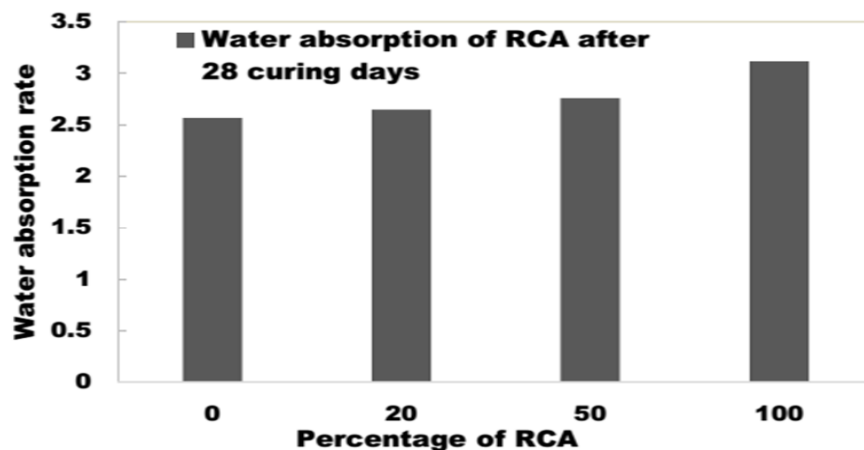


Figure 3. 17. Evolution du taux d'absorption en fonction du taux de GR à 28 jours [17].

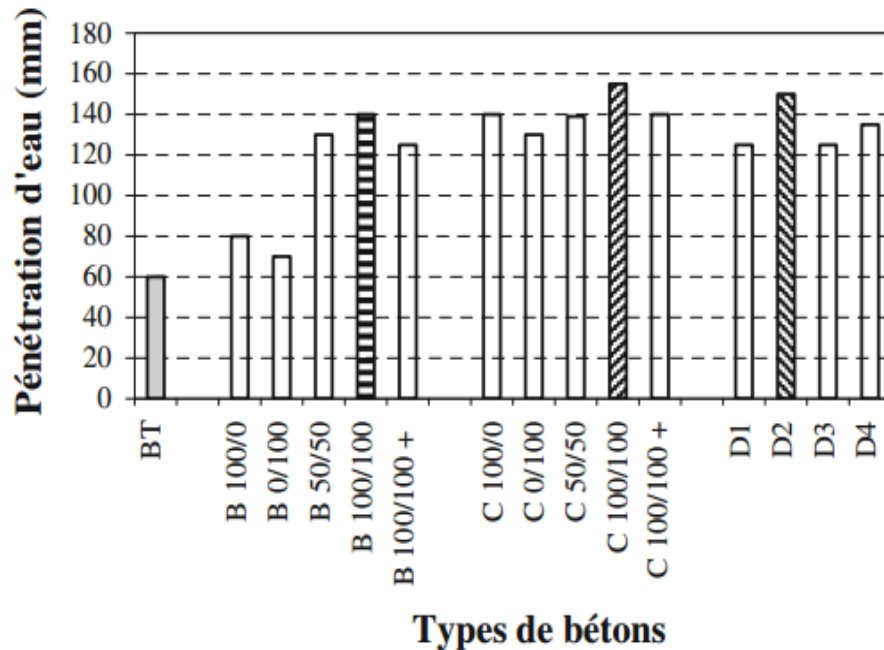
3.5.2. Perméabilité à l'eau

La perméabilité du béton est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. La perméabilité à l'eau d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Les mesures de perméabilité à l'eau sont souvent considérées comme plus fiables pour évaluer les propriétés de transport du béton.

Kapoor *et al.* [136] ont trouvé que les profondeurs de pénétration de l'eau ont augmenté de 11.2 % et 30 % avec le remplacement de 50 % et 100 % de GR, respectivement, à 28 jours. La substitution du sable naturel par du sablé recyclé a un effet moins prononcé en augmentant la profondeur de pénétration de l'eau par rapport au béton à base de gravier recyclé.

Kenai et Debieb [59] ont constaté que la perméabilité à l'eau a parfois doublé avec des bétons fabriqués avec des granulats en briques concassées par rapport au BGN (Figure 3.18). Les bétons recyclés à base de granulats de briques concassées sont un peu plus perméables que les autres bétons recyclés. La perméabilité à l'eau des BGR est fort influencée par la

nature et le pourcentage de granulats recyclés. Ils ont recommandé de prendre soin lors de la confection des mélanges à l'aide de briques concassées comme granulats.



B: GR de béton. C: GR de brique. D: GR de béton et brique

Figure 3. 18. Variation de la pénétration d'eau des bétons recyclés [59].

3.5.3. Carbonatation

La carbonatation et la pénétration des ions chlorure sont responsables de la corrosion des armatures dans le béton armé. La carbonatation du béton est un processus physico-chimique dans lequel une série de réactions chimiques se produisent en présence de CO_2 et favorise la réduction du pH dans le béton. Le CO_2 pénètre dans le béton principalement par diffusion lente de la surface vers l'intérieur du béton. La carbonatation dépend de la perméabilité et de l'humidité du béton.

En raison de la porosité plus élevée du BGR, la profondeur de carbonatation devrait être plus importante pour un BGR que pour un BGN. Xiao *et al.* [137] ont rapporté que la profondeur de carbonatation du BGR diminuait lorsque le taux de GR dépassait 70 %. Ce phénomène s'explique par le fait que le BGR a une teneur totale en liant plus élevée et donc une réserve alcaline plus élevée pouvant être carbonatée, ce qui est favorable à la résistance à la carbonatation.

Levy et Hele [138] ont étudié la carbonatation du BGR. Ils ont trouvé que la profondeur de carbonatation diminue quand la quantité de GR augmente, mais présentant un meilleur comportement quand ce remplacement était de 20 % ou 50 %. Même à 100 % de

remplacement, le niveau de carbonatation était pareil à celui observé pour le BGN, comme le montre la figure 3.19. Ceci est expliqué par la plus haute teneur en ciment du béton recyclé pour atteindre la même résistance à la compression du béton que le BGN.

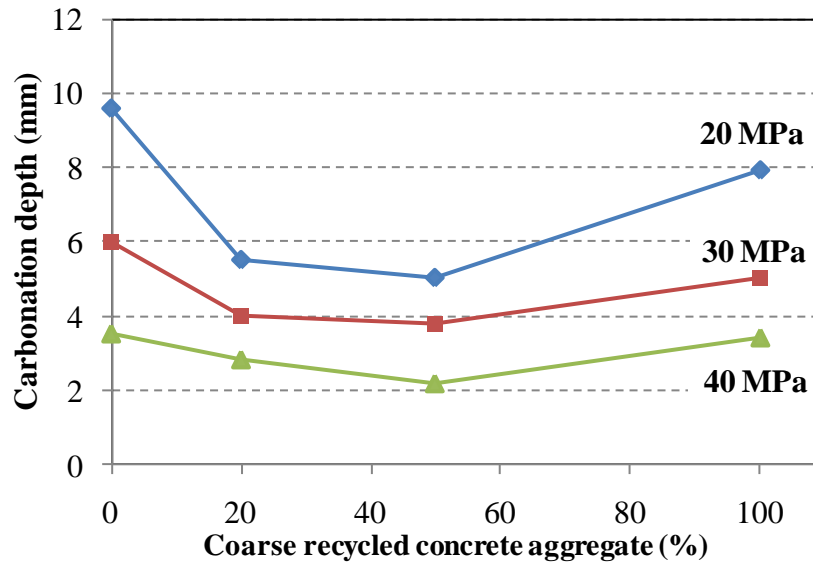


Figure 3. 19. Profondeur de carbonatation du BGR en fonction de la résistance du béton et du taux de GR [138].

Ayob *et al.* [17] ont montré que l'incorporation de GR n'a aucun effet significatif sur la profondeur de carbonatation pour des taux de remplacement de 20, 50 et 100 % de GR, qui variait entre 0.6 mm à 1 mm (Figure 3.20). L'amélioration de la carbonatation du BGR, qui repose sur la réaction chimique entre les minéraux de ciment et le produit d'hydratation, favorise l'adhérence des mortiers, ainsi que les ITZ originales et nouvelles autour de la surface des GR.

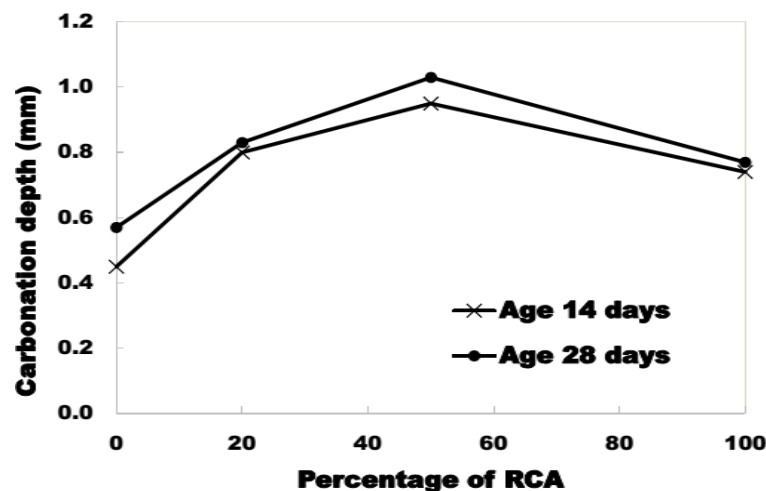


Figure 3. 20. Profondeur de carbonatation du BGR en fonction du taux de GR [17].

Lei *et al.* [67] ont constaté que lorsque le taux de remplacement du GR dépasse 70 %, la profondeur de carbonatation diminuait. Cela est attribué au mortier attaché plus élevée de GR, qui augmente la teneur totale en ciment et diminue le taux de carbonatation.

Sun *et al.* [139] ont constaté que la profondeur de carbonatation était remarquablement réduite avec l'incorporation du laitier. Cela s'explique par les pores moins nombreux et une microstructure plus dense.

Lei *et al.* [140] ont souligné que la profondeur de carbonatation du BGR diminuait avec une augmentation de la résistance du béton d'origine. Mais selon Ryu [141], à un rapport E/C de 0.55, les échantillons de béton préparés avec 100 % de GR avec différents niveaux de résistance présentaient la même profondeur de carbonatation. Cela a été confirmé par Eguchi *et al.* [142], qui ont indiqué que la résistance à la carbonatation du BGR est principalement affectée par le rapport E/C plutôt que par la résistance du béton d'origine.

3.5.4. Résistance à la pénétration des ions chlore

L'attaque du béton par les chlorures survient habituellement lorsque des ions chlore pénètrent de l'extérieur à l'intérieur du béton. Ces ions chlore peuvent provenir des sels fondants ou de l'eau de mer. Deux mécanismes conduisent à la pénétration des chlorures, l'absorption capillaire et la diffusion. Lorsque les chlorures franchissent la zone d'enrobage et atteignent les armatures et au delà d'une concentration critique, ils conduisent à la corrosion des armatures du béton armé.

En général, la résistance à la pénétration des chlorures dans le BGR est inférieure à celle du BGN [143]. Cependant, il a été constaté que lorsque le BGR était préparé avec un faible rapport E/C, il présente de meilleures résistances à la pénétration des ions chlore que la BGN, probablement en raison de la présence des CSH plus élevés dans le BGR, qui permet la fixation et l'absorption des chlorures [144].

Le BGR préparé avec du GR issu d'un béton parent de haute résistance a démontré une pénétration des chlorure plus faible que le béton préparé avec du GR issu d'un béton parent de faible résistance en raison de la faible absorption d'eau du GR [49].

Duan *et al.* [27] ont étudié l'influence de la quantité de mortier attaché sur la résistance à la pénétration des chlorures du BGR. Ils ont montré que la quantité de mortier attaché au GR joue un rôle important sur la résistance à la pénétration des chlorures du BGR.

A mesure que la perméabilité augmente, la résistance à la pénétration des ions chlore du BGR diminue [35, 77]. Kou *et al.* [77] ont rapporté que le béton fait avec 100 % de GR avait une résistance à la pénétration des chlorures inférieure de 40 % à celle du BGN.

Des chercheurs ont montré que les ajouts minéraux améliorent la résistance à la pénétration des chlorures du BGR [145-147]. L'ajout minéral peut affiner la taille des pores et augmenter la quantité de CSH, qui peut absorber plus d'ions chlorure. L'ajout de superplastifiants et de méthodes de malaxage en deux ou trois étapes peuvent également améliorer la résistance à la pénétration des ions chlore du BGR.

3.5.5. Résistance au gel-dégel

La résistance au gel-dégel est aussi utilisée comme un indice d'évaluation de la durabilité du béton. La résistance au gel du béton peut être reflétée en mesurant le module d'élasticité dynamique, la perte de poids et de résistance après exposition aux cycles de gel-dégel. Généralement, cette propriété est principalement affectée par la porosité, la teneur en eau, les conditions environnementales et les types de granulats.

Salem *et al.* [148] et Verian [35] ont indiqué que le BGR a une résistance au gel-dégel plus faible que le béton conventionnel en raison de la porosité plus élevée des GR, ce qui conduit par la suite à une absorption d'eau plus élevée. Gokce *et al.* [149] ont montré que le béton fabriqué avec des GR dérivés de bétons entraînés par l'air a une meilleure résistance au gel-dégel que le béton à base de graviers recyclés obtenus de béton non entraîné par l'air et soumis à 500 cycles de gel-dégel.

Le BGR a généralement une faible résistance au gel-dégel et n'est pas recommandé pour une utilisation dans un climat froid. Cependant, Salem *et al.* [148] ont montré que le BGR avec un rapport E/C inférieur à 0.5 et contenant une teneur en air de 5 % peut toujours être utilisé dans les climats froids insaturés et modérés.

La résistance à la compression, au fendage et à la flexion du BGR et le module d'élasticité diminuent avec l'augmentation des cycles de gel-dégel [150, 151].

Bogas *et al.* [152] ont indiqué que les pertes de masse dans le BGR à haute résistance sont beaucoup plus faibles que celles observées dans le BGR à résistance normale, ce qui indique que la résistance au gel-dégel du béton dépend beaucoup plus de la résistance que du type de granulats utilisés.

de Oliveira et Vazquez [114] ont indiqué que la résistance au gel-dégel est très sensible aux niveaux d'humidité des GR utilisés. Le béton préparé avec des granulats recyclés saturés et secs présentait une bonne résistance au gel-dégel, tandis que de meilleurs résultats ont été obtenus avec le béton réalisé avec les granulats semi-saturés. Cela s'explique par la formation d'une interface plus solide et plus dense dans ces conditions.

3.5.6. Résistance aux sulfates

La résistance du béton aux attaques sulfatiques est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Parthiban et Saravana Raja Mohan [113] ont étudié l'influence des granulats recyclés sur la durabilité du béton. Ils ont travaillé sur la résistance au sulfate des mélanges préparés avec des taux de remplacement différents de granulats naturels par des GR en immergeant les spécimens dans des solutions de 5 % Na_2SO_4 et 5 % MgSO_4 sur une période de 90 jours après 28 jours de durcissement sous condition de température ambiante. Ils ont observé que le pourcentage de réduction du poids des échantillons augmente avec le taux de GR. Le pourcentage de réduction du poids des spécimens sous l'exposition au sulfate de sodium a été de 0.68, 0.90, 1.63, 2.25 et 3.13 % pour 0, 25, 50, 75 et 100 % de taux de GR, alors que cela a été observé à 2.37, 3.00, 4.10, 4.96 et 6.34 % dans le cas de l'exposition au sulfate de magnésium. Ils ont observé que le pourcentage de réduction de la résistance des bétons exposés au sulfate de sodium était de 5.89, 6.63, 7.93, 9.24 et 10.58 % à 0, 25, 50, 75 et 100 % de remplacement des GR respectivement. Dans le cas du sulfate de magnésium, ces valeurs étaient de 6.09, 7.26, 8.59, 11.73 et 14.32 %. Le facteur de réduction de la résistance augmente avec la teneur en GR et s'est révélée plus importante dans le cas de l'exposition au sulfate de magnésium par rapport à l'exposition au sulfate de sodium. Cette réduction avec la teneur en GR pourrait être associée aux particules de ciment attachées sur le GR qui réagissent avec les sulfates, ce qui entraîne la formation de gypse et de l'ettringite, ce qui réduit la résistance des bétons.

Fernández-Ledesmaa *et al.* [153] ont déterminé le niveau maximal de remplacement du sable naturel par le sable recyclé dans la fabrication du mortier. Ils ont trouvé que les mortiers fabriqués avec des remplacements de 50 % et 100 %, ont affiché un pourcentage une perte de poids plus élevé après 15 cycles de dissolution du sulfate de sodium que le mortier de référence. Ils ont conclu que les mortiers préparés avec des sables recyclés semblent moins résistants à la cristallisation des sels, ce qui pourrait limiter leur utilisation dans des

environnements agressifs. La perméabilité et l'absorption élevées des mortiers à base de sable recyclé seraient la principale cause de leur faible résistance à l'attaque par les sulfates.

3.5.7. Résistance aux acides

Le béton est un matériau basique par excellence, résulte par les hydrates de ciment, qui se traduit par son pH élevé, il est extrêmement sensible aux milieux acides. Omrane *et al.* [63] ont étudié les performances de la durabilité du béton autoplaçant en utilisant des granulats de béton recyclé avec des niveaux de substitution de 0 %, 50 %, 75 % et 100 % et également la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle (PZ) en poids de 5 % à 25 %. Ils ont constaté que l'incorporation de 15 % et 20 % de PZ dans le BGN et le BGR respectivement a un effet bénéfique sur la résistance à l'attaque de l'acide sulfurique. D'après la comparaison entre BGN et BGR, ils ont confirmé que la perte de masse de BGR est inférieure à 23 % par rapport à celle du BGN, ce qui montre l'utilisation bénéfique des granulats recyclés.

Alnahhal *et al.* [154] ont observé une perte de résistance jusqu'à 63 % dans le BGN et 67% dans le BGR lorsqu'ils étaient exposés à une solution de 3% HCl et ces pertes ont été réduites à 39% en ajoutant 30% de cendres de cosse de riz.

Rao *et al.* [155] ont utilisé deux acides (HCl et H₂SO₄) avec des concentrations différentes (3 et 5 %) pour étudier la résistance aux acides de béton à base de granulats recyclés en remplacement partiel de 0 %, 50 % et 75 %, en ajoutant les cendres volantes et la fumée de silice fixées respectivement à 20 % et 10 %. Ils ont constaté qu'il ya une perte de masses marginales avec un pourcentage qui variait entre 1.5–2.9 dans le cas de HCl et 1.65–3.5 dans le cas de H₂SO₄ après 56 jours. Les résultats des tests ont montré que la perte de masse augmente avec l'augmentation de taux de remplacement des GR.

3.6. Effet des ajouts minéraux sur les propriétés du BGR

La résistance à la compression du BGR diminue avec le remplacement du GN par du GR. Cependant, l'addition de fumée de silice permet d'augmenter la résistance à la compression du BGR [83, 93, 120, 156-159].

L'ajout de 5 à 10 % de fumée de silice aux granulats recyclés améliore les propriétés du béton. L'effet bénéfique est plus prononcé lorsqu'on utilise 75 % de granulats recyclés. L'ajout de fumée de silice diminue la porosité des granulats recyclés. Cela peut être attribué aux

particules ultrafines de fumée de silice qui contribuent à la densification de la matrice. En outre, l'action pouzzolanique qui change la portlandite en calcium de silicate hydraté qui améliore la résistance du BGR. En outre, l'ajout de fumée de silice améliore la zone de transition [156]. L'effet pouzzolanique de la FS qui survient habituellement après 7 jours a tendance à augmenter la résistance à la compression des bétons [157]. La source de la portlandite nécessaire à la réaction pouzzolanique provient non seulement de l'hydratation entre le nouveau ciment et l'eau, mais aussi de l'ancien mortier attaché aux GR.

Omrane et Rabehi [160] ont étudié la performance et durabilité du béton autoplaçant en utilisant des granulats recyclés et de la pouzzolane naturelle (PZ). Ils ont constaté la possibilité d'utiliser 50 % de gravier et sable recyclé pour la réalisation de béton autoplaçant. Les mélanges BAPN et BAPR contenant de la pouzzolane naturelle développent une résistance à la compression comparable aux mélanges sans PZ à 120 jours. La profondeur de pénétration des ions chlorure et le coefficient de diffusion des ions chlorures apparents des mélanges BAPN et BAPR contenant PZ sont plus faibles que ceux des mélanges BAPN et BAPR sans PZ et tendent à diminuer avec l'augmentation de la teneur en PZ. Cela est dû à la distribution plus fine de la taille des pores en présence de PZ. L'incorporation de 15 % et 20 % de PZ dans BAPN et BAPR a diminué la profondeur de pénétration des ions chlorure de 50 % et a également un effet bénéfique sur l'attaque de l'acide sulfurique (H_2SO_4).

Zaitri *et al.* [161] ont étudié de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés. Ils ont constaté que l'évolution de la résistance à la compression en incorporant divers taux de calcaire présente la même allure, quel que soit l'âge des éprouvettes (7, 14 et 28 jours) des différents types de bétons testés (recyclés ou ordinaires). L'ajout de calcaire de 5 % et 10 % pour le béton ordinaire et 5 %, 10 % et 12.5 % pour le béton recyclé améliore la résistance à la compression des bétons étudiés au moyen et à long terme par rapport au béton témoin. Le facteur le plus responsable de cette légère amélioration de la résistance mécanique serait la grande finesse de calcaire utilisé qui remplit un maximum de vides entre les grains de ciment et les granulats [161].

3.7. Techniques utilisées pour l'amélioration des performances des BGR

Pour compenser l'influence négative de l'usage de granulats recyclés sur les performances des BGR, les techniques suivantes sont utilisées pour améliorer les performances du béton fabriqué avec les granulats recyclés.

3.7.1. Amélioration de la qualité des GR

Larbi *et al.* [162] ont essayé une méthode de traitement thermique pour améliorer la qualité du BGR. Ils ont constaté qu'après un traitement thermique à 800 °C, les GR sont comparables aux granulats naturels. Chen *et al.* [117] ont constaté que la résistance du béton est affectée par le GR non lavé utilisé dans le béton. Cependant, l'utilisation de GR lavé empêche la réduction de résistance.

3.7.2. Ajustement du rapport eau/ciment

Mandal *et al.* [163] et Limbachiya *et al.* [53] ont déclaré que l'ajustement du rapport E/C pour le béton pourrait améliorer la résistance du béton à base de GR. Padmini *et al.* [60] ont recommandé un rapport E/C plus faible et une teneur en ciment plus élevée pour le BGR que ceux du BGN pour obtenir une résistance à la compression identique. De même, Salem *et al.* [148] ont rapporté que l'abaissement du rapport E/C était très bénéfique pour le BGR pour développer une bonne résistance au gel-dégel égale à celle du BGN.

3.7.3. Modification de la composition du béton

Des études ont montré que la modification de la composition de béton peut compenser le changement de propriétés dû à l'utilisation de GR [16, 112]. Pour compenser la réduction de la résistance du béton avec GR, une quantité de ciment supplémentaire peut être ajoutée au mélange tout en conservant la même quantité d'eau.

Par exemple, le béton fabriqué avec 50 % de gravier recyclé nécessite un ajout de 6 % de ciment pour atteindre la résistance à la compression comparable de GN. Pour un béton avec 100 % de GR, 8.3 % de ciment supplémentaires sont nécessaires pour maintenir la résistance à la compression similaire à celle du BGN [16].

3.7.4. Limitation de la quantité de GR

Pour minimiser l'altération des propriétés du béton due à l'utilisation des GR, des chercheurs recommandent de limiter la quantité de GR. Kou *et al.* [77] ont conclu que

l'incorporation de GR jusqu'à 50 % n'affectait pas la résistance à la compression du béton. Verian [35] a indiqué que les bétons de chaussées contenant 30 % de gravier recyclé ont des propriétés légèrement meilleures que les BGN. Elhakam *et al.* [83] ont trouvé que la résistance à la compression du béton n'est pas affectée lorsque le GR est utilisé jusqu'à 25 %. Tam et Tam [133] et Limbachiya *et al.* [53] ont limité l'utilisation des graviers recyclés jusqu'à 30 % comme autant de chercheurs ont suggéré une telle limite.

3.7.5. Utilisation des ajouts minéraux

Les résistances mécaniques et la durabilité des BGR peuvent être améliorées en utilisant des ajouts minéraux appropriés [148, 164]. La fumée de silice, les cendres volantes et le laitier des hauts fourneaux ont également été efficaces pour augmenter la résistance à la pénétration des ions chlorure dans le BGR. Ann *et al.* [165] ont montré que l'utilisation de 30 % de cendres volantes et de 65 % de laitier de haut fourneau augmentait la résistance à la compression des BGR.

3.7.6. Approche de durcissement prolongé

Une autre façon d'améliorer les performances du BGR est d'utiliser un durcissement prolongé dans un environnement humide. Le durcissement prolongé semble être l'une des méthodes les plus pratiques pour diminuer le taux de carbonatation du BGR [166]. La profondeur de carbonatation dans le BGR est presque deux fois moindre lorsque le béton est durci avec de l'eau.

3.7.7. Saturation des granulats recyclés

Plusieurs études ont indiqué que la saturation du GR avant le malaxage améliore la performance du béton [16, 79]. La saturation complète du GR peut être obtenue en immergeant le granulat dans l'eau pendant 24 h [79]. Selon Ferreira *et al.* [79] 90 % du niveau de saturation était idéal tandis que 100 % du niveau de saturation peut avoir un effet néfaste sur le béton. Etxeberria *et al.* [16] recommande un niveau de saturation de 80 % du gravier recyclé de la capacité d'absorption totale du BGR à atteindre avant son utilisation dans le processus de dosage. Cette méthode contribuerait au contrôle du rapport E/C effectif et de l'ouvrabilité du BGR.

De plus, une étude réalisée par Leite et Monteiro [167] sur la microstructure du béton recyclé a indiqué que l'ITZ entre les granulats et la pâte de ciment est plus dense pour le GR

saturé que pour le GR sec. La capacité d'absorption plus élevée du GR par rapport au GN offre un potentiel d'apport d'humidité de la matrice du granulat au béton.

L'avantage d'utiliser un GR saturé au lieu d'un GR sec se reflète également dans le mortier où la résistance à la compression des échantillons fabriqués avec du mortier à base de sable recyclé saturé est plus élevée que celle à base de sable recyclé sec [168].

3.7.8. Revêtement des GR par une poudre pouzzolanique

Li *et al.* [36] ont développé une nouvelle technique dans laquelle les GR ont été recouvertes d'une suspension d'eau et de poudre pouzzolanique (PP) (cendres volantes, fumée de silice et laitier de haut fourneau ou leur combinaison). Le schéma du processus du mélange de cette technique est présenté à la figure 3.21.

La suspension est préparée après un malaxage pendant 1 minute de la moitié d'eau de malaxage et la poudre pouzzolanique. Les granulats recyclés sont par la suite introduits dans la suspension. Après une minute de malaxage des GR avec la suspension de PP, les matériaux restants (moitié d'eau, sable et ciment) sont ajoutés au malaxeur et mélangés pendant trois minutes. Les auteurs ont signalé une amélioration significative de l'ouvrabilité car le béton préparé a été malaxé avec une technique qui diffère du malaxage conventionnel. L'amélioration de l'ouvrabilité est due à la formation d'une couche mince en PP qui recouvre les surfaces des particules du GR. Cette couche limite l'eau absorbée sur les surfaces de GR pendant la phase initiale de malaxage. De plus, cette technique permet aussi l'amélioration de la résistance à la compression et à la flexion du béton à base de GR [36].

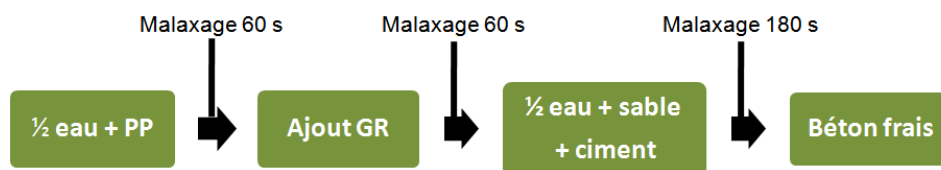


Figure 3. 21. Processus de revêtement des GR avec la PP [36].

La suspension pouzzolanique devrait remplir les microfissures des GR avec du gel de ciment pendant l'hydratation du ciment. Ainsi, la résistance du BGR peut être améliorée.

Katz [107] a été trouvé que le traitement des GR à la fumée de silice donne une augmentation de 23 % à 33 % et 15 % de la résistance à la compression du BGR à 7 et 28 jours, respectivement. Ces résultats montrent que la résistance à la compression au jeune âge

était significativement améliorée par rapport aux âges ultérieurs avec la technique d'imprégnation à la fumée de silice. Cela était dû au remplissage des microfissures dans la pâte adhérente de RA qui renforce l'ancienne ITZ entre RA et vieux mortier. Mais le renforcement de la nouvelle matrice de ciment prend du temps et donc les propriétés mécaniques sont relativement plus faibles aux premiers âges.

3.7.9. Méthode de malaxage en deux étapes

Dans cette approche proposée par Abd Elhakam *et al.* [83], le malaxage se fait en deux étapes de malaxage. Dans la première étape, l'eau totale, le ciment puis les granulats recyclés sont malaxés pendant 10 minutes. Dans la deuxième étape, le sable naturel et le gravier naturel sont ajoutés au mélange (Figure 3.22).

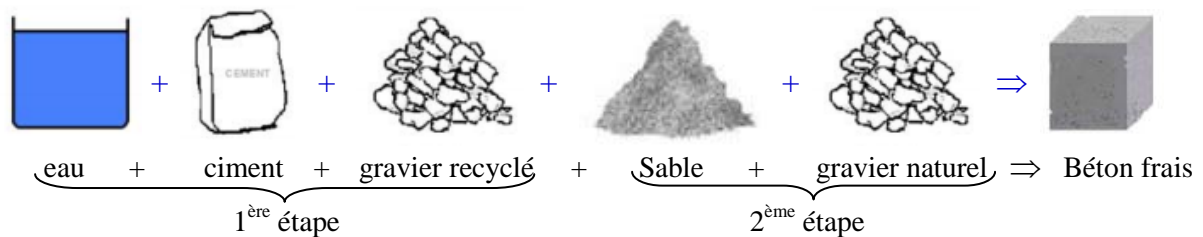


Figure 3. 22. Procédure de malaxage en deux étapes proposée par Abd Elhakam *et al.* [83].

Une autre méthode de malaxage similaire mais avec une disposition différente a été développée par Tam *et al.* [82]. D'après cette approche, tous les granulats (sable et graviers naturel et recyclé) sont malaxés à sec pendant 60 s, puis la moitié de l'eau totale est ajoutée au mélange et le malaxage se poursuit pendant 60 s (1^{ère} étape), puis le ciment est introduit dans le mélange et le processus de malaxage se poursuit pendant 30 s. Enfin, la deuxième moitié de l'eau est introduite dans le mélange et le malaxage se poursuit pendant 120 s (2^e étape), comme le montre la figure 3.23.

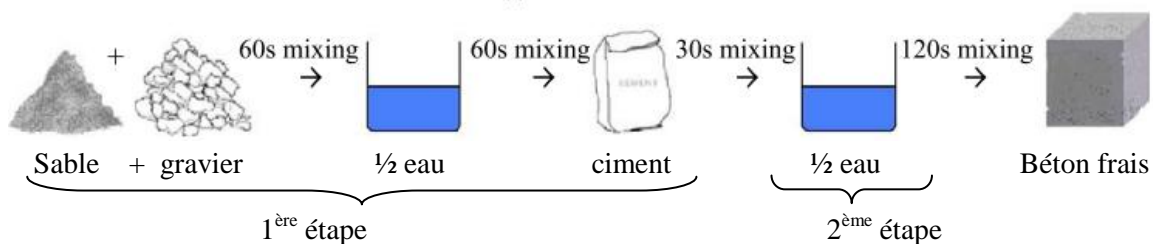


Figure 3. 23. Procédure de malaxage en deux étapes proposée par Tam *et al.* [82].

La méthode de malaxage en deux étapes simule la technique de réparation des constructions. Dans ce cas, les GR représentent un ancien élément en béton à réparer, tandis que la pâte de ciment agit comme un agent de liaison pour améliorer l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton. Dans cette approche la pâte de ciment permet de gélifier le GR, donnant une ITZ plus forte en cicatrisant les fissures et les pores dans les GR.

Ainsi, la méthode de malaxage en deux étapes est une méthode efficace pour améliorer les performances mécaniques du BGR en raison de l'amélioration des propriétés des GR. La résistance à la compression du BGR a augmenté de 22 % pour le remplacement de 20 % de GR à 28 jours de durcissement par rapport à la méthode de malaxage classique [94].

Brand *et al.* [81] ont combiné la méthode de malaxage en deux étapes et la saturation partielle des GR pour améliorer la résistance à la compression du BGR.

3.7.10. Approche de malaxage de mortier

L'approche de malaxage de mortier de ciment est développée par Liang *et al.* [169] dans le but d'améliorer les propriétés du BGR frais et durci. Le procédé de malaxage est présenté dans la figure 3.24. Tout le gravier naturel est remplacé par du gravier recyclé. Le gravier recyclé a subi un pré traitement de surface 7 jours avant le malaxage ce qui assure la formation d'une nouvelle couche revêtement de pâte de ciment sur le gravier recyclé.

Le revêtement peut réduire l'absorption d'eau des granulats recyclés pendant le malaxage et fournir une meilleure adhérence entre les granulats recyclés et la pâte de ciment. Ce sont les deux principaux avantages de l'utilisation des méthodes de prétraitement de surface, ce qui conduit à une amélioration de la résistance à la compression.

Sans aucun prétraitement de surface, le rapport E/C minimum pour 100 % de graviers recyclés est d'environ 0.49. Avec ce rapport, les BGR frais étaient assez fermes et les résistances à 28 jours étaient 27.6 MPa. Avec l'application d'un prétraitement de surface à l'aide d'une suspension de ciment et d'une solution de silice, le rapport eau/ciment a été réduit à 0.43 et la résistance à la compression de 28 jours a atteint 43.3 MPa [169].



Figure 3. 24. Approche du mélange de mortier [169].

3.7.11. Méthode d'auto-cicatrisation

La méthode d'auto-cicatrisation consiste à immerger les granulats recyclés dans l'eau pendant 30 jours. Cette procédure permet aux particules de ciment non hydratées de l'ancien mortier attaché au GR de s'hydrater de nouveau au contact de l'eau améliorant ainsi la qualité des GR ainsi que les propriétés et la qualité du béton contenant ces granulats [83, 170-173]. Les effets bénéfiques du processus d'auto-cicatrisation sont évidents sur les propriétés des bétons de granulats recyclés, en particulier pour les faibles teneurs en ciment. L'amélioration de la résistance à la compression du BGR est de 30 % par rapport à celle du BGN.

3.7.12. Incorporation des fibres

L'utilisation des fibres compensait certains inconvénients qui résultent de l'utilisation des GR dans le béton [126, 174, 175].

Afroughsabet *et al.* [126] ont rapporté que l'utilisation de 1 % de fibres d'acier à crochets a entraîné une augmentation de 60 % de la résistance au fendage et 88 % de la résistance à la flexion du BGR à 28 jours. Ces améliorations peuvent être attribuées à la meilleure adhérence entre le GR et la pâte en raison de la surface rugueuse du GR en plus de l'effet d'engrenage entre les fibres et le GR.

Gao *et al.* [174] ont indiqué que l'utilisation de 2 % fibres métalliques augmentait la résistance au cisaillement de 135 % du BGR contenant 50 % de gravier recyclé.

Bordelon *et al.* [175] ont indiqué que l'incorporation de macro-fibres synthétiques jusqu'à 0.2 % du volume total du BGR fabriqué avec 50 % de gravier recyclé a donné des propriétés mécaniques similaires à celles du BGN.

3.7.13. Traitement mécanique du gravier recyclé

Tavakoli et Soroushian [121] ont utilisé la méthode de malaxage à sec du gravier recyclé pendant 30 min dans un malaxeur à tambour rotatif (utilisé pour le malaxage du béton), pour étudier la possibilité d'enlever partiellement le mortier attaché au gravier recyclé. A cet effet, le gravier recyclé saturé à l'état sec de surface a été mélangé dans le malaxeur à tambour pendant 30 min avant l'addition d'autres matériaux. Ces matériaux ont été ajoutés au malaxeur pendant son fonctionnement.

3.7.14. Technique de l'injection du CO₂

Une des techniques pour l'amélioration de la qualité des granulats recyclés est de les laisser exposés à l'atmosphère. Le CO₂ atmosphérique diffuse alors lentement dans la porosité des granulats et réagit avec la portlandite pour combler la porosité avec du carbonate de calcium. Des études menées en laboratoire ont montré la faisabilité du procédé et révélé une amélioration des propriétés mécaniques des GR ainsi traités, ainsi qu'une diminution de leur taux d'absorption en eau [176].

L'injection du CO₂ dans des matériaux cimentaires pour l'amélioration des propriétés des BGR est un domaine de recherche innovant [177-179]. Actuellement, il existe deux principales méthodes d'injection du CO₂ dans le béton: (1) le conditionnement au carbone par l'injection du CO₂ dans les GR; et (2) le durcissement au carbone qui implique l'injection du CO₂ dans le nouveau béton. Les deux méthodes permettent l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques et la durabilité des BGR, le conditionnement du carbone offre une mise en œuvre pratique. Cependant, le conditionnement au carbone des GR est la technique la plus pratique pour le béton à usage général.

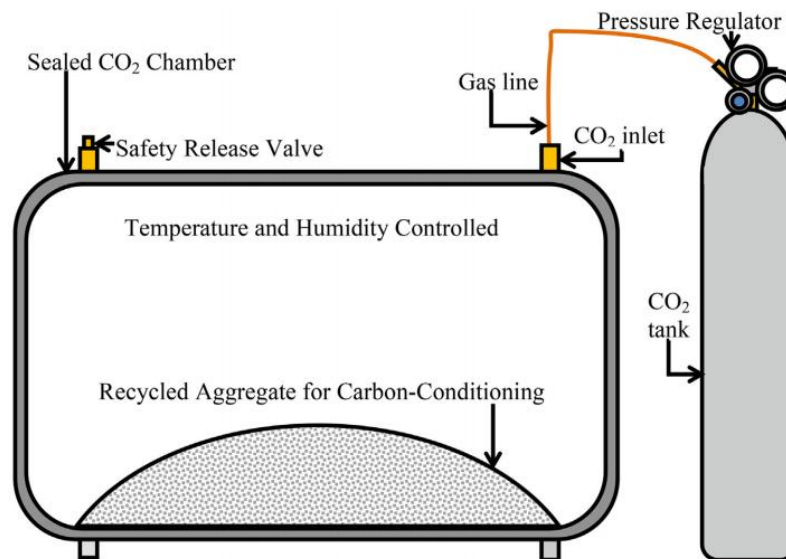


Figure 3. 25. Carbonatation des granulats recyclés

En effet, lorsque le béton est exposé au CO₂, le CO₂ gazeux y pénètre principalement par les pores et les fissures, puis il réagit avec les produits d'hydratation primaires (CSH et Ca(OH)₂), ce qui entraîne la production de la carbonate de calcium CaCO₃ et de gel de silice, comme indiqué dans les équations (3.1) et (3.2) [180]. De plus, le traitement par du CO₂ est également considéré comme efficace et ami de l'environnement

De plus, les matériaux à base de ciment non hydraté, tels que le silicate tricalcique (C_3S) et le silicate bicalcique (C_2S), peuvent réagir davantage avec le CO_2 , comme le montrent les équations (3.3) et (3.4) [181]. Étant donné que le $CaCO_3$ a une dureté et un volume en phase solide plus élevés que le CSH et le $Ca(OH)_2$, le produit de carbonatation du $CaCO_3$ augmente la résistance de la pâte de ciment au début de la réaction de carbonatation, et une légère augmentation de sa résistance se produit à la dernière période de la réaction de carbonatation.



Le produit de carbonatation permet de bien remplir les pores du mortier attaché et l'ITZ de GR, et pendant ce temps, la surface du GR est recouverte d'un revêtement plus dense, ce qui améliore les propriétés du GR. Ainsi, le traitement des GR par carbonatation est considérée comme la méthode la plus efficace et la plus réalisable pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des BGR.

3.7.15. Traitement biologique

Récemment, l'approche de bio-précipitation de carbonates de calcium a été utilisée pour améliorer les qualités des GR. Cette méthode est basée sur la capacité des bactéries à produire du carbonate de calcium par activité métabolique [182-184]. Les effets positifs du traitement de bio-précipitation sur l'absorption d'eau et la résistance à l'abrasion des GR et les propriétés de résistance du béton de granulats recyclés ont été démontrés et confirmés [182-184].

Grabiec *et al.* [182] et Wang *et al.* [184] ont effectué un test d'amélioration des propriétés des granulats recyclés au moyen d'un traitement dans un bouillon de bactéries (*Sporosarcina pasteurii* et *Bacillus sphaericus*) capables de produire des carbonates de calcium ($CaCO_3$). Pour cela, les granulats recyclés ont été immergés pendant environ une journée, dans des bains bactériens dans lesquels une source de calcium a été ajoutée. A la fin du traitement, l'absorption en eau des granulats a été déterminée et comparée avec celle mesurée avant traitement. Ainsi, il a été observé un dépôt de $CaCO_3$ produit par les bactéries à la surface des granulats, avec une légère diminution de l'absorption en eau de ces derniers.

Dans le processus de bio-traitement, les bactéries adhèrent dans les pores et à la surface des GR et produisent du carbonate de calcium. Les bactéries peuvent fournir des sites de

nucléation pour la précipitation du carbonate de calcium et agir comme un liant pour relier le mortier attaché au carbonate de calcium précipité, ce qui peut réduire efficacement la porosité des GR [182-185]. De plus, lorsque les GR bio-traités étaient utilisés, l'ITZ entre le GR et la nouvelle pâte de ciment est modifiée par le carbonate de bio-calcium, qui avait des effets bénéfiques (accélérateur de la réaction d'hydratation) sur la performance de l'ITZ du béton de granulats recyclés [186, 187].

Deux traitements différents par bio-précipitation ont été utilisés pour traiter le GR: pulvérisation et immersion. Une vue schématique des traitements est représentée sur la figure 3.25. Pour le traitement par immersion, le GR a été immergé dans une culture solution avec les bactéries, s'assurant que le liquide recouvre le GR (figure 3.25(a)). Pour le traitement par pulvérisation, d'abord le GR a été immergé dans une solution contenant les bactéries pendant 2 h pour permettre aux bactéries d'adhérer à la surface et aux pores des GR. Ensuite, le GR avec les bactéries attachées a été pulvérisé avec la culture solution pour maintenir la surface humide. Le temps de traitement était de 20 jours à une température de 26 °C. Après 20 jours, le GR a été lavé et séché (figure 3.25(b)) [182].

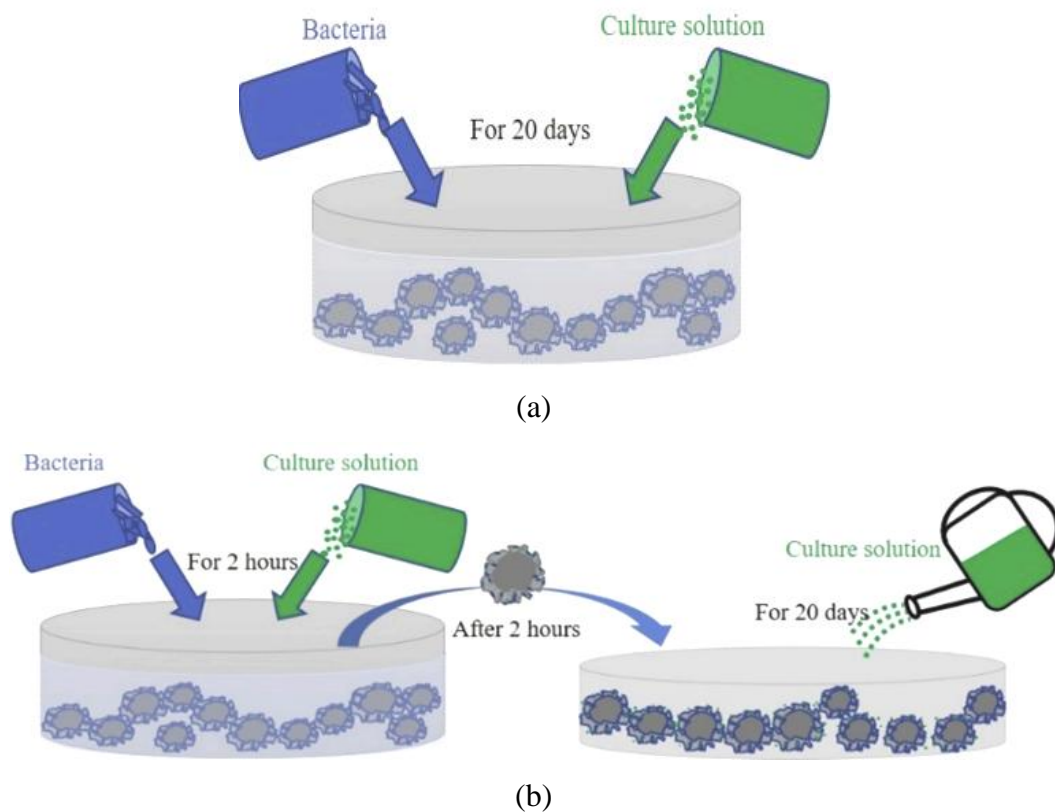


Figure 3. 26. Traitement des GR par bio-précipitation: (a) immersion (b) pulvérisation.

3.8. Conclusion de la revue bibliographique

A travers la revue bibliographique, on conclue que les propriétés du béton à base de granulats recyclés dépendent principalement des propriétés des granulats recyclés. L'influence des GR sur les propriétés du BGR est variable. D'une manière générale, l'étude bibliographique a mis en évidence les conclusions suivantes :

1. Plusieurs recherches ont été menées dans plusieurs pays pour développer l'utilisation des déchets de C & D comme constituants de nouveau béton. En revanche, le recyclage a deux avantages écologiques majeurs : la préservation des ressources naturelles et l'évitement de la création de décharge sauvage des déchets de C & D.
2. Le terme "granulat recyclé" définit un granulat provenant du recyclage de débris de démolition. Ce granulat composé de deux phases : granulat d'origine et mortier attaché à celui-ci. Par conséquent, la présence du mortier attaché au GR résulte une formation de deux zones de transition interfaciale dans le BGR.
3. La différence de propriétés du GR par rapport aux GN est principalement due à la présence d'anciens mortiers qui adhèrent à la surface des particules de GR. Ce mortier a un effet néfaste sur les caractéristiques des GR, tel que : une densité plus faible, une absorption d'eau plus élevée et une abrasion de Los Angeles plus élevée. L'un des moyens consiste à minimiser la quantité du mortier attaché aux GR.
4. Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour mesurer la quantité de mortier attaché aux GR et les plus utilisées sont : la méthode par un traitement technique, un traitement thermique et un traitement thermique et chimique. Cependant, aucune méthode n'est satisfaisante pour déterminer la quantité de mortier attaché.
5. L'utilisation de GR à l'état saturé est recommandée pour assurer une meilleure maniabilité que l'utilisation de GR sec.
6. Les résultats de la littérature montrent que les GR ont une influence sur les propriétés du béton, qui a mené à une ouvrabilité et une densité réduite du BGR, de faibles résistances mécaniques, retrait et fluage plus élevés et performances de durabilité plus faibles.
7. Il n'y a pas de limites générales à l'utilisation de GR grossiers. Plusieurs chercheurs recommandent 30 % comme limite maximale en remplacement de GN grossiers. Cependant, cette limite peut aller jusqu'à 50 % ou 100 % si la conception du mélange, la méthode de malaxage et les conditions d'humidité du GR sont bien gérées.
8. Compte tenu des caractéristiques des sables recyclés, la majorité des études effectuées déconseillent leur utilisation dans la fabrication de BGR.

Pour comparer les résultats trouvés, une étude statistique est présentée dans la figure 3.25. D'après cette figure, de nombreuses études confirment la même influence des GR sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la densité, l'ouvrabilité, la perméabilité, le fluage et le retrait du BGR. Cependant, l'influence du GR sur la résistance à la traction semble incertaine. A noter que la plupart des études se sont focalisées sur les propriétés mécaniques des BGR. Par contre, peu d'études se sont concentrées sur des paramètres qui influencent les performances des BGR à long-terme, tels que la durabilité et le fluage.

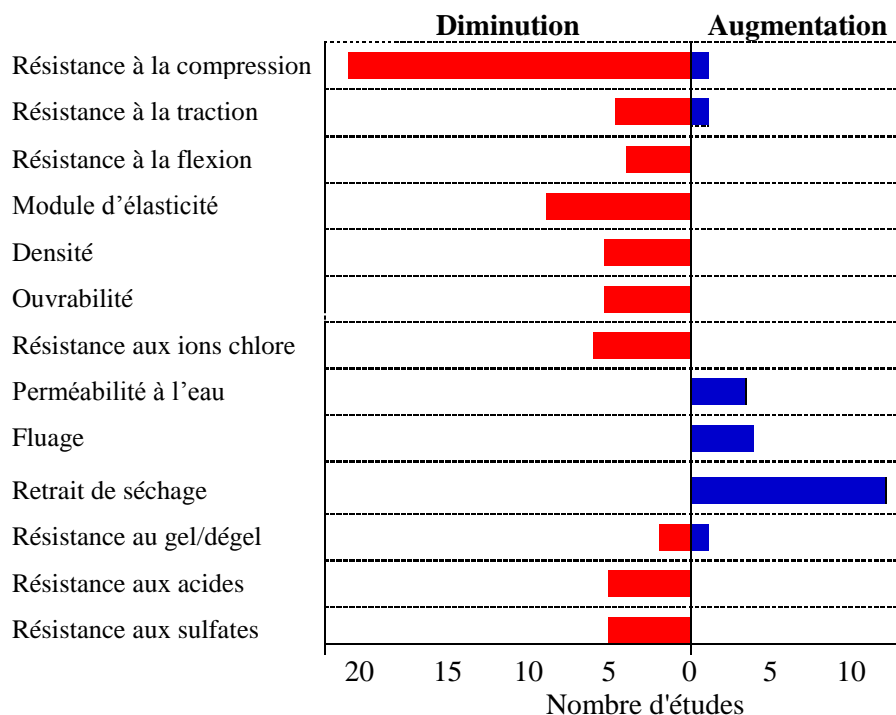


Figure 3. 27. Résumé de l'influence des GR sur les propriétés du BGR.

Bien que les granulats recyclés puissent être utilisés pour un certain taux de remplacement du GN sans effets négatifs importants sur les propriétés du béton à l'état frais et durci et la durabilité du béton, d'autres recherches sont nécessaires pour confirmer les effets bénéfiques du GR pour des applications plus potentielles. D'après la recherche bibliographique effectuée, les besoins de recherche suivants ont été identifiés pour être investigués dans notre travail expérimental :

- 1- Recherche du taux de remplacement de GR limite au-dessous duquel les BGR ont les mêmes propriétés physico-mécaniques que les BGN avec le même rapport E/C et la même ouvrabilité;
- 2- Etude des propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des BGR;
- 3- Etude de retrait total des BGR sous l'effet de différentes températures de cure;
- 4- Effet du GR sur la durabilité des BGR (absorption d'eau, perméabilité à l'eau, résistance à pénétration des chlorures, attaques par les sulfates et les acides);
- 5- Modélisation numérique du retrait des BGR.

Chapitre 4 :

Matériaux et matériel d'essai

Chapitre 4. Matériaux et matériel d'essai

4.1. Introduction

Avant d'entamer la partie expérimentale, il nous paraît important de caractériser les matériaux utilisés dans la composition des bétons testés qui jouent un rôle important sur ses propriétés et ses performances ultérieures.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons testés ainsi que les essais à effectuer selon les normes internationales et les modes opératoires en vigueur. Les objectifs de cette étude expérimentale visent à étudier l'influence de la substitution de gravier naturel par un gravier recyclé sur les propriétés physico-mécanique et la durabilité des bétons afin d'apprécier la possibilité de l'utiliser dans la production du béton de construction.

4.2. Matériaux utilisés

4.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé (CEM II/A-L 42.5 N) produit par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) dont l'ajout est de 18 % de calcaire, avec une densité de 3.1 et une surface spécifique de 3298 cm²/g. Sa résistance à la compression à 28 jours est supérieure à 42.5 MPa. Ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont indiquées dans le tableau 4.1.

Tableau 4. 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		

4.2.2. Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau potable recueillie directement du robinet de laboratoire. Cette eau ne contient pas d'impuretés nuisibles aux mélanges.

4.2.3. Sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel provenant de la carrière Benkhris d'Oued Sly (Chlef), sa nature minéralogique est siliceuse, d'une taille maximale de 4 mm.

4.2.4. Graviers

Deux types de granulats grossiers ont été utilisés, un gravier naturel et un gravier recyclé. Le gravier naturel (GN) provient de la carrière d'Oued Fodda (Chlef), d'origine calcaire et de dimensions 8/15.

Le gravier recyclé utilisé a été obtenu à partir d'éprouvettes en béton ordinaire produit au laboratoire à base de GN ayant une résistance moyenne à la compression de 35 MPa, ce qui a conduit à un concassage et un tamisage contrôlés des granulats recyclés. Le béton parent a été confectionné en utilisant la même technique et le même équipement et avait une composition similaire à celle du béton à base de granulats naturels utilisé dans les tests comme béton témoin. Par ailleurs, les GR obtenus à partir des déchets de constructions et de démolition contiennent probablement des particules de débris qui pourraient réduire leurs performances. Néanmoins, l'extraction des GR à partir d'éléments en béton préfabriqué éviterait de tels problèmes.

Après trois mois de durcissement, les éprouvettes ont été concassées par une massette en fragments à des dimensions adaptées à l'ouverture du mini concasseur. Les fragments de béton sont ensuite écrasés à l'aide d'un mini concasseur à doubles mâchoires (une fixe et l'autre mobile) disponible au laboratoire et tamisés pour obtenir des distributions de tailles de particules similaires à celles des GN qui est destiné à la confection de béton à base de gravier recyclé (Figure 4.1).

La figure 4.2 montre l'analyse granulométrique par voie sèche des granulats utilisés.



Figure 4. 1. Processus de production du gravier recyclé.

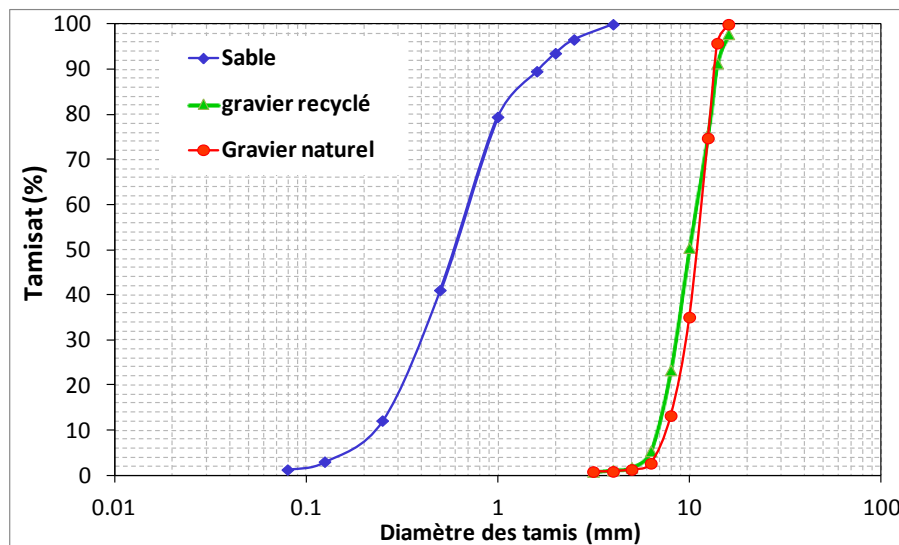


Figure 4. 2. Analyse granulométrique des granulats.

Le contenant de pâte ou de mortier existant autour d'un granulat recyclé est la principale cause de la diminution des caractéristiques physiques et mécaniques de ce granulat. Toutes les études montrent que les granulats recyclés ont un coefficient d'absorption plus élevé, une densité plus faible et une résistance à l'abrasion réduite en comparaison aux granulats naturels [27, 34, 43, 130, 188]. Les résultats de la caractérisation physique et mécanique des granulats sont répertoriés dans le tableau 4.2.

Tableau 4. 2. Caractéristiques des granulats utilisés.

	Sable	GN	GR
Equivalent de sable	84	/	/
Module de finesse	2.7	/	/
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1560	1336	1247
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2630	2670	2590
Absorption d'eau (%)	1.6	0.92	4.51
Coefficient de Los Angeles (%)	/	27	35
Coefficient Micro Deval (%)	/	18	27
Coefficient de fragmentation dynamique(%)	/	15	24

4.2.5. Quantité de mortier attaché aux granulats recyclés

Deux techniques parmi celles exposées dans la section 2.5.5 sont utilisées pour estimer la quantité de mortier attaché aux granulats recyclés, à savoir la méthode chimique (Figure 4.3) et thermique (Figure 4.4). Ces deux méthodes ont pour but de détacher le mortier adhérent au granulat original, afin de déterminer la perte de masse associée à l'élimination du mortier attaché.



Immersion dans 10% HCl



Gravier recyclé après traitement chimique.

Figure 4. 3. Méthode de la dissolution dans l'acide Chloridrique



Four à moufle



GR après traitement thermique.

Figure 4. 4. Méthode de l'expansion thermique.

Les résultats des deux essais ont donné des valeurs de 39 % pour la méthode chimique et 30 % pour la méthode thermique. Ces résultats montrent l'hétérogénéité des graviers recyclés et confirment la nécessité de limiter et de contrôler leurs propriétés pour différentes applications.

4.3. Formulation des bétons

Les éprouvettes de béton ont été fabriquées à partir de GN et GR. Un béton de référence, utilisé comme éprouvettes témoins, a été réalisé avec 100 % de GN. Les autres bétons ont été produits en remplaçant partiellement des graviers naturels (25 %, 50 %, 75 % et 100 %) par des graviers recyclés par masse. Tous les bétons testés ont été confectionnés avec un rapport eau/ciment fixé à 0.55 et tout en gardant une ouvrabilité constante (16 ± 1 cm). Les proportions de mélange des bétons testés sont présentées dans le tableau 4.3.

En raison de la grande absorption de GR, il est nécessaire d'ajuster la quantité d'eau dans le mélange pour maintenir l'eau libre constante (E/C constant), qui est responsable de l'ouvrabilité du béton et sans recours à l'utilisation de superplastifiant. Les GN ont été utilisés à l'état sec, tandis que les GR étaient avec un état saturé à surface sèche (granulats pré saturés) en raison de leur grande capacité d'absorption. Si les GR ne sont pas pré-saturés, ils absorbent une quantité importante d'eau du mélange, induisant une baisse du rapport E/C et une chute d'ouvrabilité. Les GR ont été pré-saturés par immersion totale dans l'eau pendant 24 heures avant le coulage; ensuite, l'eau adsorbée a été séchée avec un chiffon absorbant pour éliminer l'humidité de surface (Figure 4.5), garantissant ainsi que les granulats recyclés étaient dans un

état saturé de surface sec au moment du malaxage du béton, c'est-à-dire un niveau de saturation de 80 %, comme recommandé par Etxeberria *et al.* [16] et Ferreira *et al.* [79].

Lors du calcul du rapport E/C, l'eau absorbée par les graviers saturés n'a pas été prise en compte, afin de garantir que la quantité d'eau restante était suffisante pour atteindre la même ouvrabilité pour tous les bétons et d'assurer l'hydratation du ciment. Par ailleurs, le gravier recyclé ne devait pas être complètement saturé pour éviter le risque de saignement associé au granulats saturés, car cela peut conduire à la rupture de la zone de transition interfaciale entre le GR et la nouvelle pâte de ciment qui est plus faible pour une humidité de surface élevée et peut affecter négativement plusieurs propriétés du béton [16, 189].



Figure 4. 5. Séchage de l'eau adsorbée des GR pré-saturés à l'aide d'un chiffon absorbant.

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

- Brassage du mélange sable + gravier + ciment pendant 1 minute ;
- Ajout de l'eau et brassage pendant 1 minute.

Tableau 4. 3. Formulation des différents mélanges.

Type de béton	Taux de GR (%)	Sable	Gravier naturel	Gravier recyclé	Ciment	E/C
BGN	0	660	1004	0	400	0.55
BGR25	25	660	754	250	400	0.55
BGR50	50	660	502	502	400	0.55
BGR75	75	660	250	754	400	0.55
BGR100	100	660	0	1004	400	0.55

4.4. Essai sur les bétons frais

4.4.1. Masse volumique

La masse volumique du béton frais a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN12350-6 [190]. Elle a été déterminée lors des essais d'étude et correction de la composition des mélanges par la mise en place du béton frais dans un récipient rigide et étanche à l'eau de volume de ($V = 5 \ell$) et de masse (m_1) puis pesé l'ensemble, soit la masse (m_2). La masse volumique (M_v) du béton frais est donnée par la formule suivante :

$$M_v = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.1)$$

4.4.2. Ouvrabilité et rhéologie des bétons

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est-à-dire sa capacité de se déformer et de s'écouler, ce qui permet de le transporter ou de le pomper et de remplir les coffrages. La maniabilité du béton 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 [191] (Figure 4.6). Cette valeur empirique couramment utilisée pour le béton frais, nous permet d'avoir une première appréciation sur l'ouvrabilité du béton.



Figure 4. 6. Essai d'affaissement.

D'autre part, en parallèle des mesures d'affaissement, l'évolution de comportement rhéologique des bétons est suivie à l'aide d'un rhéomètre ICAR possédant une géométrie Vane de taille 12.5x12.5 cm. Cet appareil qui fonctionne à une vitesse de cisaillement contrôlée mesure la valeur du couple nécessaire pour cisailier le béton frais. Le pic obtenu est considéré comme étant le seuil de cisaillement du matériau testé.

Le rhéomètre est piloté à l'aide d'un logiciel qui permet de donner directement les paramètres rhéologiques à savoir le seuil de cisaillement (Pa) et la viscosité (Pa.s).

Le rhéomètre ICAR de géométrie "Vane" est présenté dans la figure 4.7. La géométrie Vane utilisée est constituée de 4 pales d'épaisseur 2 mm. Chaque pale a une hauteur et un diamètre de 12.5 cm. immergée dans le béton et tournée à une série de vitesses fixes.

Après la mesure de l'affaissement, le béton est placé dans un récipient de 20 litres, qui est fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, le croisillon est positionné au centre de l'échantillon de béton, ce qui donne un entrefer de 20 mm entre la vanne et les parois latérales. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du béton.

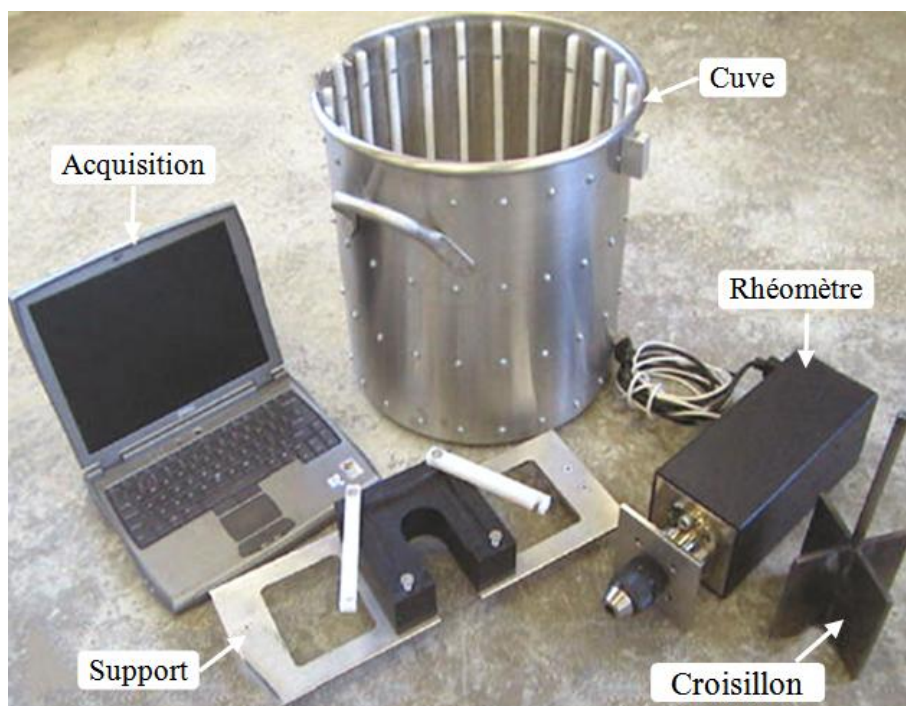


Figure 4. 7. Rhéomètre à béton.

4.5. Essais sur les bétons durcis

Pour l'étude de l'évolution mécanique des bétons étudiés, on a mesuré la résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm et la résistance à la flexion sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm à un âge de 3, 7, 28 et 90 jours. Le module d'élasticité est mesuré sur des éprouvettes cylindriques 15x30 cm à l'âge de 28 jours. La vibration a été réalisée sur une table vibrante (Figure 4.8).



Figure 4. 8. Vibration des éprouvettes à l'aide d'une table vibrante

Après coulage, les éprouvettes sont recouvertes d'une toile de jute humide afin d'empêcher toute évaporation au très jeune âge. Après 24 h, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans un bain thermostatique saturé en chaux sous une température de 20 °C jusqu'à échéance des essais mécaniques (Figure 4.9). Le phénomène de lixiviation est évité dans le bain thermostatique grâce à la saturation en chaux. Une heure avant chaque essai mécanique, les éprouvettes sont ressorties du bac et mises à l'air libre sous les conditions ambiantes du laboratoire.



Figure 4. 9. Mode de conservation des éprouvettes.

4.5.1. Masse volumique du béton durci

La masse volumique du béton durci a été déterminée selon la norme européenne NF EN12390-7 [192]. Elle a été déterminée à 28 jours sur des éprouvettes prismatiques 70x70x280 cm de masse constante (m) après séchage et de volume réel (V). Avant chaque pesée les échantillons doivent être séchés dans une étuve ventilée à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.2 % en 24 h.

4.5.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est mesurée sur des cubes de 100 mm. L'essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 3000 kN à une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s, conformément à la norme NF EN 12390-3 [193] (Figure 4.10). Les résistances aux différents âges sont les moyennes de trois éprouvettes.



Figure 4. 10. Essai de compression simple.

4.5.3. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion est déterminée à l'aide d'une machine de flexion trois points d'une capacité de 200 kN (Figure 4.11), conformément à la norme NF EN 12390-5 [194]. Les éprouvettes destinées à la mesure de la traction par flexion sont des prismes 70x70x280 mm. La mise en charge est effectuée avec une vitesse constante. La contrainte de flexion est calculée par la formule suivante :

$$f_t = \frac{3FL}{2a^3} \quad (4.1)$$

f_t : résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : force de rupture exprimée en N.

a : dimension de la section (a = 70 mm).

L : distance entre appuis (mm) (L = 210 mm).



Figure 4. 11. Essai de traction par flexion trois points.

4.5.4. Module d'élasticité

Le module d'élasticité des différents bétons est déterminé selon la norme ASTM C-469 [195]. Il a été mesuré à 28 jours par un extensomètre qui permet de mesurer la déformation d'un cylindre de 150x300 mm soumis à une compression axiale (Figure 4.12). Afin de garantir la fiabilité des résultats, les surfaces sur lesquelles s'applique la charge doivent être planes et parallèles. Pour avoir une bonne zone de contact du plateau exerçant la force de compression sur les cylindres, on a appliqué une couche de soufre sur les deux parties de l'éprouvette selon la norme NF EN 12390-3 [193] (Figure 4.13).

Le module d'élasticité E est calculé selon la relation suivante [195] :

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - 0.000050) \quad (4.2)$$

Avec :

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 4. 12. Dispositif de mesure du module d'élasticité.



Figure 4. 13. Surfaçage au soufre des éprouvettes cylindriques

4.5.5. Essai d'auscultation dynamique

Cet essai consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes sonique à l'intérieur d'une éprouvette en béton, à l'aide d'un appareil à ultrasons (Figure 4.14). L'essai a été effectué sur des éprouvettes cubiques 100x100x100 mm à 28 et 90 jours, conformément à la norme NF EN 12504-4 [196].

L'émetteur et le récepteur sont appliqués sur les deux faces de l'éprouvette. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Avant chaque utilisation, l'ultrason doit être contrôlé par des essais d'étalonnage. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu. La vitesse de propagation du son est calculée par la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{m/s}) \quad (4.3)$$

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

t : temps de propagation d'onde en second (s).



Figure 4. 14. Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion

La vitesse de propagation du son est d'autant plus élevée que le béton est plus dense et a un module d'élasticité plus important, donc a priori une résistance plus importante. Plusieurs facteurs influencent la propagation des ondes sonores dans le béton à savoir :

- Type de ciment,
- Dosage en ciment,
- Nature des granulats,
- Granulométrie des granulats,
- Humidité du béton,
- Maturité du béton.

4.5.6. Retrait

L'essai consiste à déterminer les propriétés intrinsèques des bétons sans aucun chargement mécanique extérieur.

Les échantillons ont été coulés dans des moules prismatiques 100x100x400 mm, et recouverts d'une toile de jute humide afin d'empêcher toute évaporation au très jeune âge et laissés dans le laboratoire à la température constante de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et d'humidité de $90\% \pm 5\%$. Les éprouvettes ont été équipées de deux plots en cuivre espacés de 10 cm. Après 24 h, les échantillons testés ont été démoulés et enveloppés d'une fine couche d'asphalte entourés de ruban adhésif aux deux extrémités afin d'éviter les effets de bord et d'empêcher l'échange hydrique avec le milieu extérieur. Les échantillons ont été conservés en position verticale dans des étuves à vapeur à trois températures définies (20 °C , 35 °C et 50 °C) avec une humidité relative de $50\% \pm 5\%$ (Figure 4.15).

Les valeurs du retrait ont été mesurées avec un comparateur numérique ayant une précision de $1\text{ }\mu\text{m}$, comme le montre la figure 4.15.

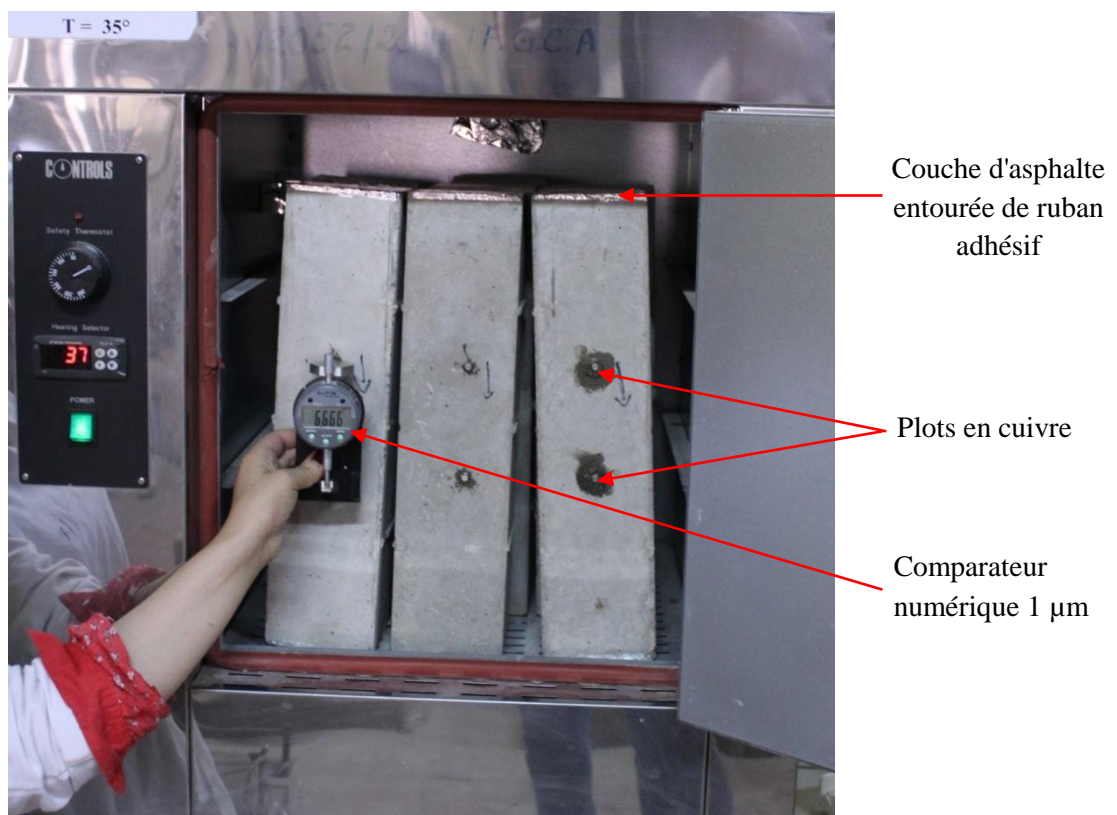


Figure 4. 15. Conservation des éprouvettes dans une étuve.

Le retrait est mesuré sur quatre intervalles [197], comme schématisé dans la figure 4.16 :

- Premier intervalle : Chaque heure le premier jour;
- Deuxième intervalle : Deux fois par jour pendant deux semaines;
- Troisième intervalle : Une fois par jour pendant deux semaines;
- Quatrième intervalle : Une fois par semaine pour une période de cinq mois.



Figure 4. 16. Chronologie de mesure du retrait.

Les valeurs mesurées sont les moyennes obtenues sur trois échantillons produits à partir du même mélange et stockés dans les mêmes conditions. La variation d'erreur pour toutes les mesures était acceptable et ne dépassait pas 5 %. Avant chaque mesure, il est impératif de faire le zéro mécanique du comparateur et nettoyer les plots. Pour la lecture, il faut tourner l'éprouvette de droite à gauche jusqu'à la stabilisation de la lecture. L'ensemble de mesure de retrait est effectué dans les mêmes conditions atmosphériques.

La déformation relative de longueur due au retrait est exprimée par l'équation suivante :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.4)$$

Avec 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 400 mm.

Les paramètres testés dans ce travail et leurs niveaux sont présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4. 4. Paramètres d'études.

Paramètres	Variation
Type de béton	BGN; BGR25 ; BGR50 ; BGR75;BGR100
Température de cure (°C)	20 ; 35 ; 50

4.5.7. Durabilité

L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés représente une étape indispensable afin de valider l'utilisation des granulats recyclés dans la production de bétons.

La durabilité est définie d'un ouvrage est sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité) pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage, et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible. C'est-à-dire sa capacité à supporter les attaques chimiques telles que les chlorures, les sulfates, les acides, les effets climatiques, les dégradations et usures et les effets du gel-dégel et de séchage-humidification.

Chaque agent agressif dans l'environnement entourant une structure en béton peut s'infiltrer, diffuser et pénétrer à travers les pores contenus dans le béton selon des lois et mécanismes de transport.

D'après la recherche bibliographique, très peu de recherches ont été effectuées sur la durabilité des bétons recyclés à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu (attaque sulfatique, acide, chlorures, gel-dégel, etc.) dans les BGR ainsi que leur morphologie qui est devenu plus complexe que celle des BGN.

L'objectif de cette partie est de caractériser la durabilité des bétons fabriqués à base de gravier recyclé. Les tests de durabilité effectués sont :

- Absorption par immersion;
- Absorption par capillarité;
- Perméabilité à l'eau;
- Attaque par les ions chlore;
- Attaque par les acides et les sulfates.

4.5.7.1. Absorption par immersion

L'absorption d'eau par immersion d'un béton est la capacité d'absorption massique exprimée par la quantité d'eau absorbée par une éprouvette de béton. L'essai consiste selon la norme ASTM C642-06 [198], à mettre des éprouvettes prismatique en béton 70x70x280 mm de 28 jours d'âge dans l'étuve à 105 ± 5 °C et de les peser jusqu'à avoir un poids constant, ensuite les immerger totalement dans un bac d'eau pendant 24 heures à 20 ± 2 °C jusqu'à saturation du matériau (Figure 4.17).

L'absorption exprimée en pourcent est calculée par la relation suivante :

$$W(\%) = \frac{M_s - M_{wd}}{M_{wd}} \times 100 \quad (4.5)$$

M_s : masse de l'éprouvette sèche ;

M_{wd} : masse de l'éprouvette après 24 h d'immersion dans l'eau.



Figure 4. 17. Essai d'absorption par immersion.

4.5.7.2. Absorption par capillarité

L'un des essais de contrôle de pénétration de l'eau dans le béton est le test de succion capillaire. L'essai est réalisé selon la norme ASTM C1585-04 [199], sur une section de 70x70mm d'éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm à 28 et 90 jours d'âge. Les éprouvettes ont été séchées préalablement dans une étuve à 105 °C pendant 24 h. Après, elles ont été enrobées par une mince couche de résine sur leurs surfaces latérales, pour assurer l'écoulement unidirectionnel de l'eau. Les éprouvettes sont posées dans un bain d'eau, sur des supports, de telle façon que seuls les premiers 5 mm de leurs bases soient immergés dans l'eau, comme le montre la figure 4.18.

La masse des échantillons a été mesurée après 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 90 et 1440 minutes d'absorption.

Le coefficient de sorptivité S ($m \cdot s^{-0.5}$) qui correspond à la pente de la courbe du taux d'absorption d'eau (Q/A) en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} est évalué d'après la formule suivante :

$$\frac{Q}{A} = S\sqrt{t} \quad (4.6)$$

Q : quantité d'eau absorbée (cm³),

A : section de l'éprouvette en contact de l'eau (A = 49 cm²),

t : temps (s),

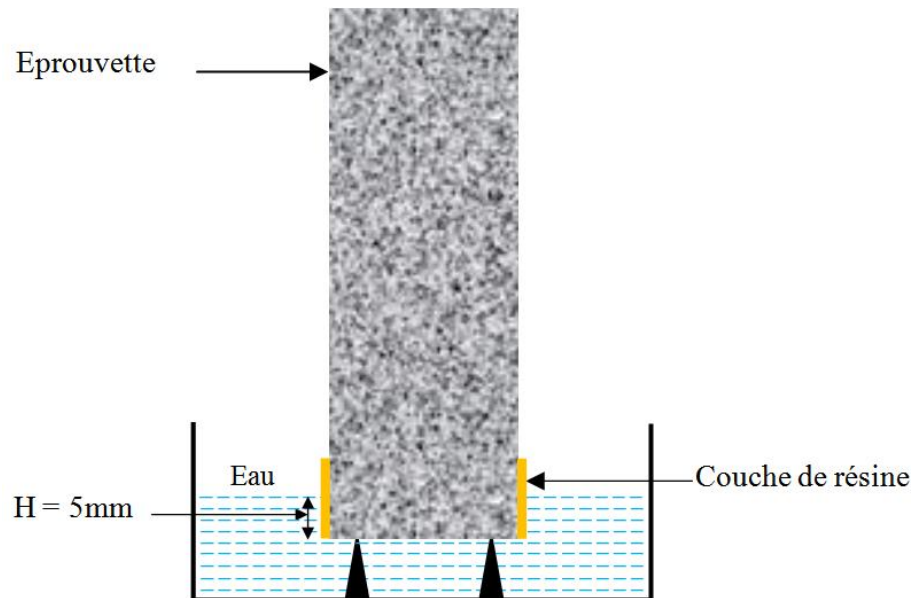


Figure 4. 18. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

4.5.7.3. Perméabilité à l'eau

Dans de nombreux cas, ce n'est pas uniquement l'étanchéité des éléments qui contrôle la durabilité des structures, mais aussi la perméabilité du béton. Plusieurs études montrent que les causes principales de la mauvaise performance du béton sont plus ou moins liées à la facilité avec laquelle un fluide ou un ion pénètre dans la porosité du béton.

La perméabilité à l'eau est la mesure de la migration d'eau à travers le béton sous une pression d'eau. Un béton perméable ouvre la porte aux différents agents agressifs extérieurs. L'essai de perméabilité à l'eau a été effectué selon la norme NF EN 12390-8 [200]. Cet essai permet de mesurer la profondeur de pénétration d'eau sur une éprouvette cylindrique de diamètre 150 mm. Trois échantillons ont été testés à l'âge de 28 et 90 jours. Les éprouvettes sont placées dans le dispositif d'essai sous une pression d'eau de 500 kPa (5 bars) pendant 72 h (Figure 4.19). La surface de l'éprouvette à exposer à la pression de l'eau doit être rugueuse à l'aide d'une brosse métallique.

Au cours de l'essai, on vérifie régulièrement l'apparence d'eau sur les surfaces des éprouvettes non exposées à la pression d'eau (cas de fuite d'eau). Après 72 h d'application de la pression, les éprouvettes ont été retirées de l'appareil, puis chaque échantillon a été divisé en deux moitiés au moyen de l'essai de fendage.

La profondeur de pénétration de l'eau est mesurée par un pied à coulisse au millimètre près. Les valeurs d'échelle de classement de la perméabilité à l'eau du béton sont données dans le tableau 4.5.

Tableau 4. 5. Valeurs limites de l'essai de perméabilité à l'eau [201].

Pénétration d'eau (mm)	Perméabilité à l'eau
< 30	Faible
30 - 60	Moyenne
> 60	Elevée

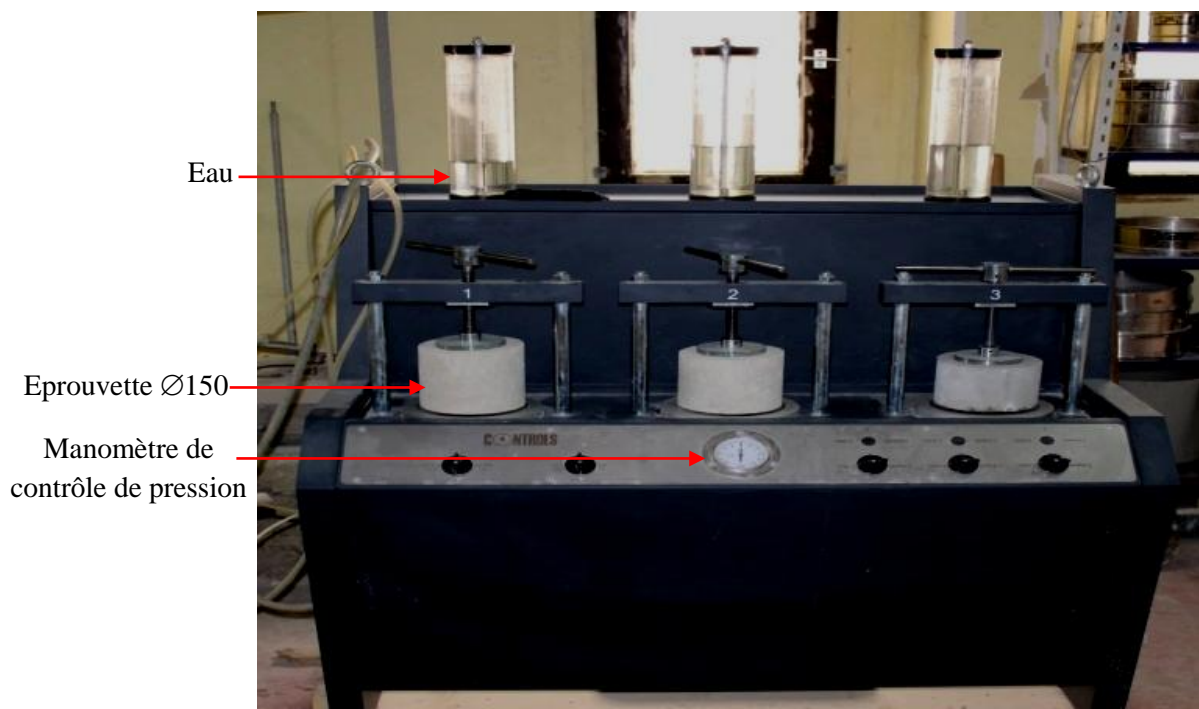


Figure 4. 19. Essai de perméabilité à l'eau.

4.5.7.4. Essai de diffusion des ions chlore

Pour les ouvrages en béton armé situés dans un milieu salin (bord de la mer ou présence de sels de déverglaçage). La présence d'ions chlore peut entraîner la corrosion rapide des

armatures. L'essai de diffusion des ions chlore permet de mesurer l'inter-connectivité des pores dans le béton. C'est pour cette raison que des mesures sont faites pour définir la résistance des bétons à la pénétration des chlorures par détermination de la conductance électrique, exprimé par la charge électrique totale.

De nombreuses méthodes ont été proposées pour évaluer la perméabilité aux chlorures du béton durci. Elles sont classées en quatre catégories, comme le montre le tableau 4.6.

Tableau 4. 6. Techniques de mesure de la pénétration des chlorures dans le béton [202]

Méthode d'essai	Epaisseur d'échantillon	Valeur mesurée	Durée du test	Évaluation
Test de pondération	Tout	Profil des chlorures	Long	- Profondeur de pénétration - Coefficient de diffusion
Cellule de diffusion	Mince	Cl diffusé	Long	- Coefficient de diffusion
Profondeur de pénétration	Tout	Pénétration	Court	- Profondeur de pénétration - Coefficient de diffusion
Pénétrabilité	50 mm	Courant vs temps	Très court (6 h)	- Charge électrique totale

La pénétration des ions chlore dans le béton est déterminée par la méthode de pénétrabilité selon la norme ASTM C1202-12 [203]. L'essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et 5 cm de hauteur à l'âge de 28 et 90 jours. La périphérie de l'éprouvette est recouverte de peinture étanche (flintkote) afin d'orienter la diffusion des ions chlore dans une seule direction. Avant chaque essai, les éprouvettes sont préalablement saturées dans l'eau à 20 °C. Le résultat est la moyenne de mesure sur trois éprouvettes testées pour chaque composition.

L'éprouvette est installée dans une cellule de telle sorte que l'une de ses faces est au contact avec une solution de chlorure de sodium (3 % de NaCl soit 30 g/l) dans laquelle se trouve une électrode émettrice (cathode de signe -) et l'autre face de l'éprouvette est au contact avec une solution d'hydroxyde de sodium (0.3N NaOH soit 12g/l) dans laquelle se trouve une autre électrode qui boucle le circuit (anode de signe +), comme le montre les figures 4.20 et 4.21. La solution du compartiment contenant du NaOH sert à mesurer la quantité de chlorures passée à travers l'épaisseur de 5 cm du béton testé.

L'essai consiste à appliquer entre les deux faces de l'éprouvette une différence de potentiel de 60 V pendant une période d'essai de 6 heures et les ions chlore, chargés négativement, migrent de la borne négative (face du béton en contact NaCl) vers la borne positive (face du béton en contact NaOH). La résistance du béton à la pénétration des ions

chlorure est représentée par la charge électrique totale passante (coulombs) traversant l'éprouvette. Plus le béton est perméable, plus les ions chlore migrent. Les valeurs limites de la charge électrique totale passante sont montrées dans le tableau 4.7 [203].

Tableau 4. 7. Evaluation de la perméabilité aux ions chlore du béton [203].

Charge (coulombs)	Pénétration des chlorures
> 4000	élevée
2000 – 4000	modérée
1000 – 2000	faible
100 – 1000	Très faible
< 100	négligeable

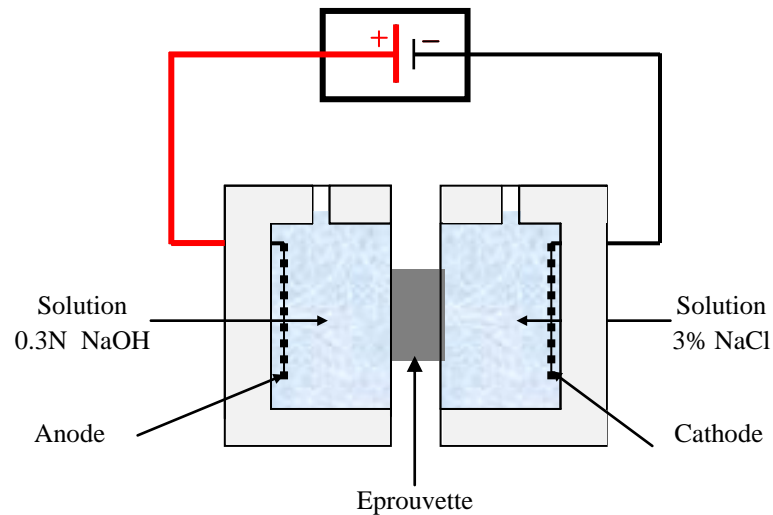


Figure 4. 20. Ensemble de l'essai de perméabilité aux ions chlore.

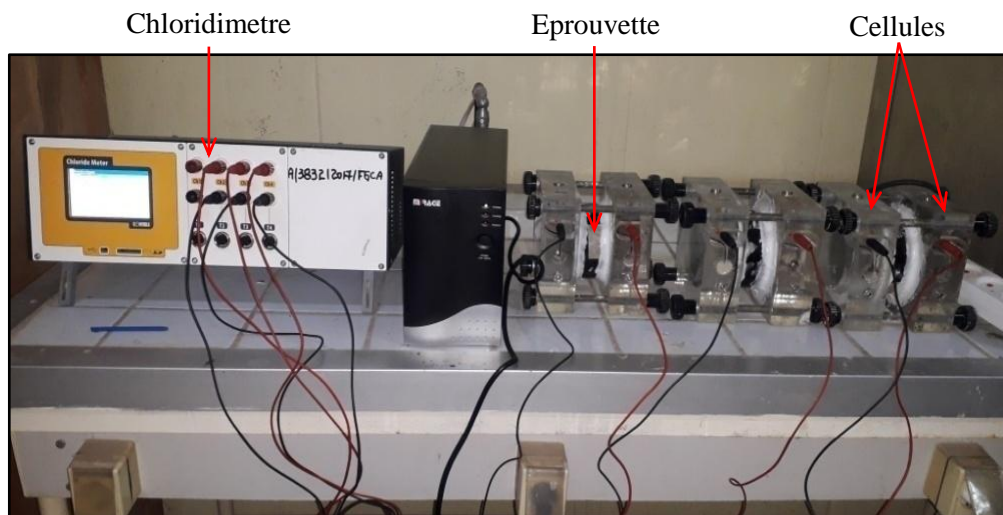


Figure 4. 21. Essai de perméabilité aux ions chlore [203].

4.5.7.5. Attaques chimiques externes

Le béton peut être affecté par des attaques chimiques provenant des sels existants dans le sol de fondation ou dissous dans l'eau, telles que les eaux souterraines et les eaux de mer ou de pluie. Un milieu agressif peut être acide ou salin (les sulfates, les nitrates et les chlorures).

L'agressivité d'un milieu est liée à la présence d'eau, à la concentration de la solution et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux du ciment. Le type de dégradation et son mécanisme d'action dépend de la température, de la nature de l'agent agressif et de son pH. Les attaques chimiques peuvent être d'origine interne lorsqu'elles proviennent des constituants du béton, ou externe quand elles sont transportées vers l'intérieur du béton à travers le sol, par les eaux souterraines, par les eaux industrielles ou par d'autres sources. Dans notre travail, nous allons étudier uniquement les attaques chimiques externes.

Dans la réalité, les agents agressifs qui menacent la durabilité du béton peuvent être de natures diverses tels que les acides ou les sulfates. Quatre solutions agressives ont été considérées dans cette étude :

- Sulfate de sodium (Na_2SO_4);
- Sulfate de magnésium (MgSO_4);
- Acide chlorhydrique (HCl);
- Acide sulfurique (H_2SO_4).

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques $70 \times 70 \times 280$ mm pour l'attaque des sulfates, conformément à la norme ASTM C-1012 [204] et sur des éprouvettes cubiques $100 \times 100 \times 100$ mm pour l'attaque des acides, conformément à la norme ASTM C-267 [205].

Les éprouvettes sont préalablement placées dans l'eau saturée de chaux à 20°C pendant 28 jours avant d'être immergées dans les solutions chimiques. L'emploi de l'eau saturée de chaux comme milieu de cure recommandé par les normes vise tout simplement à éviter la dissolution de la chaux (portlandite) des bétons testés dans l'eau.

Les éprouvettes ont été séparées en quatre groupes. Le premier groupe a été immergé dans 5 % d'une solution de sulfate de sodium, le second dans 5 % d'une solution de sulfate de magnésium, le troisième dans 3 % d'une solution d'acide sulfurique et le quatrième dans 1 % d'acide chlorhydrique. La concentration des solutions sulfatiques est prise égale à 50 g/l. Pour

les solutions acides, la concentration est de 17.16 ml pour H_2SO_4 et 23.5 ml pour HCl par 1 litre d'eau distillée (figure 4.22).

Durant toute la période de l'essai (360 jours), les solutions ont été renouvelées chaque mois. Les bacs de conservation sont couverts et conservés à 20 °C afin d'éviter toute évaporation.



Figure 4. 22. Immersion des éprouvettes dans les solutions agressives.

a- Mesure de l'expansion

Le prisme d'une section carrée de 70 mm et d'une longueur de 280 mm muni de plots métalliques, a été utilisé comme échantillon de béton, pour étudier l'expansion due à l'attaque sulfatique. L'expansion a été mesurée en utilisant un comparateur 1 μ m jusqu'à pour une durée de 12 mois d'immersion, conformément à la norme ASTM C-1012 [204] (Figure 4.23).



Figure 4. 23. Mesure de l'expansion.

b- Mesure de la perte de masse

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon de béton de dimensions 100×100×100 mm en fonction de la durée d'immersion dans les solutions acides, conformément à la norme ASTM C-267 [205].

La perte de masse est déterminée par pesée selon la formule suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100 \quad (4.7)$$

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

M_i : masse de l'éprouvette à l'instant (i) d'immersion en (g).

4.6. Conclusion

Ce travail expérimental a pour objectif de mettre en évidence l'influence du remplacement de gravier naturel par le gravier recyclé sur les propriétés physico-mécaniques et durabilité des bétons. Il a été montré dans ce chapitre que les propriétés physiques de gravier recyclé sont différentes de celles du gravier naturel. Ce gravier a eu une densité plus faible, une absorption d'eau plus élevée et une faible rigidité.

La grande capacité d'absorption d'eau du GR se manifeste pratiquement par une augmentation de la demande en eau de gâchage. Ce problème est corrigé par l'utilisation de gravier recyclé pré-saturé par immersion totale dans l'eau pendant 24 h avant le coulage. Nous avons adopté pour toutes les formulations des bétons testés le même rapport Eau/Ciment, fixé à 0.55.

Chapitre 5 :
Analyse des résultats expérimentaux

Chapitre 5 : Analyse des résultats expérimentaux

5.1. Introduction

L'objectif principal de cette recherche est de fournir plus d'information sur les effets du gravier recyclé quand il remplace le gravier naturel dans la confection des bétons. Nous présentons l'analyse et la discussion des résultats obtenus à partir des différents essais effectués, de façon à mettre en évidence les propriétés physiques et mécaniques et durabilité du béton à base de gravier recyclé.

5.2. Influence du gravier recyclé sur les propriétés du béton frais

5.2.1. Influence du GR sur la masse volumique du béton frais

La figure 5.1 montre l'évolution de la masse volumique du béton frais en fonction du taux des GR. On observe que la densité du béton frais diminue par substitution successive des granulats naturels par les granulats recyclés. Cette diminution est expliquée par la faible densité des GR. Ceci se confirme par les résultats obtenus par d'autres chercheurs.

La présence de proportions élevées d'ancien mortier de ciment de faible densité dans les particules de graviers recyclés et les augmentations correspondantes du pourcentage de vides peuvent également être la cause de cette baisse de la masse volumique.

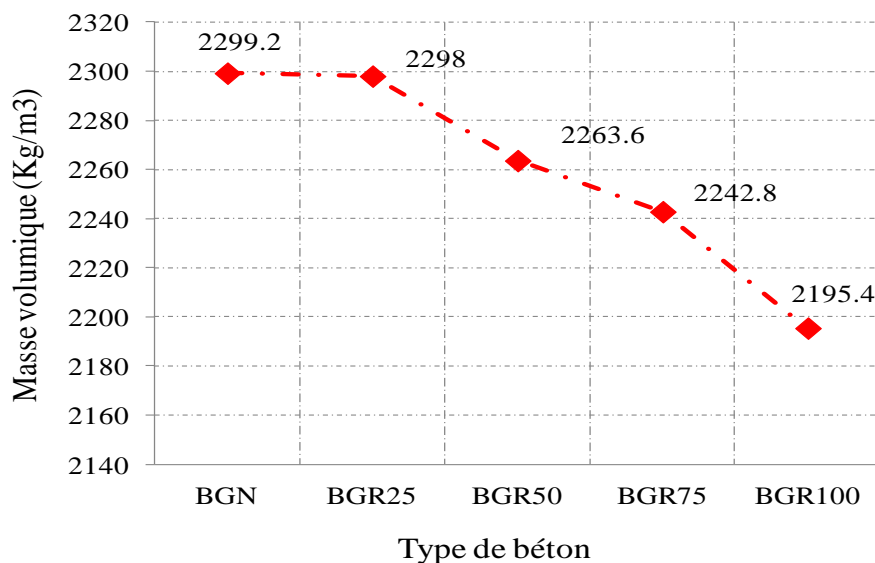


Figure 5. 1. Masse volumique des bétons frais en fonction du taux de GR

5.2.2. Influence du GR sur la rhéologie des bétons

La figure 5.2 montre les résultats des essais de rhéologie des bétons pour les différents taux de substitutions des GR.

Malgré que les bétons testés ont eu le même affaissement (16 ± 1 cm), il n'est pas le cas pour les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité). L'augmentation du taux de graviers recyclés entraîne une augmentation des valeurs rhéologiques, c'est-à-dire à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, en particulier pour 100% de GR. L'incorporation des granulats recyclés peut impliquer certains changements qui peuvent justifier l'augmentation des valeurs des paramètres rhéologiques du béton. Ces résultats sont conformes avec ceux trouvés par González-Taboada *et al.* [206] et Silva *et al.* [84].

En effet, le gravier recyclé est plus poreux et plus rugueux que le gravier naturel en raison du mortier attaché, cette rugosité peut être la cause de l'augmentation des paramètres rhéologiques des BGR.

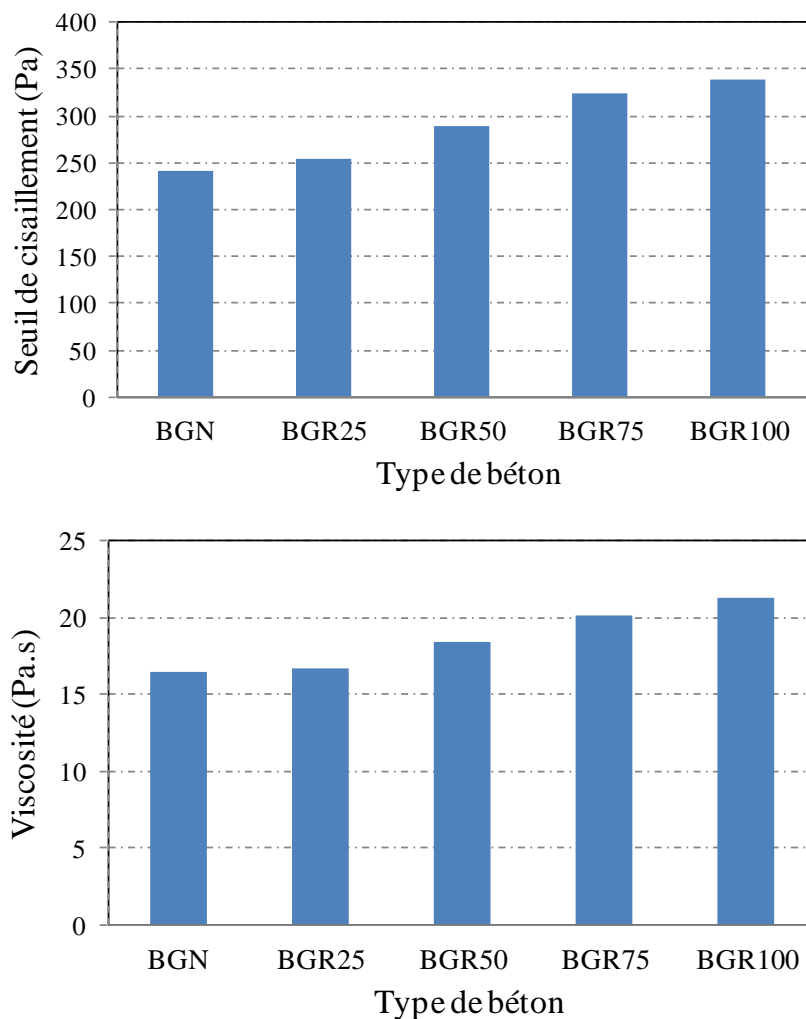


Figure 5. 2. Paramètres rhéologiques des bétons testés.

5.3. Influence du gravier recyclé sur les propriétés du béton durci

5.3.1. Influence du GR sur la masse volumique du béton durci

La figure 5.3 représente les valeurs de la masse volumique des bétons à base des granulats recyclés par un pourcentage de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. On remarque que la densité des bétons à base de granulats recyclés est nettement inférieure à celle du béton à base de granulats naturels avec un pourcentage de 4.49 %, 5.23 %, 6.91 %, 8.44 % respectivement.

Cette diminution de densité est due à la faible densité des granulats recyclés. Cette diminution est attribuée sans doute à la présence des pores au niveau d'ancien mortier attaché au gravier recyclé.

D'autre part, le béton de faible densité réduit les poids des structures, ce qui peut compenser partiellement la diminution de la résistance. De plus, les faibles densités réduisent la conductivité thermique du béton et par conséquent les ponts thermiques, améliorant ainsi la capacité d'isolation des bâtiments [18].

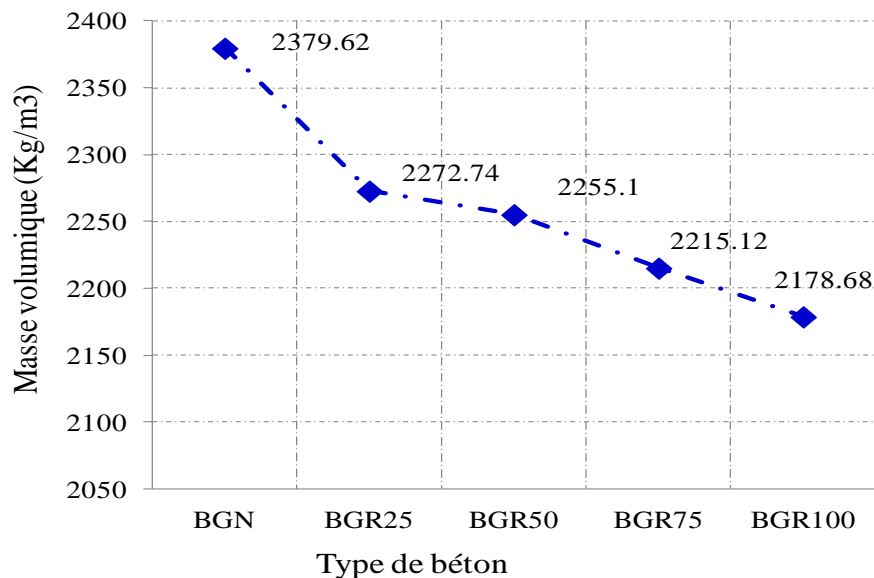


Figure 5. 3. Masse volumique des bétons durcis à 28 jours en fonction du taux de GR.

5.3.2. Influence du GR sur la résistance à la compression

La figure 5.4 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du gravier naturel par un gravier recyclé suivant les échéances 3, 7, 28 et 90 jours de durcissement.

On peut observer que la variation de la résistance à la compression avec les différents pourcentages de la teneur en GR est significative. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du GN. Debieb et Kenai [62] et Etxeberria et Vázquez [16] ont rapporté les mêmes résultats.

A 3, 7, 28 et 90 jours, la perte de résistance pour le BGR100 était respectivement de 28 %, 33 %, 27 % et 23 % par rapport au béton de référence (BGN). Cependant, à 28 et 90 jours, le BGR25 a affiché des valeurs de résistance similaires à celles obtenues avec le BGN; par conséquent, l'utilisation de 25 % de GR n'apporte aucun changement significatif par rapport au BGN. Au-delà de 50 % de GR, une perte significative de résistance à la compression se produit principalement en raison de l'effet de la quantité du mortier provenant de l'ancien béton attaché aux granulats recyclés et qui entrave le bon déroulement de l'hydratation du ciment et l'augmentation de la porosité de la pâte avec l'augmentation du taux de remplacement. Alves *et al.* [119] ont déclaré que la diminution de la résistance de la pâte avec une augmentation du taux de remplacement entraîne une baisse de la résistance à la compression.

L'utilisation de GR a un effet négatif sur la résistance à la compression du BGR. En effet, la microstructure des zones de transition interfaciale du BGR est différente de celle du BGN. Cela est dû à l'existence de deux zones de transition interfaciale (ITZ) dans le BGR. La première ITZ se situe entre le granulats parent et l'ancien mortier attaché dans BGR. La deuxième ITZ se situe entre l'ancien mortier attaché et le nouveau mortier. Cependant, le BGN n'a qu'une seule ITZ [97, 207].

Dans le béton, la résistance à la compression dépend étroitement de la qualité de la zone de liaison entre le granulats et la pâte de ciment. La qualité de cette zone de liaison dépend en grande partie de sa porosité, souvent plus importante que la porosité de la matrice cimentaire [208].

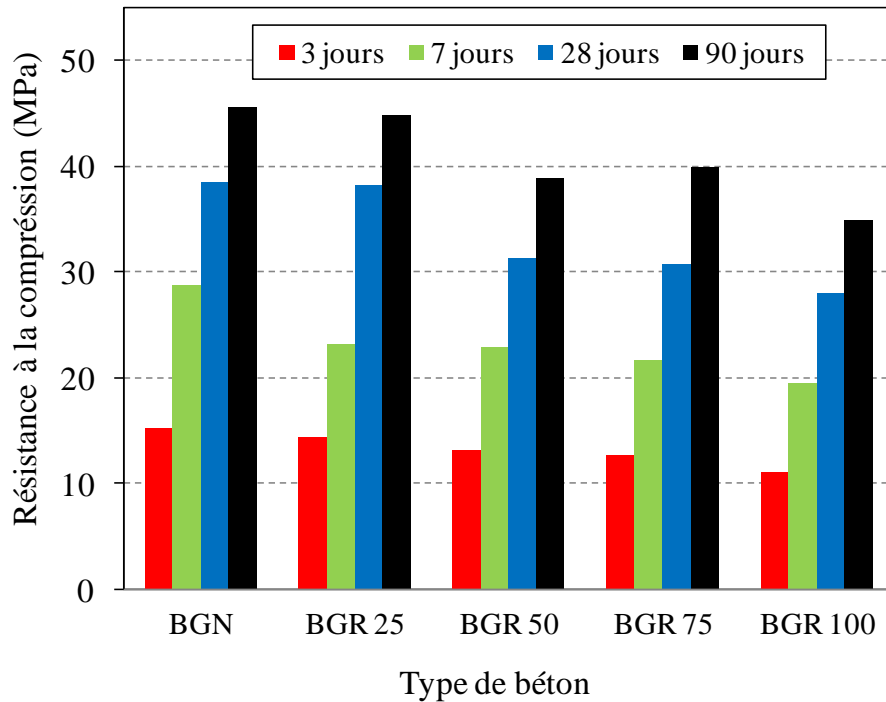


Figure 5. 4. Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de GR

5.3.3. Influence du GR sur la résistance à la traction par flexion

La figure 5.5 montre les valeurs de la résistance à la traction par flexion des bétons testés. On constate que la résistance à la traction par flexion diminue également lorsque le taux de remplacement du GR augmente. A 90 jours, le béton préparé avec 100 % de granulats recyclés était de 40 % inférieure à celle du BGN. Les raisons de cette diminution sont les mêmes que celles de la perte de résistance à la compression.

Marmash et Elliott [209] ont indiqué que la liaison entre les granulats et la pâte de ciment est un facteur important affectant la résistance à la flexion.

Matias *et al.* [189] ont constaté que la résistance plus faible du BGR par rapport au BGN est liée à la moindre densité du BGR, qui contient une plus grande quantité de mortier attaché. La diminution de la résistance à la traction en fonction de l'augmentation du taux de GR restent toujours appréciable jusqu'à l'âge de 90 jours.

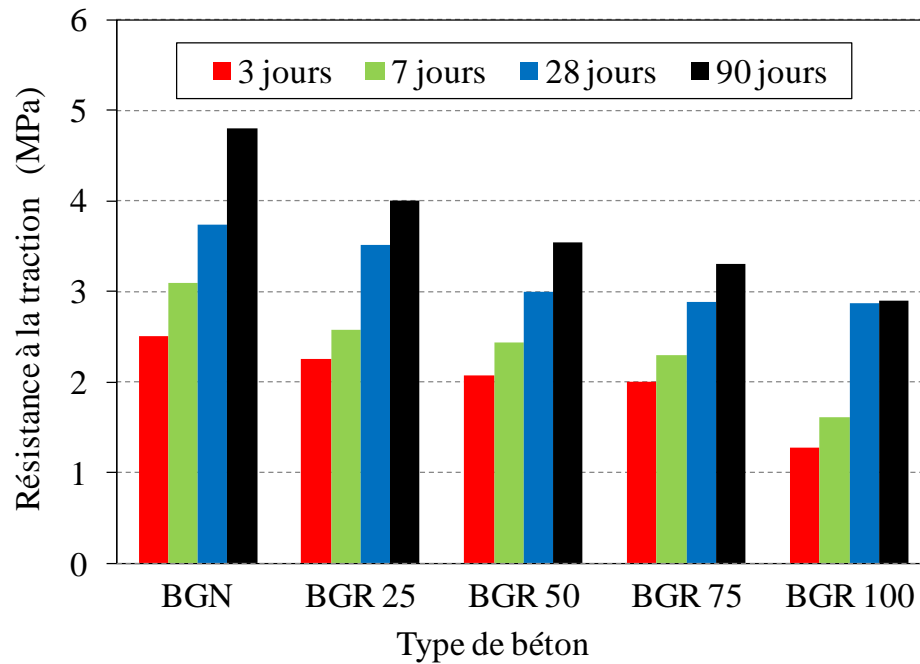


Figure 5. 5. Résistance à la flexion des bétons en fonction du taux de GR.

5.3.4. Influence du GR sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité à 28 jours des bétons testés est illustré à la figure 5.6. En général, le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du taux du gravier recyclé. Il est évident que tous les BGR ont présenté de faibles résultats que le BGN; cependant, le béton fait avec un remplacement de 25 % de GR révèle une réduction d'environ 3 %; en comparaison avec le BGN. L'utilisation de 50 %, 75 % et 100 % de GR a eu une baisse du module d'élasticité de 10 %, 11 % et 15 %, respectivement, en comparaison avec le BGN.

Corinaldesi *et al.* [22] et Neville [210] ont indiqué que le module d'élasticité du béton est généralement influencé par le type et la rigidité du gravier ainsi que par la rigidité, la porosité et la cohésion du mortier. Les granulats recyclés ont moins de rigidité que les granulats naturels en raison de la faible rigidité du mortier attaché et de la faible cohésion entre eux.

D'autre part ; lorsque les graviers recyclés sont pré-saturés, un flux d'eau s'écoule de l'intérieur vers la pâte de ciment. Ce flux d'eau brise les liaisons granulats-nouvelle pâte de ciment et conduit à un rapport E/C plus élevé dans la zone de transition interfaciale (ITZ), ce qui affaiblit et dégrade les propriétés du béton durci [18, 82].

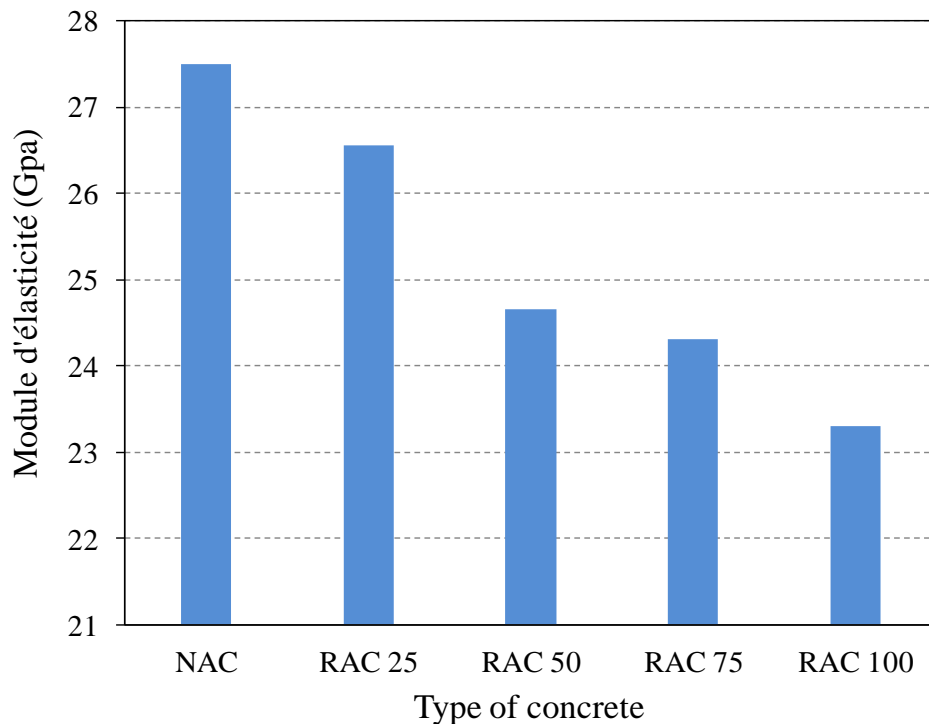


Figure 5. 6. Module d'élasticité des bétons testés à 28 jours en fonction du taux de GR.

5.3.5. Influence du GR sur les auscultations dynamiques

L'utilisation de techniques non destructives apporte à chaque fois de nombreux avantages dans les activités de diagnostic sur les bâtiments en termes de durabilité. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Le test est utilisé pour prédire la caractéristique des particules internes de béton et la qualité du béton, les structures des pores du béton peuvent avoir un impact sur les valeurs de la vitesse des ondes ultrasoniques et leur résistance.

Les résultats de tous les échantillons testés pour la vitesse d'impulsion ultrasonique pour les différents bétons confectionnés à 28 et 90 jours d'âge sont présentés sur la figure 5.7. Le béton à base de granulats naturels était le mélange qui a montré des résultats de meilleure qualité qui atteint respectivement 4115 m/s à 28 jours et 4316 m/s à 90 jours. Les valeurs de la vitesse du son du béton ont diminué avec une augmentation du taux de remplacement des GN par le GR dans le béton. Cette constatation est en accord avec les résultats obtenus par des travaux de recherche antérieurs [109, 188, 211].

Le béton produit avec 25 % de GR avait des valeurs similaires au béton témoin. Les bétons produits avec un taux de remplacement de 50 %, 75 % et 100 % ont perdu

respectivement 5.33 %, 6.30 % et 10.55 des valeurs de la vitesse d'impulsion ultrasonique à 28 jours, et de 4.13 %, 6.33 % et 11.01 % respectivement à 90 jours d'âge. L'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés a conduit à une augmentation des espaces poreux qui ont affecté la transmission des ondes ultrasonores. Les GR sont plus poreux que les GN, ce qui réduit la vitesse d'impulsion ultrasonique. Les mêmes résultats ont été trouvés par Fan *et al.* [211].

La vitesse des ondes diminue pendant que l'eau présente dans les pores s'évapore, et par conséquent, l'augmentation de la porosité séchée. En effet, l'eau dans les pores constitue un lien entre les phases solides pour le déplacement des ondes.

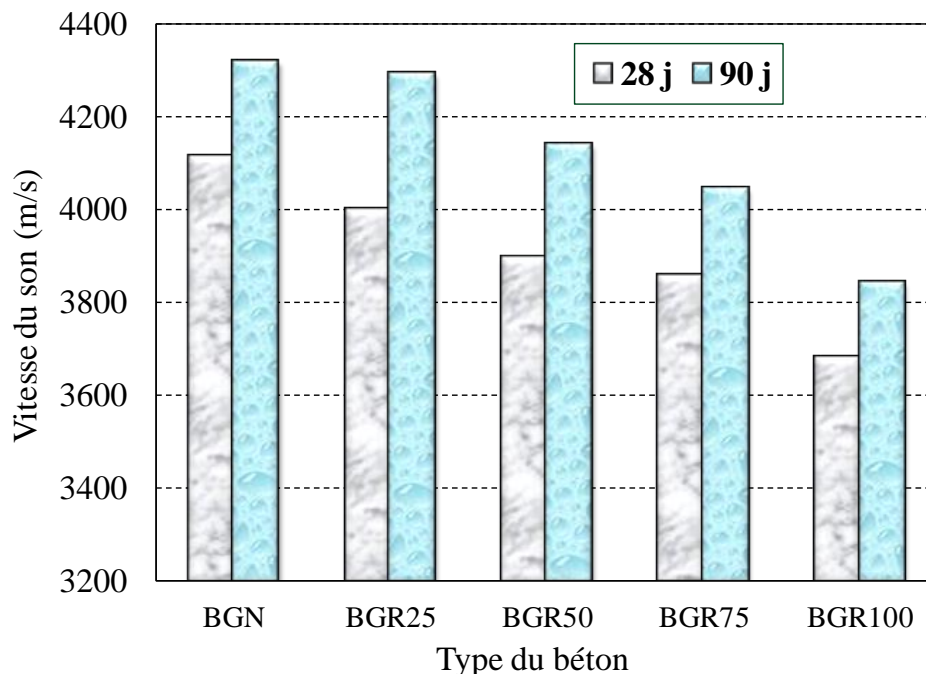


Figure 5. 7. Vitesse ultrasonique des bétons à 28 et 90 jours en fonction du taux de GR.

5.3.6. Influence du GR sur le retrait total

Généralement, le retrait est la réduction de volume suite à durcissement du béton, cette diminution est une indication des changements d'humidité et des changements physico-chimiques du béton, qui se produisent sans l'influence des forces externes sur le béton.

L'ampleur du retrait du béton est principalement influencée par la quantité de granulats grossiers utilisés dans la fabrication du béton, sa taille, son volume et le module de Young. La

raison est que les granulats grossiers constituent la plus grande partie du volume de béton et peuvent donc contrôler le phénomène de retrait [210].

Le retrait plus élevé de BGR est dû à la porosité élevée et au module de Young inférieur de BGR. Ces propriétés dépendent de la taille et de la composition du BGR [212].

La figure 5.8 montre l'évolution du retrait total à différentes températures de durcissement.

Dans cette étude, il a été constaté qu'à l'âge de 7 jours, le retrait total du BGR25 était d'environ 13 %, 15 % et 16 % plus élevé que celui du BGN, sous des températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C, respectivement. Au cours de 180 jours, ces valeurs ont atteint 3 %, 4 % et 9 % à ces températures de durcissement.

A l'âge de 7 jours, avec un taux de remplacement de 50 % de GR, les valeurs du retrait total sont respectivement plus élevées de 24 %, 34 % et 53 % à 20 °C, 35 °C et 50 °C par rapport au BGN. A 180 jours, des augmentations de 8 %, 12 % et 24 % ont été trouvées à ces températures.

Avec un taux de substitution de 75 % de GR, le retrait total augmente de 58 %, 55 % et 69 % aux températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C à 7 jours par rapport au BGN, tandis que le retrait augmente de 14 %, 15 % et 29 % à 180 jours d'âge.

Enfin, pour un taux de remplacement de 100 % de GR, le retrait total à 7 jours augmente respectivement de 88 %, 94 % et 98 % sous les trois températures de cure par rapport à ceux du BGN, tandis qu'à 180 jours, ces augmentations étaient de 19 %, 24 % et 36 %.

Duan et Poon [27] et Wang *et al.* [213] ont constaté que le retrait de BGR augmentait avec l'augmentation du mortier attaché au GR.

Notons également que les granulats grossiers recyclés utilisés contiennent plus de mortier attaché, ce qui s'avère être la principale raison du retrait mesuré plus élevé, où le mortier attaché au GR se rétracte lui-même, participant au retrait global des spécimens de BGR.

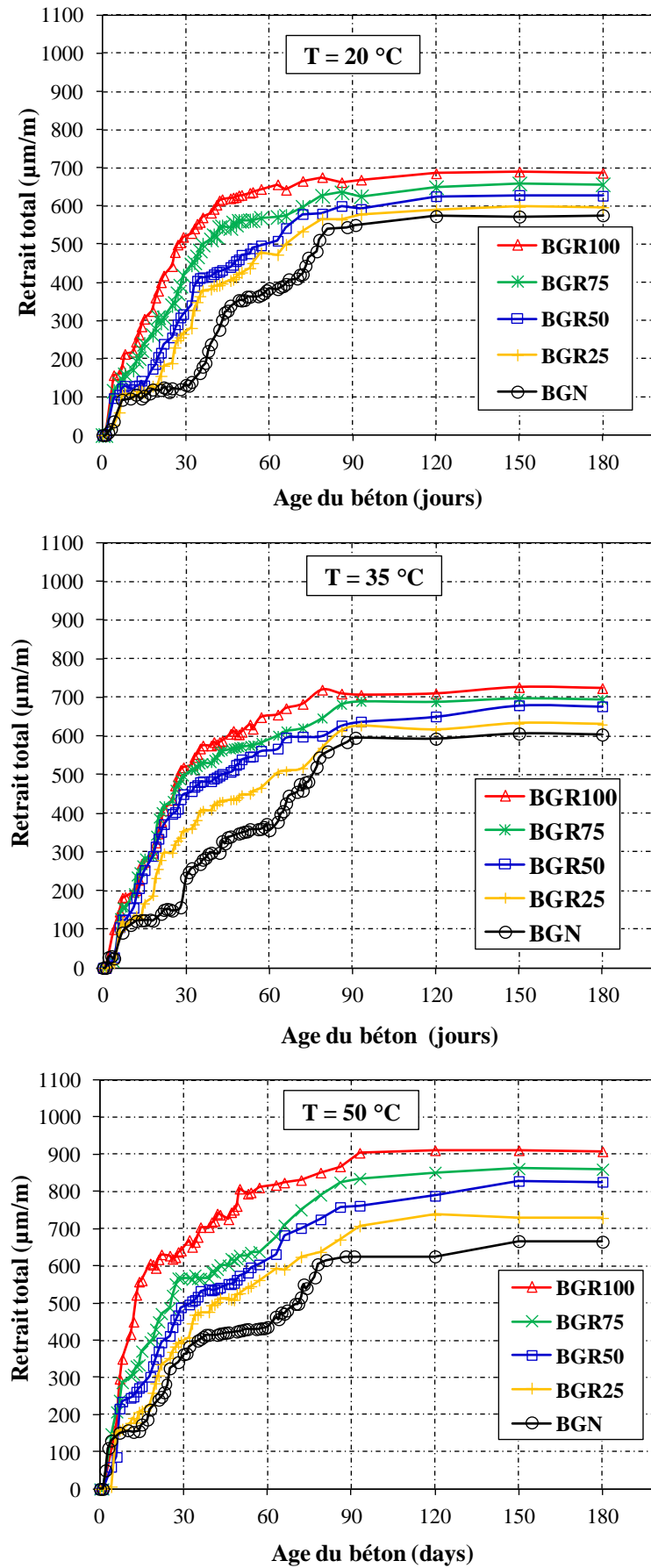


Figure 5. 8. Influence du GR sur le retrait total à différentes températures de cure.

5.3.7. Influence de la température de cure sur le retrait total

La figure 5.9 montre l'évolution du retrait total des bétons testés en fonction du temps de départ à partir d'un âge d'un jour jusqu'à 180 jours sous des températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C.

La cinétique et l'amplitude du retrait total dépendent principalement de la température de durcissement. Il est rapporté qu'une température élevée donne un retrait total important et augmente sa vitesse d'évolution [214]. L'influence de la température de cure est plus importante au jeune âge qu'à long terme en raison de la création de microfissures.

Ce changement peut être justifié par le mécanisme d'hydratation et le potentiel de diverses réactions du ciment ainsi que par leur relation avec la température. Au jeune âge, la cinétique du retrait total augmente considérablement avec l'augmentation de la température et devient stable après trois mois.

Les résultats trouvés ont montré que le retrait total du BGR est supérieur à celui du BGN. A des températures de durcissement de 50 °C et 35 °C, le retrait total est supérieur à celui soumis à 20 °C. Les valeurs du retrait total enregistrées après 180 jours des échantillons BGR50, BGR75 et BGR100 dans une température de cure de 50 °C étaient approximativement 8 %, 35 % et 33 % plus élevés par rapport à celles à 20 °C.

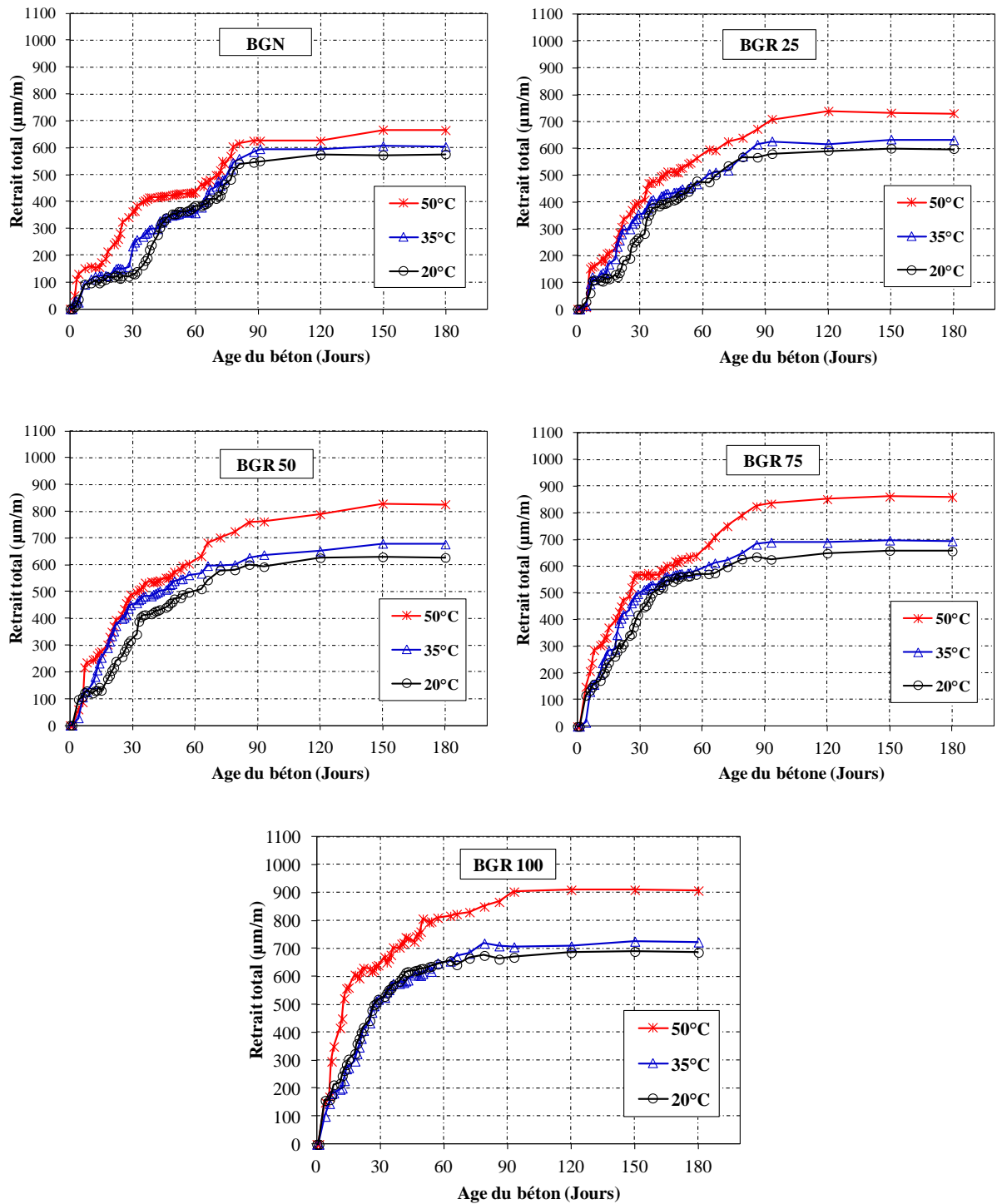


Figure 5. 9. Influence de la température de cure sur le retrait total des bétons.

5.3.8. Influence du gravier recyclé sur la durabilité du béton

5.3.8.1. Influence du GR sur l'absorption par immersion

La figure 5.10 illustre l'effet de la teneur en GR sur l'absorption d'eau par immersion du béton à l'âge de 28 et 90 jours. D'après le diagramme, on peut observer que le coefficient d'absorption d'eau des bétons décroît avec l'augmentation de la teneur en GR.

De cette figure, il apparaît que les valeurs d'absorption du BGR100 sont presque le double de celles du BGN. A 28 jours, le coefficient d'absorption du BGR100 augmente jusqu'à 8 % contrairement à celui du BGN qui affiche une valeur de 4.32 %, soit une différence de 85 %. Ces résultats sont dus à la capacité d'absorption élevée du GR, qui crée une pression d'osmose plus élevée dans le béton. En outre, la structure plus poreuse de la pâte attachée au GR conduit à une augmentation globale des pores ouverts dans le béton. A 90 jours, le coefficient d'absorption du BGR100 diminue jusqu'à 6.66 % par rapport au BGN qui atteint à 4.10 % soit une différence de 62 %, en raison de la compacité du béton qui augmente à long-terme en créant plus de CSH dans la matrice. Les résultats des mélanges avec 25 % de GR étaient similaires à ceux du BGN, ce qui signifie que l'absorption par immersion n'est pas affectée par ce niveau de taux de GR.

Au-delà de 25 % de GR, on a remarqué qu'il y a une augmentation remarquable du coefficient d'absorption d'eau. Alors, nous pouvons conclure que 25 % de BGR est le taux de remplacement optimal pour éviter une grande quantité d'absorption d'eau de BGR.

Mehta et Monteiro [215] ont rapporté que l'eau, en tant qu'agent principal, est capable de créer et de dégrader le béton. C'est également un facteur central derrière la plupart des problèmes concernant la durabilité du béton, car l'eau fonctionne comme un moyen de transport des agents agressifs, ce qui potentialise et provoque une dégradation physique et mécanique des structures en béton.

Salomon et Paulo [138] ont rapporté que l'essai d'absorption d'eau par immersion est considéré comme un meilleur indicateur pour évaluer la durabilité potentielle du béton que l'essai d'absorption capillaire, dans lequel le béton n'est pas saturé d'eau.

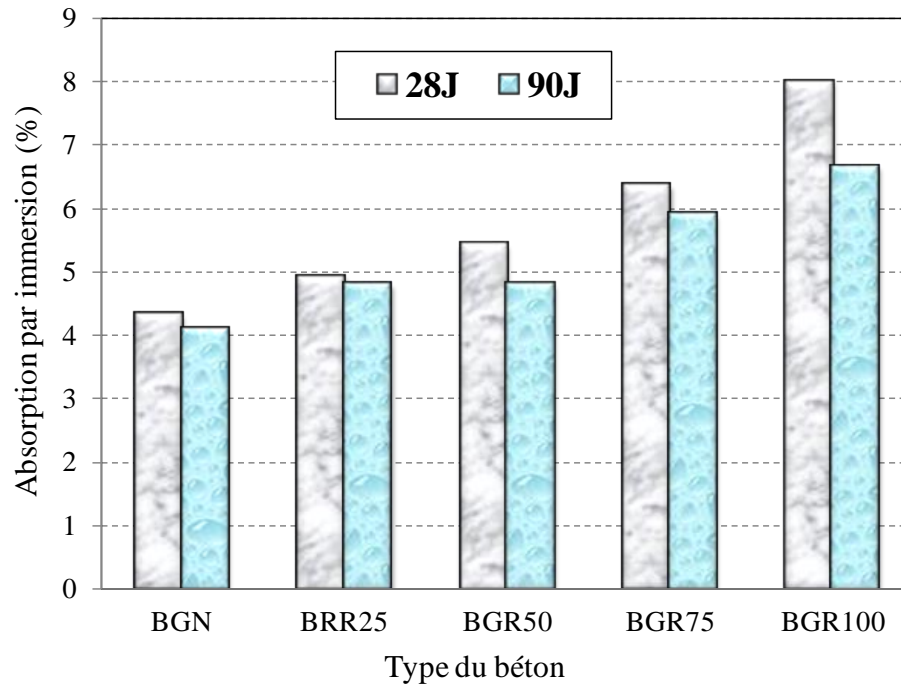


Figure 5. 10. Absorption par immersion des bétons en fonction du taux de GR.

Dans les études expérimentales réalisées par plusieurs auteurs [99, 126, 138, 212, 216, 217], il a été constaté que la présence d'ancien mortier attaché à la surface des particules de GR entraîne une capacité d'absorption supérieure du BGR. La nature moins dense et plus poreuse du mortier attaché et la présence de fissures dans le béton créent un chemin à l'eau pour s'écouler dans le BGR. Certains chercheurs [87, 99, 218, 219] ont observé que l'absorption d'eau de BGR est de 4 à 12 % supérieure à celle de la BGN. La pré-saturation des GR avant leur utilisation entraîne une diminution significative de l'absorption d'eau, car les granulats recyclés ont déjà absorbé une quantité d'eau dans les 24 heures d'immersion dans l'eau. Ce résultat est confirmé par plusieurs chercheurs [16, 97, 220].

5.3.8.2. Influence du GR sur l'absorption par capillarité

La durabilité du béton dépend en grande partie de la pénétrabilité de son système de pores. Le taux d'entrée d'eau ou d'autres fluides dans le béton (sorptivité) est largement contrôlé par l'absorption par capillarité [219, 221]. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton dépend de deux paramètres majeurs ; la porosité du béton et la vitesse d'absorption capillaire (sorptivité). Dans le ciment hydraté, il existe deux types de pores, des pores capillaires qui ne sont que les pores substituant l'espace initialement occupé par l'eau de gâchage et des pores de gel qui constituent les vides entre les hydrates formés. L'absorption capillaire d'un matériau dépend aussi de la surface en contact avec l'eau.

Les résultats expérimentaux sur l'évolution de la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps pour tous les bétons à l'âge de 28 et 90 jours de cure sont illustrés dans la figure 5.11. Au cours de l'essai d'absorption, seule la quantité d'eau globale ayant pénétrée dans l'échantillon est mesurée et non pas la hauteur maximale atteinte par le liquide. On voit que l'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps pour tous types de béton. On peut noter aussi que le taux d'absorption capillaire augmente avec l'augmentation de la quantité de substitution de GN par GR, cela a également été rapporté par d'autres chercheurs [16, 188, 222]. Les BGR75 et BGR100 présentent une absorption capillaire et une cinétique d'absorption plus élevée que le BGN, à 28 jours de cure, soit une augmentation de 45 % et 72 %, respectivement, pour une durée d'absorption de 64 min et une augmentation de 42 % et 63 % à 90 jours de cure.

Cela est dû à la structure plus poreuse du GR qui conduit à une plus grande connectivité des pores et un réseau capillaire étendu dans le béton [223]. Etxeberria *et al.* [16] ont affirmé que le mortier attaché au gravier recyclé devrait être la principale cause de l'absorption capillaire de l'eau.

Bravo *et al.* [219] ont rapporté que la taille des granulats recyclés a une grande influence sur l'augmentation de l'absorption d'eau capillaire. Les mélanges avec des sables recyclés ont des valeurs d'absorption beaucoup plus élevées que ceux avec des graviers recyclés.

Vieira *et al.* [224] ont rapporté que l'élévation du rapport E/C requis pour maintenir le même niveau de maniabilité de BGR que celui du BGN mène à une augmentation de l'absorption capillaire. Car, l'eau, qui n'était pas utilisée pour l'hydratation du ciment mais uniquement pour maintenir la même ouvrabilité du BGR, a conduit à un plus grand système de pores capillaires.

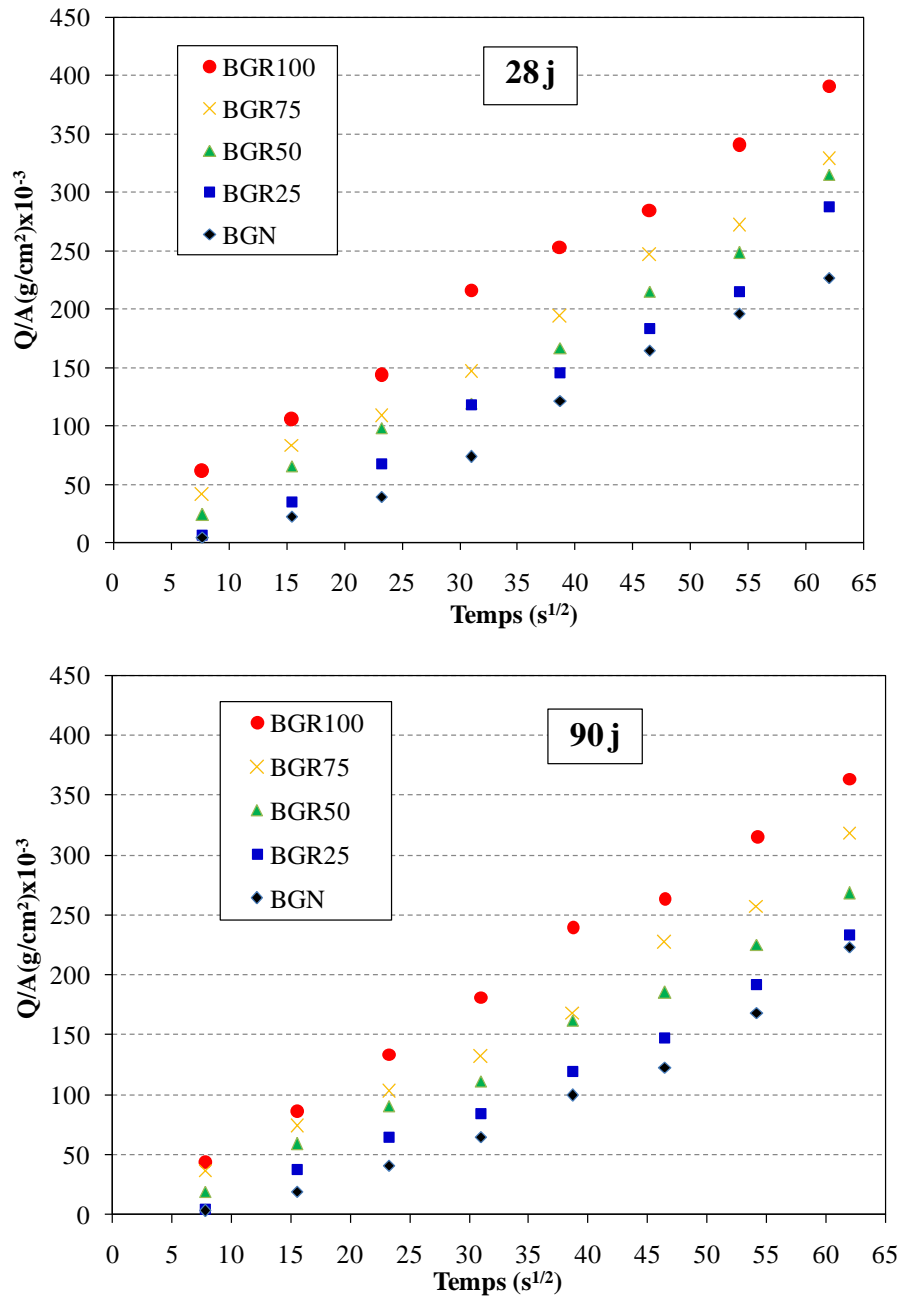


Figure 5. 11. Absorption capillaire des bétons à 28 et 90 jours.

L'essai de sorptivité mesure le taux de pénétration d'eau dans les pores du béton par aspiration capillaire [225-227]. Le coefficient d'absorption de capillarité donne une indication sur l'inter-connectivité des pores dans le béton et traduit ainsi la capacité de transporter des agents agressifs à l'intérieur du béton et la profondeur de transport de ces agents à l'intérieur de la structure interne du matériau.

Afin de calculer le coefficient de sorptivité (S), la quantité cumulée d'eau absorbée "Q" par section transversale (A) a été tracée en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} , puis une

ligne d'ajustement optimal a été obtenue par analyse de régression, ensuite le coefficient "S" a été déterminé du gradient de la ligne droite la mieux ajustée. L'eau absorbée par unité de surface obtenue à 28 et 90 jours de cure est tracée en fonction de la racine carrée du temps, les résultats sont présentés dans la figure 5.12.

On a trouvé une augmentation remarquable de la sorptivité des bétons en fonction du taux de remplacement des GR. A 28 jours, pour le BGR100, la sorptivité est de $6.3562 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$ contre $3.3134 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$ pour le BGN. On peut également constater une réduction plus sensible de la sorptivité lorsque la teneur en GR est de 25 %.

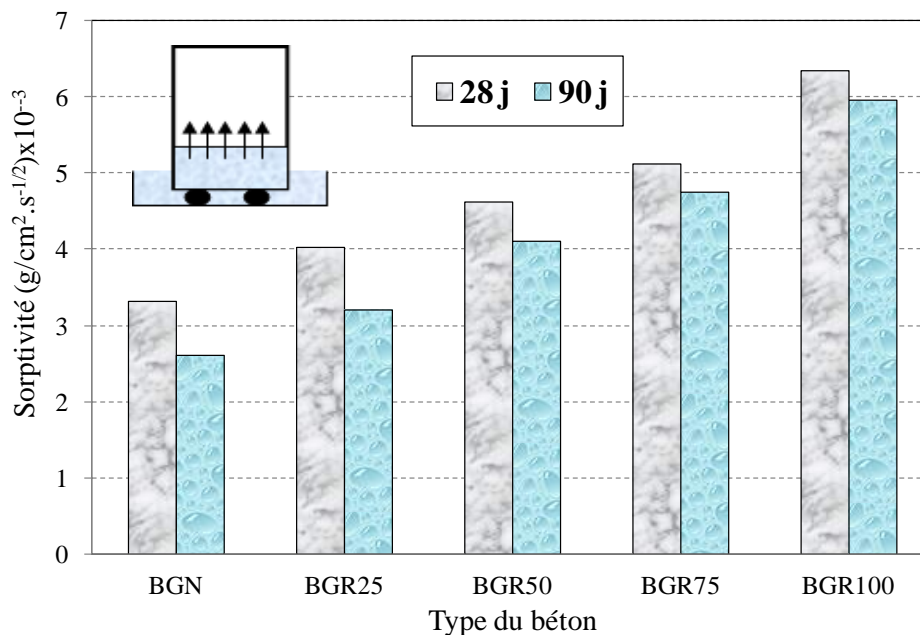


Figure 5. 12. Effet des GR sur la sorptivité des BGR à 28 et 90 jours

5.3.8.3. Influence du GR sur la perméabilité à l'eau des BGR

La pénétration et la lixiviation du béton par des matériaux en solution peuvent nuire à sa durabilité, lorsque l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est lixivié ou qu'une attaque par des fluides agressifs se produit. Cette pénétration dépend de la perméabilité du béton, définie comme la propriété qui régit le débit d'écoulement d'un fluide dans un solide poreux [133, 216]. La perméabilité détermine la facilité relative avec laquelle le béton devient saturé d'eau. La perméabilité a une incidence importante sur la vulnérabilité du béton au gel. De plus, dans le cas du béton armé, la pénétration d'humidité et d'air et de chlorure entraînera la corrosion de l'acier.

Les résultats de la perméabilité à l'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de 72 h sont illustrés dans la figure 5.13. D'une façon générale, on voit que, les

échantillons à base de gravier recyclé présentent une perméabilité à l'eau élevée à l'âge de 28 et 90 jours de cure. A 28 jours, le BGR100 a affiché une profondeur de pénétration d'eau de l'ordre de 65 mm, alors que le BGN affiche une profondeur de 23 mm. Les BGR75 et BGR50 affichent des valeurs moyennes de l'ordre de 44 mm et 55 mm respectivement. On constate que l'augmentation du taux des GR provoque une perméabilité à l'eau plus grande. Cette augmentation est justifiée par la capacité d'absorption du GR et de la perméabilité de la matrice de béton.

D'après des analyses microstructurales [228-230] sur un béton à base de granulats recyclés, il a été démontré que l'interface pâte de ciment-granat présente une ITZ plus poreuse et donc plus critique pour la perméabilité du béton lorsque les GR sont enrobés par ancienne pâte de ciment. De plus, la présence aléatoire du mortier attaché complique la caractérisation exacte des granulats recyclés. A 90 jours, la profondeur de pénétration d'eau des BGR50, BGR75, BGR100 est de l'ordre de 36 mm, 41 mm, 48 mm respectivement, alors que le BGN affiche une valeur de perméabilité de l'ordre de 20 mm.

On peut observer que la profondeur de pénétration d'eau pour tous les bétons diminue avec l'augmentation de l'âge de cure, en raison de l'amélioration de la compacité du béton à long terme en créant plus de CSH dans la matrice de béton. En outre, pour un taux de remplacement de 25 % de GR, la profondeur de pénétration d'eau à 28 et 90 jours est de 26 et 23 mm respectivement, qui est similaire à celle du béton à base de GN. Par conséquent, la différence n'est pas significative pour le remplacement de GR entre 0 % et 25 %.

D'une façon générale, la plupart des auteurs ont préconisé que la perméabilité des BGR réalisée avec le remplacement complet et partiel de GN par GR est supérieure à celle du BGN [40, 145]. Cela est dû au fait que le GR contient plus de porosité et de fissures sur le mortier qui y est attaché et de l'augmentation de la porosité dans l'ITZ.

Mehta et Monteiro [215] ont rapporté que l'eau qui a été utilisée dans le mélange est indirectement responsable de la perméabilité de la pâte de ciment hydratée, car son contenu détermine l'espace total et par la suite l'espace non rempli après que l'eau soit consommée par les réactions d'hydratation du ciment ou par évaporation dans l'environnement.

Thomas *et al.* [40] et Kou *et al.* [134] ont suggéré d'utiliser les cendres volantes ou de la bagasse comme remplacement partiel du ciment pour réduire considérablement La perméabilité à l'eau des bétons à base des granulats recyclés. Dans certains cas, la

perméabilité des BGR a été inférieure à celle du BGN. Ce phénomène est observé en raison des particules fines de cendres volantes.

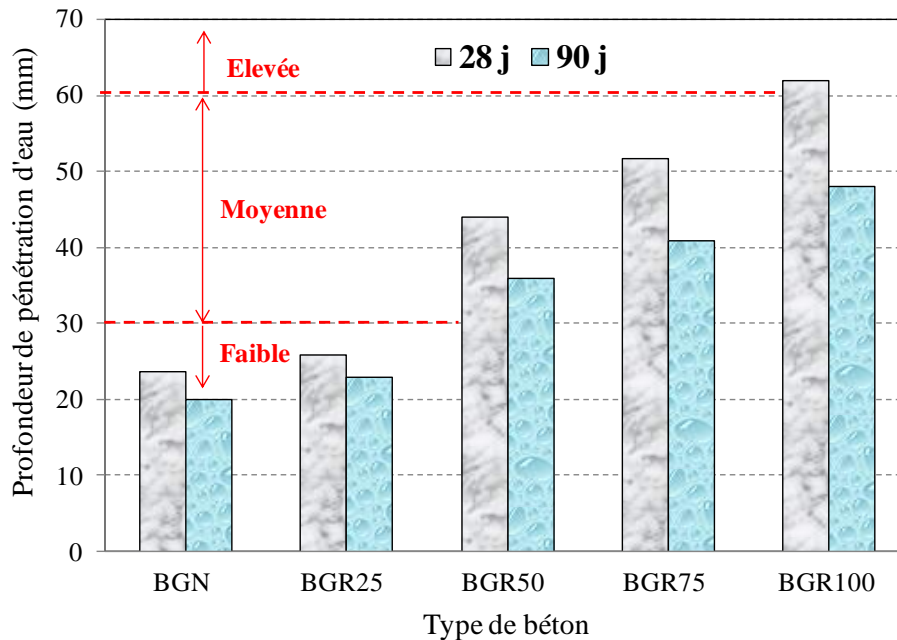


Figure 5. 13. Profondeur de pénétration d'eau en fonction du taux de GR

5.3.7.4. Influence des GR sur la perméabilité des BGR aux ions chlore

La pénétration des chlorures se réfère à la profondeur à laquelle les ions chlorure provenant de l'environnement pénètrent dans le béton. Cela peut conduire à la corrosion des armatures des structures en béton et donc l'étude de la perméabilité aux chlorures est un aspect important qui affecte la durabilité du béton [216]. Le mécanisme de transport des ions chlorure est un système complexe qui comprend éventuellement la diffusion de l'eau, l'imprégnation et l'absorption capillaire.

L'essai de la perméabilité aux ions chlore a été réalisé sur les bétons à base de GR avec 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de remplacement de GN. Les résultats de l'essai de la pénétration des ions chlore des divers mélanges après 28 et 90 jours de durcissement sont présentés sur la figure 5.14. Les résultats montrent que la charge totale transmise des ions chlore augmente avec l'augmentation du taux de remplacement. Lors de la substitution partielle de GR, le béton est plus susceptible à la pénétration des ions chlore.

A 28 jours, pour les BGR25, BGR50, BGR75, BGR100, il y a une augmentation de la charge totale transmise à travers des échantillons de l'ordre de 4 %, 24 %, 31 % et 54 %, respectivement par rapport à celle BGN. Cette augmentation est due à la grande porosité des granulats recyclés [42, 231, 232].

A 90 jours, une diminution la charge totale de 3 %, 25 %, 30 %, 48 % pour les BGR25, BGR50, BGR75, BGR100, respectivement par rapport à celle à 28 jours. On pense que la raison de cette réduction est due à la continuité de la réaction d'hydratation, qui entraîne une recristallisation des matériaux cimentaires à l'intérieur de l'espace poreux. Cela réduit la taille et la connectivité des pores et affecte donc la pénétration des ions chlorure [35, 232].

A 28 et 90 jours, les BGR50, BGR75 et BGR100 ont développé des charges totales de 4731, 4972 et 5860 coulombs et de 4562, 4731, 5389 coulombs, respectivement. Ces charges sont supérieures à 4000 coulombs, indiquant une résistance réduite à la pénétrabilité des ions chlore.

Le BGR25 a enregistré des valeurs de perméabilité aux ions chlore similaires à celles du BGN. Ce qui indique que ce niveau de remplacement n'a pas un effet négatif sur le béton. A 28 jours Ils ont affichés des valeurs de 3900 coulombs pour le BGR25 et 3700 coulombs pour le BGN, qui indiquent une pénétration modérée des ions chlore.

Verian *et al.* [35] ont trouvé que le béton à base de 100 % de GR a enregistré une charge totale supérieure à 4000 coulombs et la pénétration des ions chlore d'un mélange qui contient 30 % de GR était très comparable à celle d'un mélange à base d'un granulat naturel.

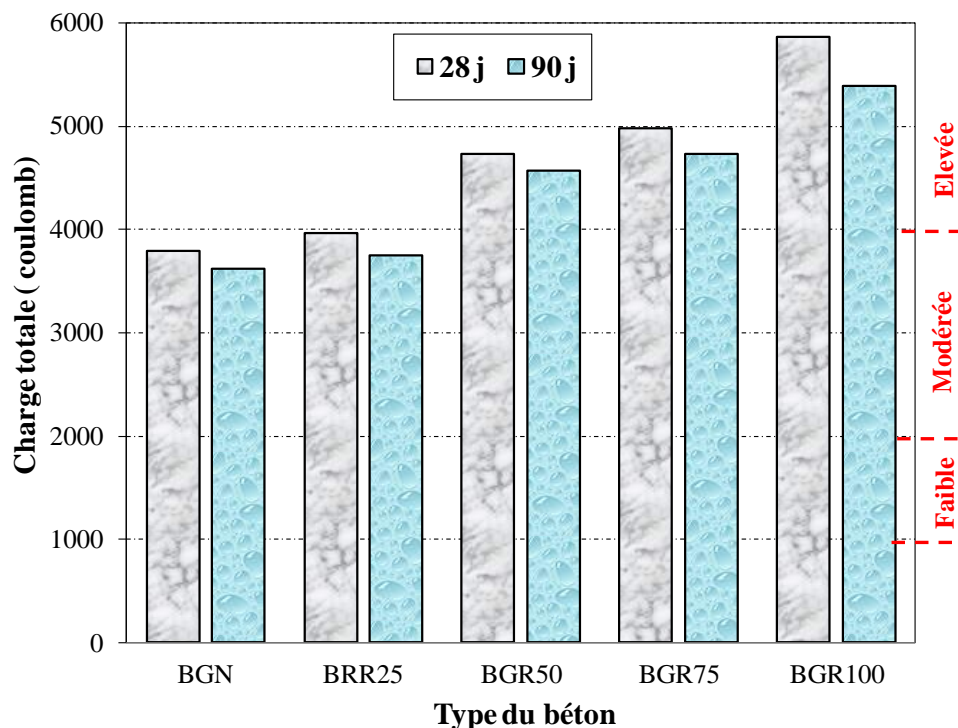
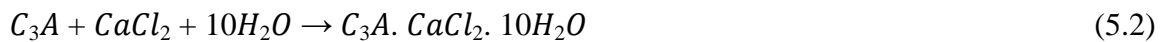


Figure 5. 14. Charge moyenne de pénétration des ions chlore.

L'équation (5.1) présente la réaction entre le chlorure de sodium $NaCl$ et la portlandite $(OH)_2$. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés (chlorures libres), une autre partie se combine avec les aluminates tricalciques (C_3A) en formant des monochloroaluminates de calcium ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), appelés sels de Friedel (chlorures liés), selon la réaction (5.2).

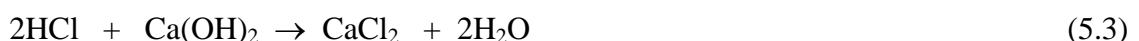


5.3.7.5. Attaque des BGR par les acides

L'attaque des bétons par les acides est provoquée par la réaction d'un acide et l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ de la pâte de ciment qui produit un sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment, affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble.

L'essai de la résistance du béton aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse d'échantillons immergés dans une solution acide. Les figures 5.15 et 5.16 illustrent les résultats de la variation en pourcentage de la perte de masse des échantillons des bétons immergés dans des solutions à une concentration de 1 % de HCl et de 3 % de H_2SO_4 jusqu'à 360 jours. D'après les résultats obtenus, on observe que le pourcentage de la perte de masse de tous types des bétons augmente en fonction de l'augmentation de temps d'immersion, on constate également que les valeurs de la perte de masse des BGR sont plus élevées que celles du BGN et montrent une tendance croissante régulièrement vers un taux de remplacement plus élevée en GR.

Le pourcentage de la perte de masse en fonction du temps pour les éprouvettes en béton immergés dans une solution de HCl est plus faible que celui des éprouvettes immergées dans H_2SO_4 . Pour le béton en contact avec l'acide chlorhydrique, l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide chlorhydrique, qui produit le chlorure de calcium, qui est fortement soluble et facilement enlevé de la pâte, cela affaiblit complètement la structure en béton. Le phénomène est expliqué par la réaction suivante :



Acide chlorhydrique + Hydroxyde de calcium \rightarrow Chlorure de calcium + Eau.

Dans la figure 5.15, on peut voir une perte de masse permanente des bétons immergés dans la solution HCl, à partir des premiers jours jusqu'à 360 jours. Le BGN et le BGR25

résistent mieux à l'attaque du HCl par rapport aux autres bétons, où ils ont perdu respectivement 10 et 11 % de leurs poids à 360 jours. Les BGR50, BGR75 et BGR100 ont enregistré une perte de masse de 13, 14 et 15 % respectivement à 360 jours.

Concernant la perte de masse en fonction du temps des bétons immergés dans une solution de H₂SO₄, on a remarqué que dans les premiers jours, la masse des échantillons a augmenté progressivement (Figure 5.16), ce gain de masse initial est attribué à l'absorption de la solution acide par les échantillons [155, 233]. En effet, au contact de l'acide sulfurique avec le béton, il réagit avec l'hydroxyde de calcium (Portlandite) pour former du sulfate de calcium (équation (5.2)). De plus, le sulfate de calcium formé par la première réaction réagit avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) et du gypse (équation (5.3)), entraînant une augmentation de la masse initiale. Ceci est exprimé par la réaction suivante :



acide sulfurique + hydroxyde de calcium → sulfate de calcium + eau



sulfate de calcium hydraté + aluminat de calcium hydraté → ettringite

Après un certain temps, l'expansion provoque une fissuration qui conduit finalement à un décollement de la couche de surface du béton, comme l'indique la perte de masse du béton qui commence environ un mois d'exposition à la solution d'acide sulfurique.

Les résultats obtenus sur les bétons testés par immersion dans la solution d'acide H₂SO₄ montrent que le béton de référence BGN et BGR25 semblent les plus résistants avec des pourcentages de perte de masse de 17 % et 18 % a été enregistrée à 360 jours. Cependant, le BGR50 présente une perte de masse d'environ 21 %. Les BGR75 et BGR100 ont subi presque la même perte de masse qui atteint 23 %. La comparaison entre BGN et BGR confirme que le BGR en avait plus de perte de masse que le BGN, Par conséquent, le BGR est moins durable. Cela peut être dû à un grand réseau capillaire dans le béton à cause de la structure plus poreuse du mortier attaché au GR qui conduit à une porosité plus élevée et qui freine la facilité de pénétration des agents agressifs au béton.

En outre, en raison du mortier attaché poreux, la liaison entre les anciennes et les nouvelles matrices du béton devient faible, moins dense et donc la qualité du béton fabriqué avec du GR est inférieure par rapport au béton à base de GN. Il est rapporté que, le type d'agrégat, le type de ciment affecte également la résistance aux acides [234].

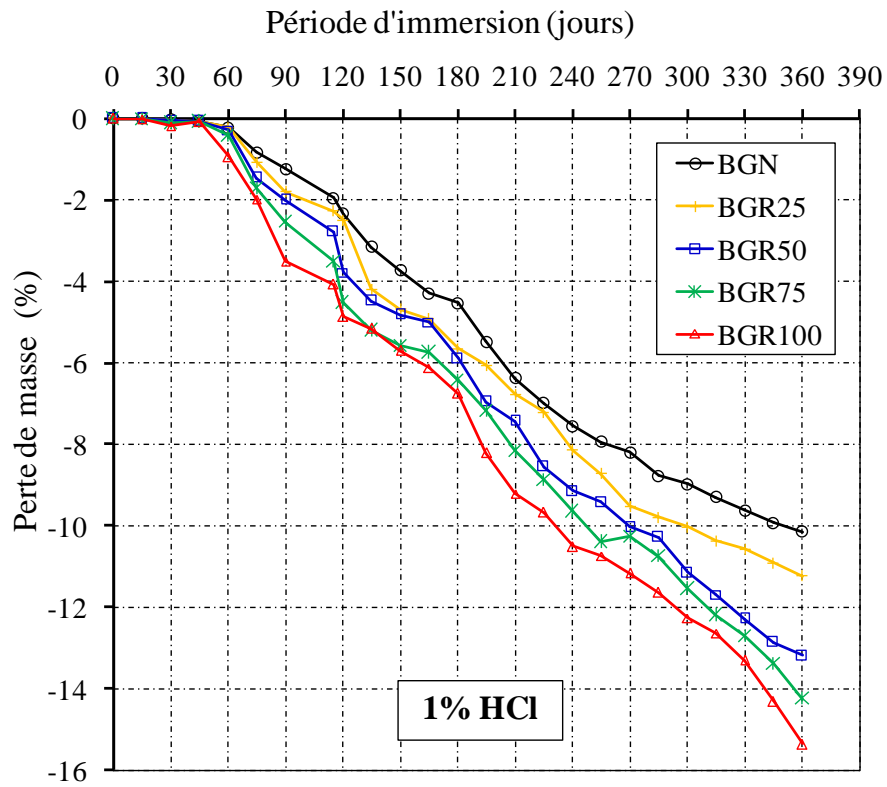


Figure 5. 15. Pourcentage de perte de masse des éprouvettes immergées dans 1 % HCl.

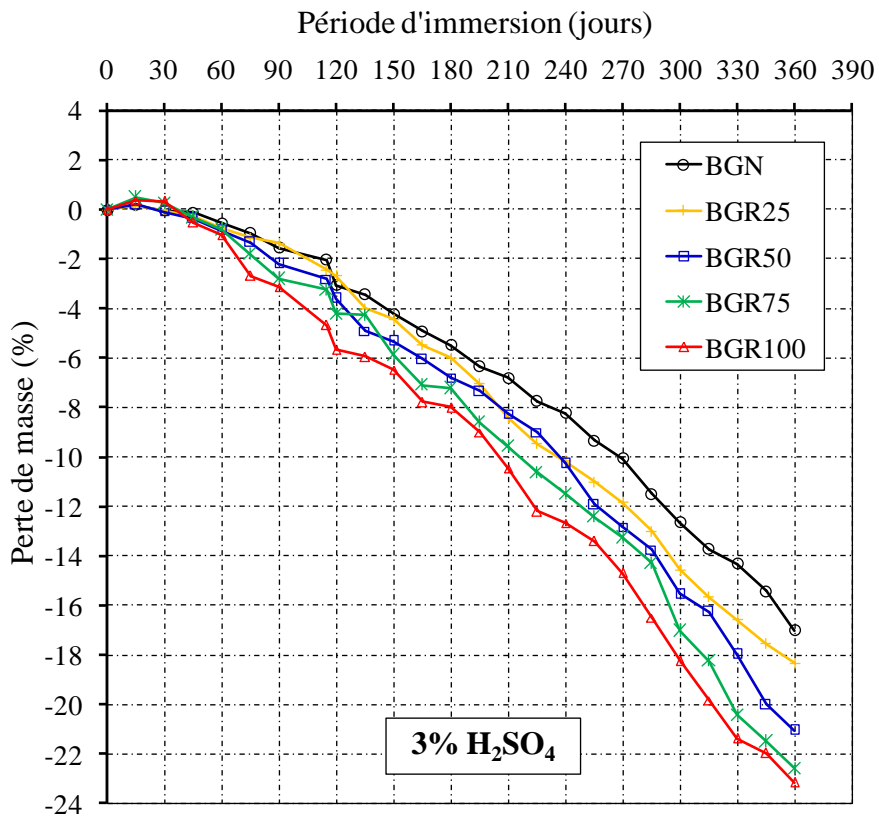


Figure 5. 16. Pourcentage de perte de masse des éprouvettes immergées dans 3 % H₂SO₄.

Examen visuel des échantillons

Les figures 5.17 et 5.18 montrent l'état des échantillons des bétons après 360 jours d'immersion dans les solutions de 1 % HCl et de 3 % H₂SO₄. On constate que les éprouvettes ont subi une dégradation remarquable, à cause de l'agressivité des acides, en particulier l'acide sulfurique.

En cas d'attaque d'acide chlorhydrique, une ceinture brune est observée à la surface des échantillons. Ces ceintures peuvent être causées par la présence d'hydroxyde ferrique [233]. De plus, avec le temps, un décollement de la couche superficielle se produit. De ce fait, il en résulte une perte de masse des échantillons de béton.

Visuellement, on peut remarquer clairement l'état des différents échantillons des bétons après 12 mois d'immersion dans les solutions d'acide HCl et H₂SO₄. Avant de nettoyer les échantillons prélevés dans la solution d'acide sulfurique, on a pu remarquer une couche blanchâtre facilement lavable à l'eau. Après lavage de la couche blanche, on constate une dégradation de surface des spécimens après l'attaque de H₂SO₄. La diminution de la masse des échantillons causés par l'attaque des acides a été remarquée. Déjà au cours de la période d'immersion, des agrégats exposés ont été observés sur les surfaces de tous les échantillons.

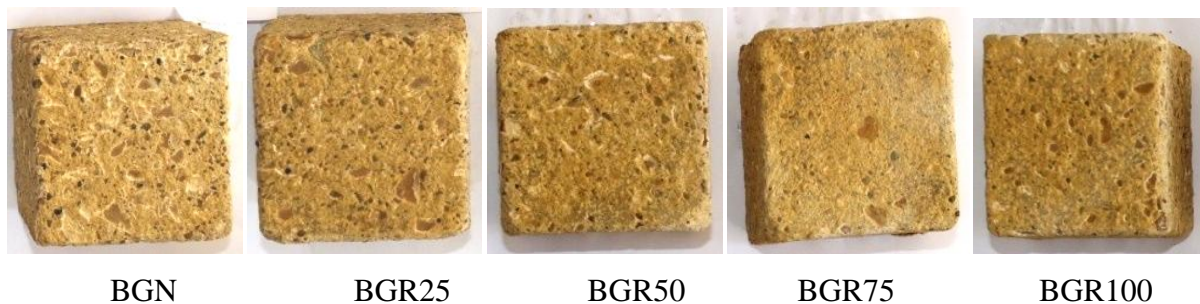


Figure 5. 17. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 1 % HCl.

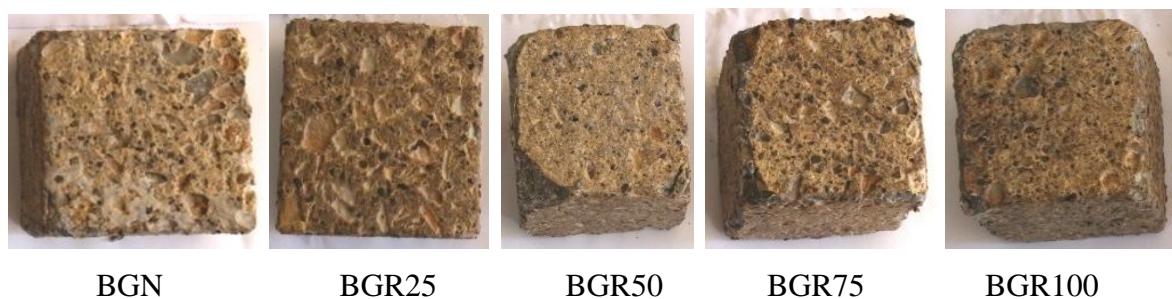


Figure 5. 18. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 3 % H₂SO₄.

5.3.7.6. Attaque des BGR par les sulfates

L'attaque du béton par les sulfates est accompagnée d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les sulfates, les aluminates de calcium hydratés et non hydratés, et les éléments constitutifs des hydrates de calcium de la pâte de ciment durcie. Les produits qui proviennent de ces réactions sont l'hydrate de trisulfoaluminate de calcium couramment appelé ettringite, l'hydrate de sulfate de calcium connu sous le nom de gypse et la thaumasite, qui se formerait préférentiellement lors d'attaques sulfatiques à des températures assez basses (entre 0 et 5 °C). Ceci conduit à une expansion importante et à une détérioration chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion) à plus ou moins long terme. L'attaque au sulfate est un phénomène compliqué affecté par de nombreux paramètres, tel que le type de ciment, la porosité du béton, temps d'immersion et concentration d'exposition au sulfate.

Les résultats de l'essai d'expansion des éprouvettes immergés dans les solutions contenant 5 % de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) et 5 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4) pendant 360 jours sont présentés dans les figures 3.19 et 3.20. De toute évidence, l'expansion du béton augmente avec l'augmentation de l'âge d'immersion. Ces résultats ont indiqué que l'utilisation du gravier recyclé a une influence néfaste sur la résistance du béton aux sulfates. Les résultats montrent que le BGR100 est plus expansif que les autres types de béton dans les deux milieux sulfatiques. Les pourcentages de l'expansion du BGR100 immergé dans 5 % $MgSO_4$ et dans 5 % Na_2SO_4 sont respectivement de 0.078 % et 0.091 %. En outre, les pourcentages d'expansion des éprouvettes du BGR75 et BGR50 immergés dans $MgSO_4$ sont de l'ordre de 0.074 % et 0.068 % respectivement à 360 jours, et dans Na_2SO_4 ont atteint respectivement 0.087 % et 0.081 %. Les expansions de BGR25 exposé dans 5 % $MgSO_4$ et dans 5 % Na_2SO_4 sont de 0.055 % et 0.061 %, respectivement.

Les résultats montrent aussi que les bétons étaient plus expansifs dans une solution de Na_2SO_4 que dans une solution $MgSO_4$.

Tandis que, les plus faibles expansions ont été enregistrées pour les BGN avec des valeurs de l'ordre de 0.047 % et 0.055 % dans les milieux 5 % $MgSO_4$ et 5 % Na_2SO_4 , respectivement. Les résultats ont montré que l'utilisation du GR à tous les taux de remplacement pouvait augmenter l'expansion du béton par rapport au BGN.

Comme indiqué par Khatib [127], l'utilisation des GR au lieu des GN résulte en une augmentation de l'expansion du béton, de sorte que les résultats de déformations expansives

des mélanges à base des granulats recyclés ont été relativement plus élevées par rapport aux mélanges de référence, qui n'étaient pas dues uniquement à l'existence de sulfates excessifs dans granulats mais aussi grâce aux granulats de béton recyclé.

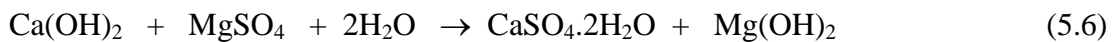
Une expansion plus élevée du BGR par rapport à celle du BGN peut être attribuée à la porosité du mortier attaché au GR. par conséquent, les vides et les fissures dans le gravier recyclés ont permis aux ions sulfate de pénétrer plus facilement dans le BGR et de réagir avec les produits d'hydratation pour former du gypse et de l'ettringite de nature expansive, ce qui entraîne une expansion plus élevée [235].

L'attaque sulfatique engendre deux types de produits, un gypse secondaire peu expansif et l'ettringite qui est la cause principale de l'altération des bétons en milieux sulfatés.

Etape 1 : Formation du gypse secondaire

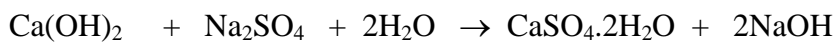
Les ions de sulfate SO_4^{4-} pénètrent à l'intérieur du béton par diffusion ou par absorption capillaire et y réagissent avec la chaux :

- **Cas de sulfate de magnésium (MgSO_4)**



$\text{Mg}(\text{OH})_2$: Brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH

- **Cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4)**



NaOH : alcalinité élevée \rightarrow Stabilisation des C-S-H

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Gypse secondaire peu expansif qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté.

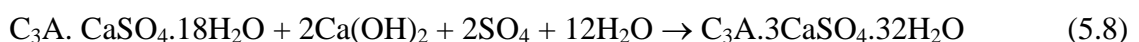
Etape 2 : Formation de l'ettringite secondaire

Le gypse formé par cette réaction, participe à la formation de l'ettringite secondaire à partir du C_3A anhydre résiduel ou des aluminates hydratés (monosulfoaluminates), selon les formules suivantes :

A partir du C_3A anhydre résiduel



A partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$: ettringite secondaire expansive.

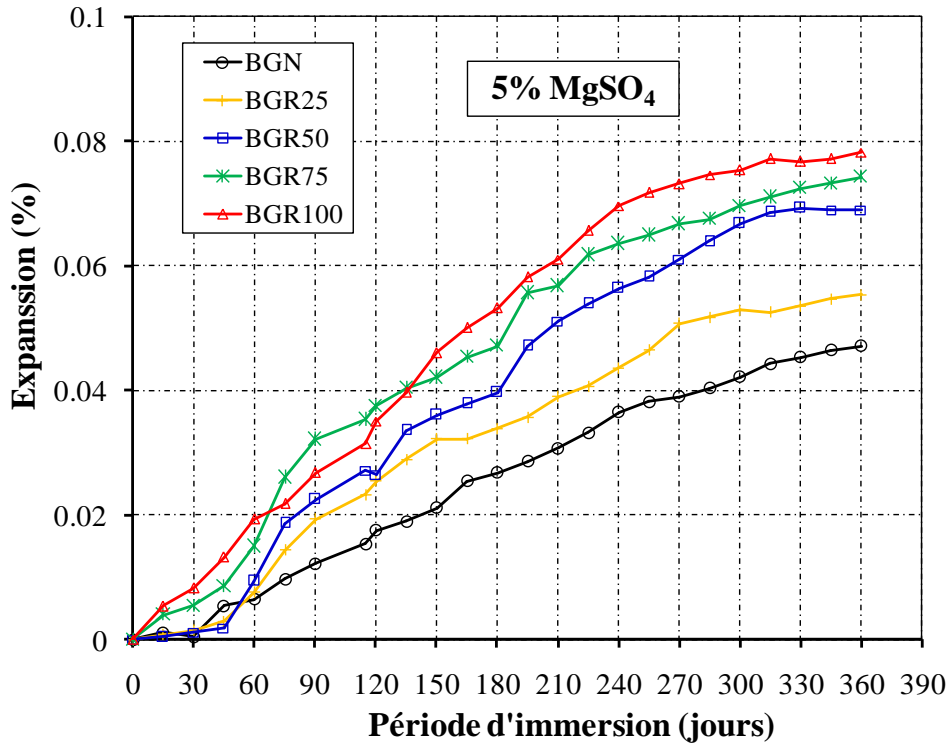


Figure 5. 19. Expansion des éprouvettes immergées dans 5 % MgSO₄.

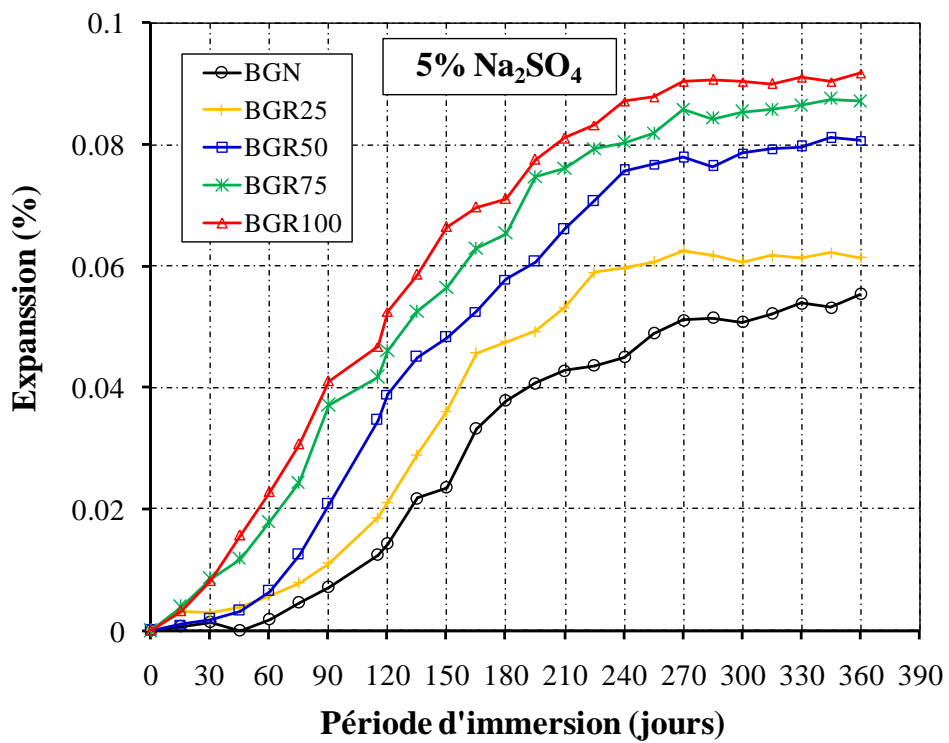


Figure 5. 20. Expansion des éprouvettes immergées dans 5 % Na₂SO₄.

➤ **Examen visuel des échantillons**

Une inspection visuelle des échantillons a été effectuée après 360 jours d'immersion dans les solutions 5 % MgSO_4 et 5 % Na_2SO_4 . A partir de la figure 5.21, on peut observer une fissuration autour des coins et des bords des éprouvettes immergées dans MgSO_4 . Par ailleurs, la figure 5.22 montre que la surface des éprouvettes exposées dans la solution Na_2SO_4 a gonflé, fissuré et écaillé après 360 jours d'immersion en particulier celle du BGR100.

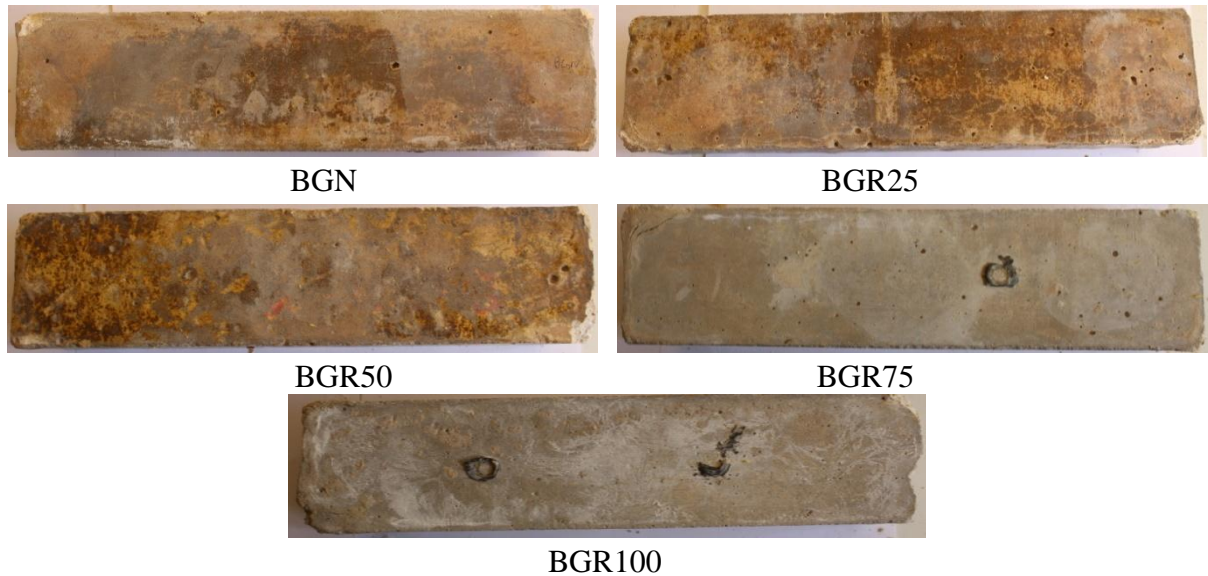


Figure 5. 21. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 5 % MgSO_4 .

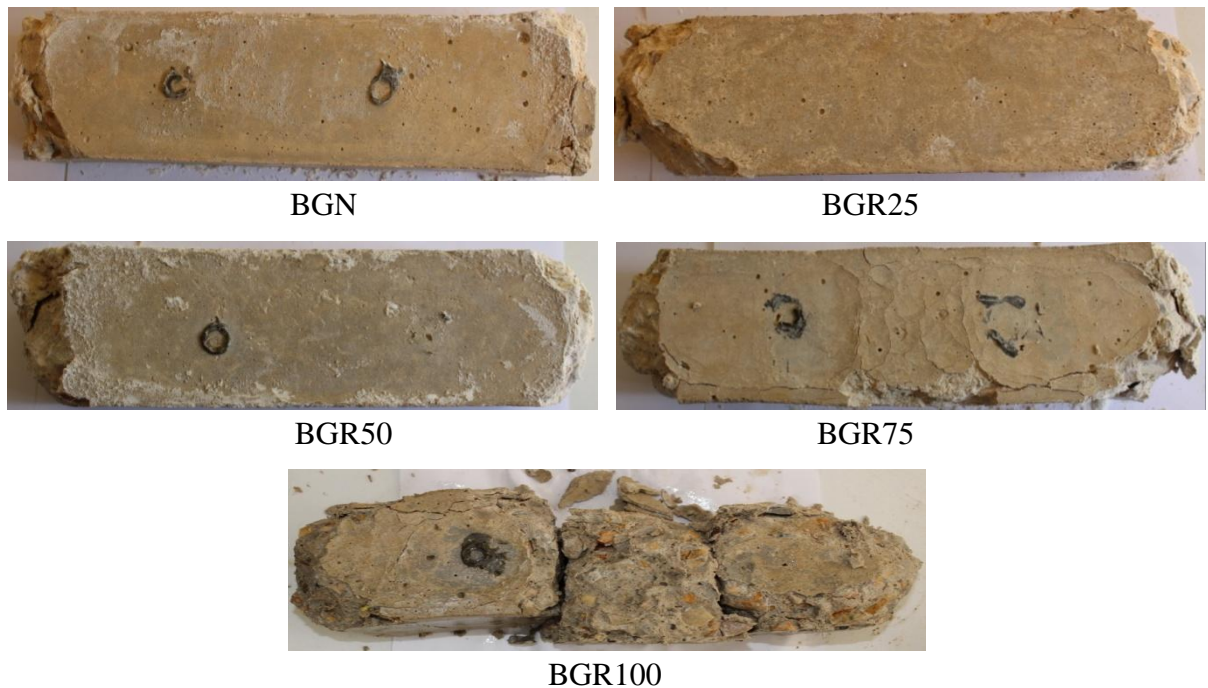


Figure 5. 22. Aspect des éprouvettes après 360 jours d'immersion dans 5 % Na_2SO_4 .

5.4. Conclusion

Les résultats trouvés d'après cette étude expérimentale montrent que l'augmentation du taux de remplacement de gravier naturel par le gravier recyclé dans le béton entraîne une diminution des résistances mécaniques et du module d'élasticité et une augmentation du retrait total du béton sous différentes températures de cure. De plus le béton à base de gravier recyclé est moins durable aux attaques chimiques que le béton à base de gravier naturel. Les résultats ont également montré qu'un béton produit de 25 % de gravier recyclé a présenté des résultats similaires à celle du béton à base de gravier naturel, ce qui indique que ce niveau de remplacement n'a pas un effet négatif sur le béton.

Chapitre 6 :
Simulation numérique du retrait

Chapitre 6 : Simulation numérique du retrait

6.1. Introduction

De nombreuses expériences à caractériser des structures en béton coûteront beaucoup de main d'œuvre de ressources matérielles, de ressources financières et de temps. De là, plusieurs chercheurs scientifiques en génie civil ont proposé et développé des modèles afin d'analyser les structures avant leur réalisation, et d'évaluer l'influence des paramètres internes et externes, comme les propriétés des matériaux utilisés, la charge appliquée, la température et l'humidité relative.

L'objectif principal de cette partie est d'utiliser le concept de maturité et les propriétés thermiques transitoires du béton basées sur le modèle à deux phases en série pour prédire le retrait total. L'analyse numérique et l'estimation de la contrainte thermique, la déformation thermique et le retrait total du béton soumis à une charge thermique (température de cure) sont réalisées en utilisant du logiciel ANSYS[®] basé sur la méthode des éléments finis (MEF).

ANSYS[®] est un logiciel d'éléments finis bien connu qui utilise des méthodes linéaires et non linéaires pour analyser divers problèmes d'ingénierie. Dans notre recherche, le logiciel ANSYS[®] a été utilisé pour évaluer le retrait en tenant compte à la fois des propriétés thermiques et mécaniques du béton. Ces propriétés sont calculées à l'aide du concept de maturité et du modèle série à deux phases.

6.2. Equations du concept de maturité

Le concept de maturité est utilisé pour prendre en compte les effets combinés du temps et de la température de cure sur les propriétés mécaniques et thermiques du béton [236]. L'âge équivalent du béton (t_e) est calculé comme suit [237] :

$$t_e = \sum_0^i \exp \left[\frac{E_a(t)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T^c} \right) \right] \Delta t \quad (6.1)$$

Où $E_a(t)$ est l'énergie d'activation apparente ($J \text{ mol}^{-1}$), R est la constante universelle de gaz égale à $8.314 \text{ (J mol}^{-1} \text{ K)}$ et T^c est la température de cure ($^{\circ}\text{C}$) pendant l'intervalle de temps Δt .

La fonction exponentielle suivante est proposée pour prédire l'énergie d'activation apparente [238] :

$$E_a(t) = E_0 e^{-\omega t} \quad t \geq t_s \quad (6.2)$$

$$E_0 = 44.415 - 124 T^c \quad (6.3)$$

$$\omega = 0.00027 T^c \quad (6.4)$$

Où E_0 est l'énergie d'activation apparente initiale ($J \text{ mol}^{-1}$), t est le temps (jour), ω est une constante représentant le taux de diminution de l'énergie d'activation avec le vieillissement et t_s est l'âge de décoffrage égal à 1 jour.

Le degré d'hydratation $\alpha(t_e)$ est donné comme suit [237] :

$$\alpha(t_e) = \alpha_u (1 - \exp(-\xi t_e)) \quad (6.5)$$

Où α_u est le degré d'hydratation ultime (100 %) et ξ est une constante déterminée expérimentalement.

La température adiabatique du béton $\theta(t_e)$ peut être définie comme [237] :

$$\theta(t_e) = \theta_u (1 - \exp(-\xi t_e)) \quad (6.6)$$

Où θ_u est la température adiabatique ultime du béton ($^{\circ}\text{C}$).

6.3. Propriétés thermiques du béton

La capacité thermique spécifique et la conductivité thermique diminuent proportionnellement avec le degré d'hydratation du ciment, pour le mortier les relations suivantes peuvent être appliquées [237] :

$$c(\alpha) = c_0 (1.15 - 0.15 \alpha) \quad (6.7)$$

$$k(\alpha) = k_0 (1.1 - 0.10 \alpha) \quad (6.8)$$

Où $c(\alpha)$ ($J \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) est la capacité thermique spécifique du mortier au degré d'hydratation α , c_0 ($J \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) est la capacité thermique spécifique du mortier, $k(\alpha)$ ($W \text{ m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) est la conductivité thermique du mortier de ciment au degré d'hydratation α et k_0 ($W \text{ m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) est la conductivité thermique du mortier durci.

Le béton est généralement considéré comme un matériau composite à deux phases constitué du mortier (phase continue) et de graviers (phase discontinue). Sur la base de ce modèle théorique; la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique du béton sont prédites par le modèle à deux phases en série (Figure 6.1) [239]. La capacité thermique spécifique $c_{\text{béton}}$ et la conductivité thermique $k_{\text{béton}}$ du béton sont présentées ci-dessous [240] :

$$c_{\text{béton}} = \frac{1}{\frac{V_m}{c(\alpha)} + \frac{V_g}{c_{ca}}} \quad (6.9)$$

$$k_{\text{béton}} = \frac{1}{\frac{V_m}{k(\alpha)} + \frac{V_g}{k_g}} \quad (6.10)$$

Où V_m est le volume de mortier de ciment, V_g est le volume des graviers, c_g est la capacité thermique spécifique des graviers égale à $790 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ et k_g est la conductivité thermique des graviers.

La conductivité thermique des graviers est calculée comme suit [241] :

$$k_g = 0.293 + 1.01 V_g \quad (6.11)$$

La dilatation thermique du béton (α_c) (°C^{-1}) en fonction du temps t est exprimée comme suit [242] :

$$\alpha_c(t) = \alpha_k (1 + 41 t^{-2}) \quad (6.12)$$

Où α_k est le coefficient de dilatation thermique du béton à 28 jours (°C^{-1}) donné par l'expression suivante [243] :

$$\alpha_k = (0.008 T^c + 6)10^{-6} \quad (6.13)$$

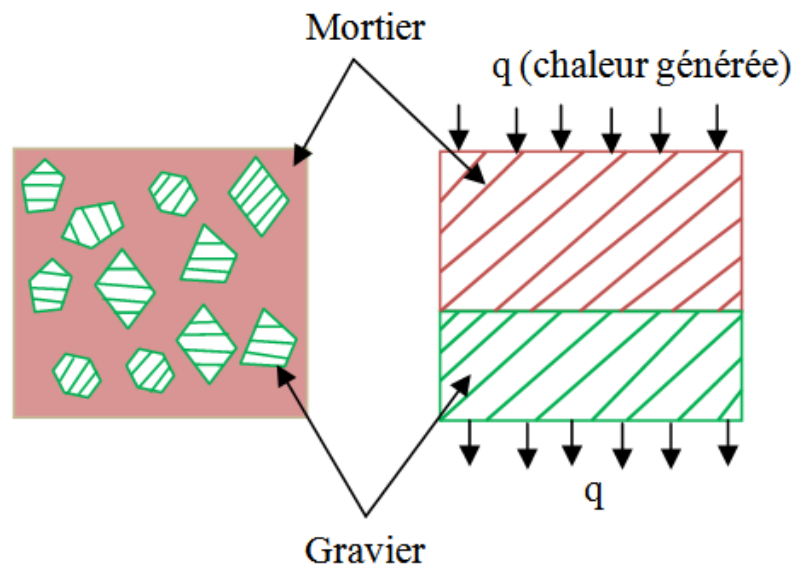


Figure 6. 1. Modèle à deux phase en série [239].

6.4. Propriétés mécaniques du béton

6.4.1. Résistance à la traction

La résistance à la traction $f_t(t_e)$ (MPa) à l'âge équivalent t_e (jour) est calculée par le modèle MC2010 [244] selon la formule suivante :

$$f_t(t_e) = f_{t28} \times \left\{ \exp \left[s \times \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - t_s}} \right) \right] \right\}^{nt} \quad (6.14)$$

Où f_{t28} est la résistance à la traction du béton (MPa) à 28 jours à 20 °C, s dépend du type de ciment, pour un ciment à durcissement rapide s est égal à 0.25; pour un ciment à haute résistance et à durcissement rapide s est égal à 0.2 et nt sont des constantes déterminées expérimentalement.

6.4.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression $f_c(t_e)$ (MPa) est calculée par la relation suivante [245] :

$$f_t(t_e) = 0.395 (f_c(t_e))^{0.55} \quad (6.15)$$

6.4.3. Module de Young

Le module de Young du béton $E_t(t_e)$ (MPa) à l'âge équivalent t_e (jour) est calculé par MC2010 [244] selon la relation suivante :

$$E_t(t_e) = E_{t28} \times \left\{ \exp \left[s \times \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - t_s}} \right) \right] \right\}^{nE} \quad (6.16)$$

Où E_{t28} est le module de Young (MPa) à 28 jours à 20 °C et nE sont des constantes déterminées expérimentalement.

- Le coefficient de Poisson n'a aucune relation avec l'âge de mûrissement du béton. Une valeur de 0.18 a été utilisée [244].

6.5. Conduction de transfert de chaleur

La relation mathématique de la conduction de transfert de chaleur (conduction thermique) est décrite par l'expression suivante [246, 247] :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (6.17)$$

Où ρ est la masse volumique du béton (kg/m^3), c est la capacité thermique spécifique du béton ($\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$), T est la température du béton (°C), k est la conductivité thermique du béton ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$), q est la chaleur générée dans le béton ($\text{J m}^{-3}\text{ s}^{-1}$) et x, y, z sont les coordonnées cartésiennes.

La contrainte thermique σ^t est estimée à l'aide de la formule suivante [246] :

$$\sigma^t = E_t(t_e)\varepsilon_{\text{thermique}} \quad (6.18)$$

Où $\varepsilon_{\text{thermique}}$ est la déformation thermique donnée par la formule suivante:

$$\varepsilon_{\text{thermique}} = \Delta T \alpha_c \quad (6.19)$$

Où α_c est le coefficient de dilatation thermique du béton et ΔT est le gradient thermique non linéaire (°C).

$$\Delta T = T(t) - T_0 \quad (6.20)$$

Où $T(t)$ est la température du béton (°C) au temps t et T_0 est la température initiale du béton (°C).

Le retrait total est la somme du retrait de séchage (dessiccation), du retrait endogène et du retrait thermique. La déformation de retrait totale $\varepsilon_{\text{total}}$ peut être exprimée comme suit [246, 248] :

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{sh}} + \varepsilon_{\text{as}} + \varepsilon_{\text{thermique}} \quad (6.21)$$

Où ε_{sh} est la déformation du retrait de séchage et ε_{as} est la déformation du retrait endogène exprimée comme suit [246] :

$$\varepsilon_{\text{as}}(t, T^c) = \varepsilon_{\text{as}}(t, 20) \left[1 + \frac{0.237}{(t-0.27)^{(T^c-20)/-224.7}} \right] \quad (6.22)$$

$$\varepsilon_{\text{as}}(t, 20) = 2\varepsilon_{\text{as},28} \beta(t) \quad (6.23)$$

$$\varepsilon_{\text{as},28} = -3070 e^{-18.25} \quad (6.24)$$

$$\beta(t) = \exp \left\{ 0.517 \left[1 - \left(\frac{28-0.27}{t-0.27} \right) \right]^{0.415} \right\} \quad (6.25)$$

Où $\varepsilon_{\text{as}}(t, T^c)$ ($\mu\text{m/m}$) est le retrait endogène correspondant à la température de cure T^c et à l'âge t (jours), $\varepsilon_{\text{as}}(t, 20)$ ($\mu\text{m/m}$) est le retrait endogène correspondant à la température 20 °C et à l'âge t (jours), $\varepsilon_{\text{as},28}$ ($\mu\text{m/m}$) est le retrait endogène du béton à 28 jours et $\beta(t)$ est une fonction du retrait endogène à 20 °C qui dépend de l'âge t (jours).

L'expression suivante est utilisée pour calculer le retrait de séchage [246, 249] :

$$\varepsilon_{sh} = -1.2 K_{vs} K_{hs} K_f K_{td} \varepsilon_u \quad (6.26)$$

Où ε_u est la déformation de retrait ultime (prise égale à 4.8 $\mu\text{m/m}$).

Les paramètres K_{hs} , K_f , K_{td} sont calculés comme suit:

$$K_{vs} = 1.45 - 0.13 \left(\frac{v}{s} \right) \quad (6.27)$$

$$K_{hs} = 2 - 0.014 \text{ RH} \quad (6.28)$$

$$K_f = \frac{5}{1+f_{c28}} \quad (6.29)$$

$$K_{td} = \frac{t}{61-4 f_{c28} + t} \quad (6.30)$$

Où $v(\text{cm}^3)$ et $s(\text{cm}^2)$ sont respectivement le volume et la surface de l'éprouvette prismatique du béton, et HR (%) est l'humidité relative externe.

6.6. Analyse par méthodes des éléments finis

Pour prédire la déformation thermique du béton ($\varepsilon_{\text{thermique}}$), on a utilisé le logiciel ANSYS[®] basé sur la méthode des éléments finis. Un élément tétraédrique tridimensionnel (SOLID70) à huit nœuds présentant un seul degré de liberté thermique (température) a été utilisé pour le problème thermique. Ensuite, les distributions des composantes des contraintes thermo-élastiques ont été calculées en commutant l'élément thermique transitoire (SOLID70) à l'élément structural (SOLID65) [246, 250] comme le montre le tableau 6.1 et la figure 6.2.

Tableau 6. 1. Eléments thermique et structural utilisés en simulation numérique.

Élément	Thermique	Structural
Type	SOLID70	SOLID65
Nature	Température	Déplacement UX, UY et UZ
Nombre de nœuds	8	8
Nombre de DDL par nœud	1	3

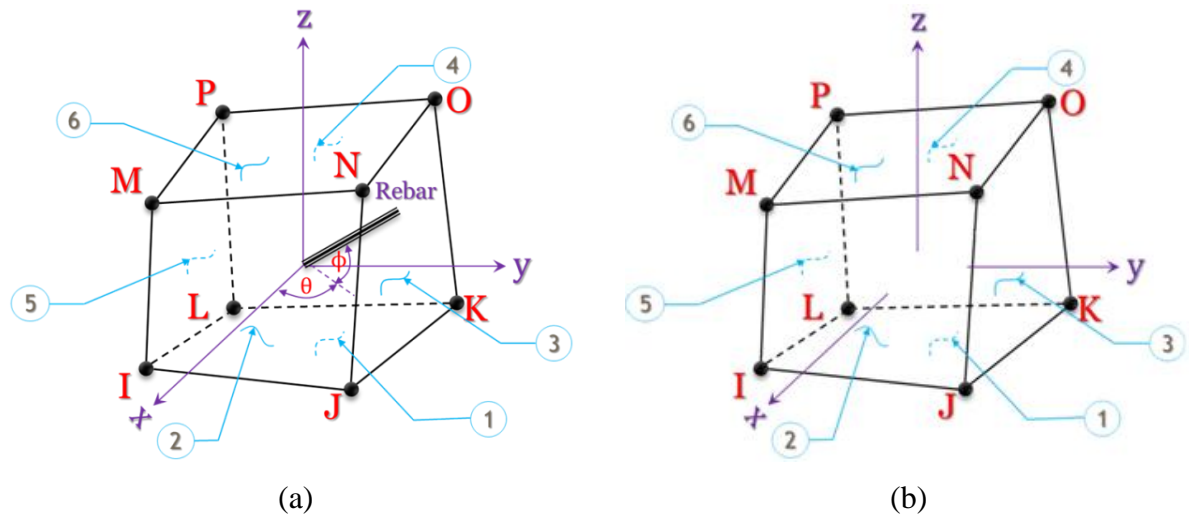


Figure 6. 2. Eléments structuraux et thermiques [246, 250] : (a) SOLID65; (b) SOLID70.

Les propriétés thermiques et mécaniques des bétons utilisées pour valider les modèles numériques sont présentées dans le tableau 6.2.

Tableau 6. 2. Propriétés thermiques et mécaniques des bétons pour la simulation numérique.

Paramètres		Équation		BGN	BGR25	BGR50	BGR75	BGR100
Propriétés thermiques	Masse volumique (kg/m^3)		ρ	2379	2272	2255	2215	2178
	Température adiabatique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Eq. (6.6)	ξ	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
			θ_u	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5
	Capacité thermique spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Eqs. (6.7), (6.9)	c_0	900	900	900	900	900
	Conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Eqs. (6.8), (6.10), (6.11)	k_0	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Coefficient de dilatation thermique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Eqs. (6.12), (6.13)	α_c	variable avec le temps et la température de cure					
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction $f_t(t_c)$	Eq. (6.14)	f_{t28}	4.80	4.00	3.53	3.29	2.89
			s	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
			nt	0.573	0.573	0.573	0.573	0.573
	Résistance à la compression	Eq. (6.15)	f_{c28}	38.5	38.2	31.4	30.7	28.0
	Module de Young $E_t(t_c)$	Eq. (6.16)	E_{t28}	27.49	26.54	24.65	24.31	23.39
			s	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
			nE	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447
Coefficient de cisaillement pour une fissure ouverte *		β_t	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Coefficient de cisaillement pour une fissure fermée *		β_c	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	

* Deux coefficients de cisaillement sont introduits, β_t pour une fissure ouverte et β_c pour une fissure fermée. La valeur de ces coefficients varie de 0 à 1. 1 pour une fissure rugueuse et 0 pour une fissure lisse [246]. Les valeurs utilisées pour β_t et β_c sont respectivement 0.2 et 0.7.

6.6.1. Condition aux limites

Les conditions aux limites de l'analyse thermique transitoire sont modélisées comme le coefficient du film qui permet le transfert de chaleur par convection thermique sur la surface libre (h_{libre}) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), et peut être calculée par l'expression suivante [237, 246] :

$$h_{\text{libre}} = \begin{cases} 5.6 + 3.95 v & (v \leq 5 \text{ m/s}) \\ 7.8 v^{0.78} & (v > 5 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (6.32)$$

Où v est la vitesse du vent (m/s) (prise égale à 1 m/s puisque les éprouvettes sont conservées dans une étuve à vapeur). Pour cette analyse numérique, h_{libre} est prise égale à $9.55 \text{ W m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$.

6.6.2. Résumé du processus de simulation

La figure 6.3(a) montre les conditions aux limites pour l'analyse thermique transitoire et structurale. D'après l'étude expérimentale, les éprouvettes sont munies d'une mince couche de bitume entourée d'une bande adhésive aux deux bouts pour éviter les effets de bord et assurer un milieu sans échange hydrique avec le milieu extérieur, et donc la couche de bitume est modélisée comme une isolation parfaite.

D'autre part, le changement automatique de l'élément thermique (SOLID70) vers l'élément structural (SOLID65) est facilement réalisé dans ANSYS[®] en utilisant la commande "element switch". La température transitoire non linéaire nodale transforme la contrainte thermique (prédite à partir de l'analyse thermique transitoire) en fonction du temps sur la surface 1 (Figure 6.3(b)). Pour les conditions aux limites de l'analyse structurale, la surface 2 est bloquée en déplacement suivant trois directions (verticale et horizontale) sans aucune translation et rotation pour s'assurer que le modèle de la MEF est en état d'équilibre statique.

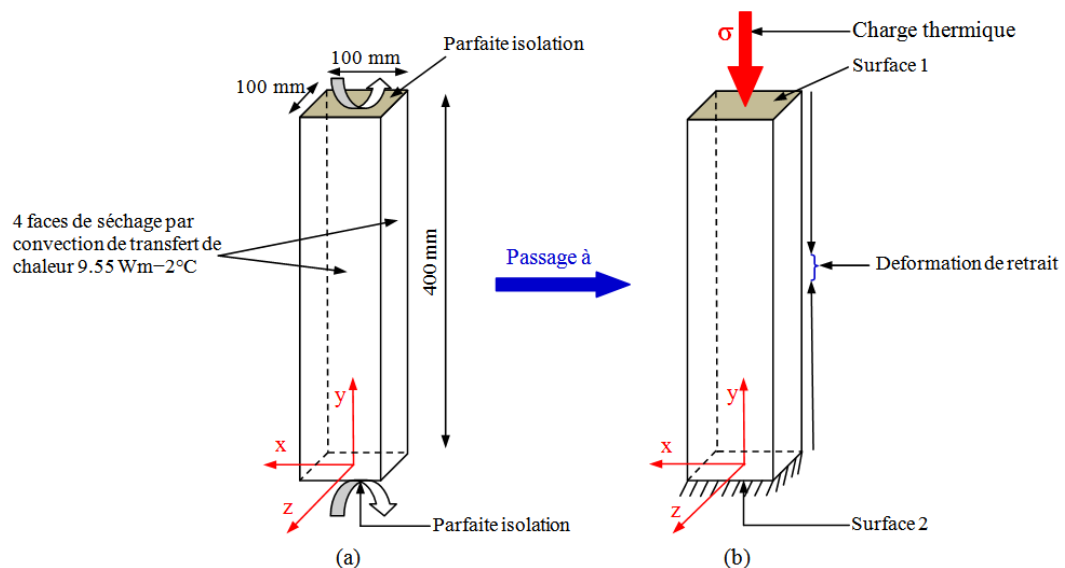


Figure 6. 3. Conditions aux limites (a) Analyse thermique transitoire (b) Analyse structurale.

6.7. Validation du modèle numérique

Dans la simulation numérique, le retrait total du béton est obtenu en deux étapes. Premièrement, une simulation thermique est appliquée pour déterminer le champ de température dans le béton. Deuxièmement, une analyse structurelle statique est effectuée en utilisant les résultats de l'analyse des contraintes thermiques pour déterminer la déformation thermique, puis la déformation totale de retrait. Une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux du retrait total des éprouvettes en BGN et BGR est présentée dans la figure 6.4.

Généralement, on constate une bonne concordance entre les courbes expérimentales et numériques du retrait total pour les différents bétons étudiés, où le coefficient de corrélation R^2 est compris entre 0.870 et 0.983. Au cours des 7 premiers jours, il a été observé que les résultats de la simulation numérique du retrait total sont très proches aux résultats expérimentaux. Par contre, à long terme, les valeurs numériques sont assez proches des valeurs expérimentales. Cette différence peut s'expliquer par le mécanisme d'hydratation et le potentiel des différentes réactions du ciment. Le degré d'hydratation du ciment augmente avec le temps. Cette augmentation conduit au développement de microfissures dans le béton en raison des énergies thermiques produites par différentes réactions chimiques. Lorsque les fissures apparaissent et commencent à se développer, la viscosité du béton diminue, par conséquent, les propriétés mécaniques varient à long terme par rapport aux premières semaines. Mais dans la simulation numérique, la viscosité du béton et l'évolution des paramètres de fissure ne sont pas prises en compte dans les équations 6.14, 6.15 et 6.16 pour la prédiction des propriétés mécaniques.

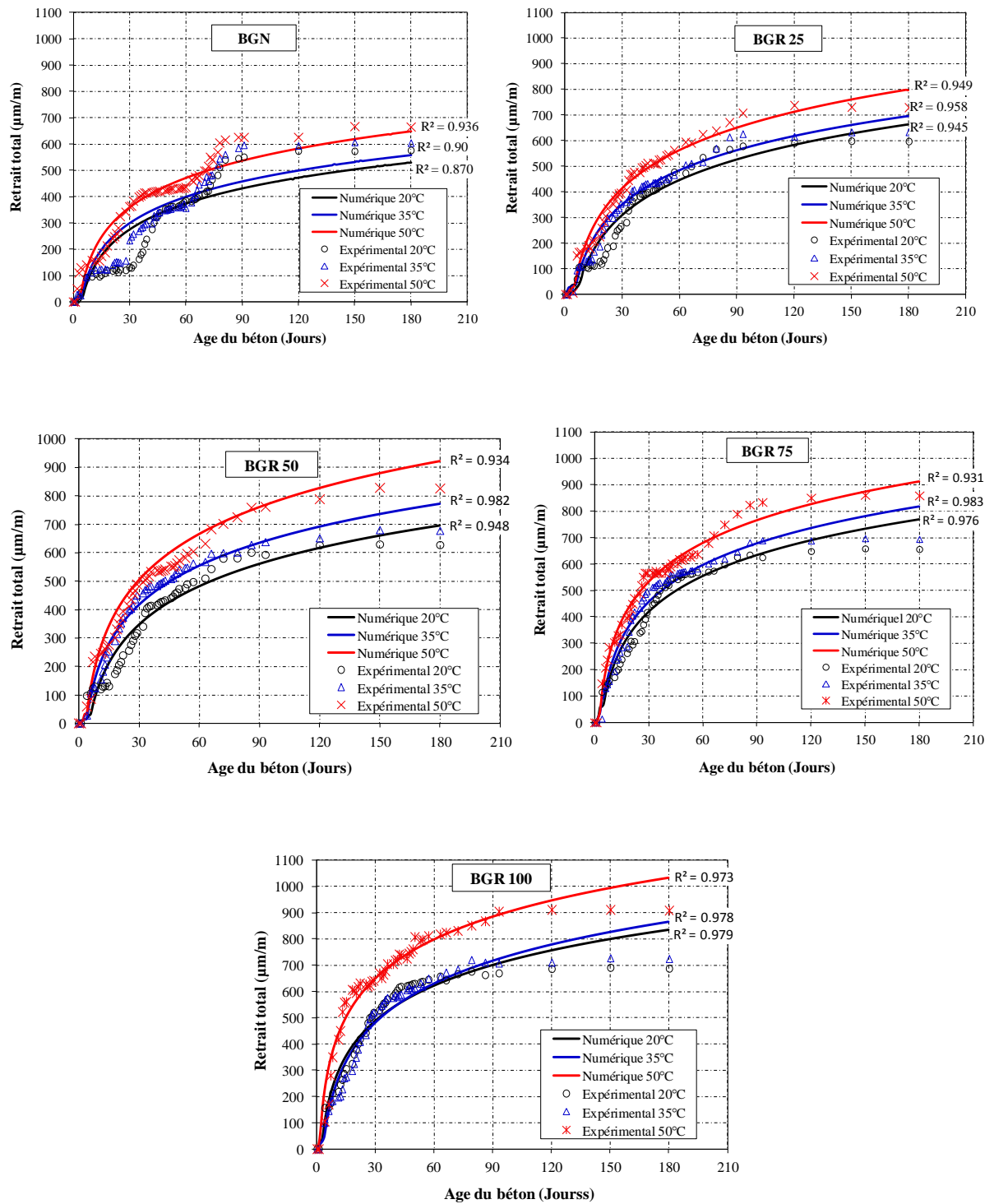


Figure 6. 4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux du retrait total

Les tableaux 6.3, 6.4 et 6.5 présentent une comparaison entre les valeurs du retrait total expérimental et numérique d'éprouvettes de béton à différents âges (3 jours, 7 jours, 1 mois, 3 mois et 6 mois) sous une température de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C. Les résultats montrent que le modèle numérique basé sur la théorie de matériau composite de deux phases en séries avec les paramètres de base associés permet de décrire de façon convenable les déformations du retrait des bétons étudiés soumise à des variations de températures de cure avec un rapport moyen $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{num}}$ compris entre 0.86 et 1.28. L'écart type varie entre 0.04 et 0.23 et le coefficient de variation varie de 3.93 à 26.93 %. Par conséquent, la déformation du retrait total peut être prédite à l'aide du logiciel ANSYS®.

Tableau 6. 3. Valeurs expérimentales et numériques du retrait total des éprouvettes à 20 °C.

	Résultats expérimentaux ε_{exp} ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Résultats numériques ε_{num} ($\mu\text{m}/\text{m}$)					$\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{num}}$				
	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois
BGN	15	92	131	550	576	11	69	276	432	530	1.36	1.33	0.47	1.27	1.08
BGR25	27	105	265	565	597	20	96	307	525	662	1.35	1.09	0.86	1.08	0.9
BGR50	96	122	316	600	627	80	103	340	560	697	1.2	1.18	0.93	1.07	0.9
BGR75	115	146	418	635	657	90	136	419	632	767	1.28	1.07	1.00	1.00	0.85
BGR100	156	174	519	662	787	130	190	490	700	830	1.2	0.92	1.06	0.94	0.95
Moyenne											1.28	1.12	0.86	1.07	0.94
Écart-type											0.08	0.15	0.23	0.12	0.09
Coefficient de variation (%)											6.07	13.50	26.93	11.60	9.39

Tableau 6. 4. Valeurs expérimentales et numériques du retrait total des éprouvettes à 35 °C.

Mélanges	Résultats expérimentaux ε_{exp} ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Résultats numériques ε_{num} ($\mu\text{m}/\text{m}$)					$\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{num}}$				
	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois
BGN	30	93	233	595	604	29	93	299	458	558	1.03	1	0.78	1.30	1.08
BGR25	34	107	353	613	633	30	120	355	590	694	1.13	0.89	0.99	1.06	0.91
BGR50	101	125	449	627	677	96	127	417	635	773	1.05	0.98	1.08	0.99	0.87
BGR75	120	157	496	682	695	119	165	457	679	810	1.01	0.95	1.09	1.00	0.85
BGR100	130	181	525	710	724	134	209	481	716	864	0.97	0.87	1.09	0.99	0.83
Moyenne											1.04	0.94	1.01	1.07	0.91
Écart-type											0.06	0.06	0.13	0.13	0.10
Coefficient de variation (%)											5.72	6.00	13.24	12.45	11.08

Tableau 6. 5. Valeurs expérimentales et numériques du retrait total des éprouvettes à 50 °C.

Mélanges	Résultats expérimentaux ϵ_{exp} ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Résultats numériques ϵ_{num} ($\mu\text{m}/\text{m}$)					$\epsilon_{exp}/\epsilon_{num}$				
	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois	3 mois	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois	3 Jours	7 Jours	1 mois	3 mois	6 mois
BGN	110	141	362	625	665	90	124	359	535	647	1.22	1.13	1.00	1.17	1.03
BGR25	115	157	395	670	729	120	130	412	651	790	0.96	1.21	0.96	1.03	0.92
BGR50	127	216	488	760	826	135	190	504	761	920	0.94	1.14	0.97	1.00	0.89
BGR75	148	238	567	835	860	151	225	533	766	910	0.98	1.06	1.06	1.09	0.94
BGR100	150	296	640	867	908	158	330	649	883	1030	0.95	0.90	0.99	0.98	0.88
Moyenne											1.01	1.09	1.00	1.05	0.93
Écart-type											0.12	0.12	0.04	0.08	0.06
Coefficient de variation (%)											0.11	0.11	0.04	0.07	0.06

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de compléter les études antérieures sur le comportement du béton à base des granulats recyclés. Ces travaux de thèse ont été menés dans le but d'évaluer et de comparer les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons à base des granulats recyclés à celles d'un béton constitué uniquement des granulats naturels.

Pour répondre à cela, on a commencé par la caractérisation des différents granulats utilisés dans les compositions des bétons. Ensuite, on a adopté cinq types de béton incorporant 0%, 25%, 50%, 75 et 100% de gravier recyclé substitué partiellement à la masse du gravier naturel. Les bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un même rapport E/C. A partir des résultats obtenus, on a vérifié l'influence des GR avec différents taux de substitution sur le béton à base des granulats recyclés.

Selon cette étude expérimentale, les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

1. Les granulats recyclés se caractérisent par une absorption plus élevée, une densité plus faible et une résistance à l'abrasion réduite que celle des granulats naturels. Le contenant de la pate existante autour d'un granulats recyclé est la principale cause de la diminution des caractéristiques physiques et mécaniques de ce granulats.
2. A l'état frais, La densité du béton diminue par substitution successive des granulats naturels par les granulats recyclés, en raison de la présence de proportions élevées d'ancien mortier attaché au GR.
3. La densité des bétons à base des granulats recyclés est nettement inférieure à celle du béton à base des granulats naturels avec une diminution de 4.49 %, 5.23 %, 6.91 %, 8.44 % pour 25%, 50%, 75 et 100% de taux de GR, respectivement. Cette diminution est due à la faible densité des GR et à la présence des pores au niveau d'ancien mortier attaché.
4. Une diminution significative de la résistance à la compression et à la traction avec l'augmentation de taux de GR. Le BGR100 affiche une perte de résistance à la compression maximale par rapport à celle BGN d'environ 28 %, 33 %, 27 % et 23 % à 3, 7, 28 et 90 jours, respectivement.

5. Un taux de substitution de 25 % de GN par un GR n'apporte aucun changement significatif par rapport au BGN. Le BGR25 a affiché des valeurs de résistance similaires à celles obtenues par BGN. Au-delà de 50 % de GR, il y a une perte de résistance remarquable.
6. Il est possible de produire un béton avec 100% de GR avec des qualités acceptables. Ainsi, les bétons produits à base de GR doivent être testés avec soin pour s'assurer qu'ils présentent des propriétés mécaniques et de durabilité souhaitables.
7. Une nette diminution du module d'élasticité avec l'augmentation du taux du gravier recyclé. BGR25 fait une réduction du module d'élasticité d'environ 3 % par rapport à celle BGN. BGR50, BGR75 et BGR100 ont produit une diminution de l'ordre de 10 %, 11 % et 15 %, respectivement, en comparaison avec le BGN. ceci serait dû à la faible rigidité du mortier attaché au GR et de faible cohésion entre eux.
8. La vitesse ultrasonique diminue avec le taux des GR. A 28 et 90 jours, le béton à base de granulats naturels a eu des vitesses ultrasoniques de 4115 m/s et 4316 m/s. respectivement. Cependant, la vitesse d'impulsion ultrasonique du BGR100 est réduite de 10.55 % à 28 jours et de 11.01 % à 90 jours par rapport à celle BGN.
9. Le retrait total du béton augmente de manière proportionnelle avec le taux de remplacement du GR. Il convient de noter que les valeurs du retrait total des BGR sont significativement plus élevées à un âge précoce. Au jeune âge, le retrait total du BGR100 a eu une augmentation de 88 %, 94 % et 98 % sous des températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C, respectivement par rapport au BGN. Tandis qu'à 180 jours, la diminution du retrait est de 19 %, 24 % et 36 %, respectivement sous les trois températures de cure.
10. La cinétique de retrait total dépend principalement de la température de durcissement. On constate qu'une température élevée donne un retrait total important et augmente sa vitesse d'évolution. Les éprouvettes de béton qui sont conservés dans les températures de cure de 35 °C et 50 °C donnent un retrait total élevé que celui de 20 °C. au jeune âge la température de cure à un effet plus important qu'à long terme par ce qu'elle a conduit une création des microfissures.
11. Le coefficient d'absorption d'eau du BGR 100 augmente jusqu'à 8 %, soit une différence de 85 % à celle BGN qui affiche une valeur de 4.32 %. à cause de la structure plus poreuse de la pâte attachée au GR en augmentant des pores ouverts dans le béton. Par conséquence, conduit à une capacité d'absorption élevée du GR, qui a créé une pression d'osmose plus élevée dans le béton.

12. Les valeurs de la sorptivité des bétons varient de 3.3134 à 6.3562 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$ à 28 jours d'âge et entre 2.6779 et 5.8455 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$ à 90 jours.
13. L'augmentation du taux des GR provoque une perméabilité à l'eau plus grande. Cette augmentation est justifiée par la capacité d'absorption du GR et de la perméabilité de la matrice de béton.
14. Une perméabilité plus élevés aux ions chlore des bétons à base de graviers recyclés par rapport aux bétons de graviers naturels. Tel que la charge totale transmise des ions chlore augmente avec l'augmentation du taux de remplacement de GR.
15. La perte de masse des échantillons qui sont immergés dans les solutions d'acide augmente avec l'augmentation du pourcentage de gravier recyclé dans le mélange. La perte de masse des éprouvettes exposées dans la solution 3 % H_2SO_4 est plus importante que celui immergés dans 1 % HCl . Cela peut être dû à la porosité plus élevée de GR et qui freine la facilité de pénétration des agents agressifs au béton.
16. Le remplacement de GN par GR résulte en une augmentation d'expansion des bétons immergés dans les solutions sulfatique. Les sulfates de sodium Na_2SO_4 donnent un gain de masse plus élevée que les sulfates de magnésium MgSO_4 à 360 jours.
17. Les résultats numériques montrent que le modèle sériel diphasique pour estimer la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique est approprié pour analyser les propriétés thermiques. De plus, le concept de maturité convient pour prédire les propriétés thermo-mécaniques du béton.
18. Une bonne précision entre les résultats numériques et expérimentaux a été observée pour évaluer le retrait total de tous les bétons de granulats recyclés.

Perspectives

1. Utilisation des GR dans la production des BHP et BAP;
2. Etude du fluage des éléments en béton à base des granulats recyclés;
3. Etude du cisaillement des poutres en béton à base des granulats recyclés;
4. Évaluation de la résistivité électrique et de la perméabilité aux gaz/oxygène du béton à base des granulats recyclés;
5. Etude de la conductivité thermique du béton à base des granulats recyclés;
6. Etude de la résistance au gel-dégel, la corrosion, la carbonatation et l'alcali-réaction du béton à base des granulats recyclés;
7. Effet de la qualité du béton parent des GR, de l'état d'humidité des GR et de la teneur en mortier attaché aux GR sur les propriétés du béton neuf;
8. Effet des méthodes de malaxage existantes et développement de nouvelles techniques de malaxage pour améliorer les performances du béton à base des granulats recyclés et établir une méthode malaxage appropriée pour les BGR.
9. Effet du nombre de cycle de recyclage sur les performances du béton à base des granulats recyclés.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Barcelo L. A path towards more sustainable cement. ACI Fall Convention, Phoenix, USA **2013**. p. 20-24.
- [2] Tam VWY, Soomro M, Evangelista ACJ. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. **2018**;172:272-292.
- [3] Laneyrie C. Valorisation des déchets de chantiers du BTP: Comportement à haute température des bétons des granulats recyclés: Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France; **2014**.
- [4] da Rocha CG, Sattler MA. A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors. *Resources, Conservation and Recycling*. **2009**;54:104-112.
- [5] Fischer C, Werge M, Reichel A. EU as a Recycling Society. *European Topic Centre on Resource Waste Management*. **2009**.
- [6] Oliveira Neto R, 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**;60:277-289.
- [7] Xiao J, Xie H, Zhang C. Investigation on building waste and reclaim in Wenchuan earthquake disaster area. *Resources, Conservation and Recycling*. **2012**;61:109-117.
- [8] Shi J, Xu Y. Estimation and forecasting of concrete debris amount in China. *Resources, Conservation and Recycling*. **2006**;49:147-158.
- [9] Huang W-L, Lin D-H, Chang N-B, Lin K-S. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. *Resources, conservation and recycling*. **2002**;37:23-37.
- [10] De Pauw C. Recyclage des décombres d'une ville sinistrée. *CSTC Revue*. **1982**;4:12-28.
- [11] RILEM. Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*. **1994**;27:557-559.
- [12] JIS A 5021. Recycled aggregate for concrete-class H. Japanese Standards Association. **2005**.
- [13] Le T. Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers: Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai-Université de Lille 1, France; **2015**.

- [14] Tam VWY. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*. **2008**;52:821-828.
- [15] Serifou M. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation: Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France; **2013**.
- [16] 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 concrete research*. **2007**;37:735-742.
- [17] Ayob A, Razali ME, Alias S, Ahmad AG, Ali DSH. Engineering Behavior of Concrete with Recycled Aggregate. *MATEC Web of Conferences*. **2017**;87:01002.
- [18] Eckert M, Oliveira M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. *Construction and Building Materials*. **2017**;133:416-424.
- [19] Yang S, Lee H. Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications. *Construction and Building Materials*. **2017**;136:9-17.
- [20] Hansen TC, Narud H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete international*. **1983**;5:79-83.
- [21] 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**;23:872-877.
- [22] Corinaldesi V, Moriconi G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2009**;23:2869-2876.
- [23] Liu Q, Xiao J, Sun Z. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement and Concrete Research*. **2011**;41:1050-1057.
- [24] Sri Ravindrarajah R, Tam C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of concrete research*. **1985**;37:29-38.
- [25] Hansen T. Recycling of demolished concrete and masonry: CRC Press, London: ; **1992**.
- [26] Nagataki S, Gokce A, Saeki T. Effects of recycled aggregate characteristics on performance parameters of recycled aggregate concrete. *ACI Special Publication*. **2000**;192:53-72.
- [27] 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.
- [28] Abbas A, Fathifazl G, Fournier B, Isgor OB, Zavadil R, Razaqpur AG et al. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. *Materials Characterization*. **2009**;60:716-728.

- [29] Topçu İB, Şengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34:1307-1312.
- [30] Nagataki S, Gokce A, Saeki T, Hisada M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34:965-971.
- [31] Snyder M, Vandenbossche J, Smith K, Wade M. Synthesis on Recycled Concrete Aggregate. Interim Report-Task A. *Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC*. **1994**.
- [32] Li X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. **2008**;53:36-44.
- [33] Yehia S, Farrag S, Abu-Sharkh A, Zaher A, Istaitiyeh H, Helal K. Concrete with recycled aggregate: Evaluation of mechanical properties. *GSTF Journal of Engineering Technology*. **2015**;3.
- [34] Omary S, Ghorbel E, Wardeh G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*. **2016**;108:163-174.
- [35] Verian KP. Using recycled concrete as coarse aggregate in pavement concrete: Thèse de doctorat, Université Purdue, USA; **2012**.
- [36] Li J, Xiao H, Zhou Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2009**;23:1287-1291.
- [37] Wen H, McLean DI, Willoughby K. Evaluation of recycled concrete as aggregates in new concrete pavements. *Transportation Research Record*. **2015**;2508:73-78.
- [38] Yehia S, Abdelfatah A. Examining the variability of recycled concrete aggregate properties. Proceedings of the International Conference on Civil, Architecture and Sustainable Development (CASD-2016), London, UK **2016**. p. 1-2.
- [39] Kurda R, de Brito J, Silvestre JD. Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. *Cement and Concrete Composites*. **2017**;84:198-213.
- [40] Thomas C, Setién J, Polanco JA, Alaejos P, Sánchez de Juan M. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2013**;40:1054-1065.
- [41] Debieb F, Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. **2008**;22:886-893.
- [42] Somna R, Jaturapitakkul C, Amde AM. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. **2012**;34:848-854.

- [43] Ait Mohamed Amer A, Ezziane K, Bougara A, Adjoudj MH. Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **2016**;123:300-308.
- [44] Hansen TC. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and structures*. **1986**;19:201-246.
- [45] Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. **2001**;31:707-712.
- [46] Shayan A, Xu A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. *ACI Materials Journal*. **2003**;100:371-380.
- [47] Le T, Rémond S, Le Saout G, Garcia-Diaz E. Fresh behavior of mortar based on recycled sand – Influence of moisture condition. *Construction and Building Materials*. **2016**;106:35-42.
- [48] McNeil K, Kang TH-K. Recycled concrete aggregates: A review. *International journal of concrete structures and materials*. **2013**;7:61-69.
- [49] Etxeberria Larrañaga M. Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete: Thèse de doctorat, Université Polytechnique de Catalunya, Espagne; **2004**.
- [50] Tu T-Y, Chen Y-Y, Hwang C-L. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*. **2006**;36:943-950.
- [51] 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**;136:386-393.
- [52] Gutiérrez A. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures: RILEM Publications; **2004**. p. 545-553.
- [53] Limbachiya M, Leelawat T, Dhir R. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and structures*. **2000**;33:574.
- [54] Debieb F. Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates: Thèse de doctorat, USTHB, Alger; **2007**.
- [55] Evangelista L, de Brito J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. **2007**;29:397-401.
- [56] Rahal K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*. **2007**;42:407-415.

- [57] Keun-Hyeok Yang H-SC, Ashraf FA. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*. **2008**;105:289-296.
- [58] Braymand S, Francois P, Grondin A, Feugeas F, Fond C. Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons. 30^e Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie **2012**.
- [59] Kenai S, Debieb F. Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés. *Materials and Structures*. **2011**;44:815-824.
- [60] Padmini AK, Ramamurthy K, Mathews MS. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2009**;23:829-836.
- [61] Mulder E, Blaakmeer J, Nijland T, Tamboer L. A closed material cycle for concrete, as part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D waste. Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9–11 September 2002: Thomas Telford Publishing; **2002**. p. 555-562.
- [62] Debieb F, Courard L, Kenai S, Degeimbre R. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2009**;23:3382-3387.
- [63] Omrane M, Kenai S, Kadri E-H, Aït-Mokhtar A. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*. **2017**;165:415-430.
- [64] Gesoglu M, Güneyisi E, Öz HÖ, Taha I, Yasemin MT. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2015**;98:334-344.
- [65] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Herrador MF, Seara-Paz S. Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate. *Construction and Building Materials*. **2012**;28:111-116.
- [66] 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**;33:637-643.
- [67] 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**;33:286-291.
- [68] Ait Mohamed Amer A. Valorisation des matériaux de démolition dans la construction: Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie; **2017**.

- [69] Tam VWY, Gao XF, Tam CM, Chan CH. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2008**;22:364-369.
- [70] Djerbi Tegguer A. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*. **2012**;27:112-116.
- [71] Bendimerad AZ, Roziere E, Loukili A. Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates. *Materials and Structures*. **2015**;48:3557-3569.
- [72] Xiao J, Li J, Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*. **2005**;35:1187-1194.
- [73] Lotfi S, Deja J, Rem P, Mróz R, van Roekel E, van der Stelt H. Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*. **2014**;87:117-125.
- [74] Meftteh H, Kebaïli O, Oucief H, Berredjem L, Arabi N. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2013**;54:282-288.
- [75] Lavado J, Bogas J, de Brito J, Hawreen A. Fresh properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2020**;233:117322.
- [76] Agrela F, Sánchez de Juan M, Ayuso J, Geraldés VL, Jiménez JR. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*. **2011**;25:3950-3955.
- [77] 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**;33:788-795.
- [78] Mas B, Cladera A, Bestard J, Muntaner D, López CE, Piña S et al. Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. *Construction and Building Materials*. **2012**;34:430-441.
- [79] 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**;63:617-627.
- [80] Nealen A, Schenk S. The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties. Darmstadt Concrete 13. *Annual Journal*. **1998**.
- [81] Brand AS, Roesler JR, Salas A. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2015**;79:83-89.

- [82] Tam VWY, Gao XF, Tam CM. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*. **2005**;35:1195-1203.
- [83] Abd Elhakam A, Mohamed AE, Awad E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. **2012**;35:421-427.
- [84] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*. **2018**;178:19-31.
- [85] Leite MB, Figueire do Filho JGL, Lima PRL. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. *Materials and Structures*. **2013**;46:1765-1778.
- [86] Faleschini F, Jiménez C, Barra M, Aponte D, Vázquez E, Pellegrino C. Rheology of fresh concretes with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2014**;73:407-416.
- [87] Gómez-Soberón JMV. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*. **2002**;32:1301-1311.
- [88] Dong JF, Wang QY, Guan ZW. Structural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP. *Engineering Structures*. **2013**;48:532-542.
- [89] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, Ignjatović I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*. **2010**;30:2255-2264.
- [90] Kong D, Lei T, Zheng J, Ma C, Jiang J, Jiang J. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2010**;24:701-708.
- [91] Zhang L, Zhang Y, Liu C, Liu L, Tang K. Study on microstructure and bond strength of interfacial transition zone between cement paste and high-performance lightweight aggregates prepared from ferrochromium slag. *Construction and Building Materials*. **2017**;142:31-41.
- [92] Verian KP, Ashraf W, Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*. **2018**;133:30-49.
- [93] Huoth P, Suntharavadivel T, Duan K. Effect of silica fume on recycled aggregate concrete. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. Southern Cross University, Lismore, Australia **2014**. p. 249-254.

- [94] Tam VWY, Tam CM. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Construction and Building Materials*. **2008**;22:2068-2077.
- [95] Kou S-C, Poon C-S. Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*. **2008**;60:57-64.
- [96] Kurad R, Silvestre JD, de Brito J, Ahmed H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2017**;166:485-502.
- [97] Poon CS, Shui ZH, Lam L, Fok H, Kou SC. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34:31-36.
- [98] Yang K-H, Chung H-S, Ashour AF. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Materials Journal*. **2008**;105:289–296.
- [99] Huda SB, Alam MS. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2014**;65:574-582.
- [100] Kurda R, de Brito J, Silvestre JD. Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios. *Magazine of Concrete Research*. **2018**;70:204-216.
- [101] Folino P, Xargay H. Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. *Construction and Building Materials*. **2014**;56:21-31.
- [102] Yang J, Du Q, Bao Y. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*. **2011**;25:1935-1945.
- [103] de Brito J, Pereira AS, Correia JR. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*. **2005**;27:429-433.
- [104] Correia JR, de Brito J, Pereira AS. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*. **2006**;39:169-177.
- [105] Cachim PB. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2009**;23:1292-1297.
- [106] Khalaf FM. Using Crushed Clay Brick as Coarse Aggregate in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **2006**;18:518-526.
- [107] Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*. **2003**;33:703-711.

- [108] 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**;25:1783-1794.
- [109] Kwan WH, Ramli M, Kam KJ, Sulieman MZ. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*. **2012**;26:565-573.
- [110] McGinnis MJ, Davis M, de la Rosa A, Weldon BD, Kurama YC. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **2017**;154:258-269.
- [111] Pedro D, De Brito J, Evangelista L. Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry. *Journal of Cleaner Production*. **2017**;164:939-949.
- [112] Beltrán MG, Barbudo A, Agrela F, Galvín AP, Jiménez JR. Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths. *Journal of cleaner production*. **2014**;79:124-133.
- [113] Parthiban K, Saravana Raja Mohan K. Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*. **2017**;133:65-72.
- [114] de Oliveira MB, Vazquez E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*. **1996**;16:113-117.
- [115] 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**;19:709-717.
- [116] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2016**;112:2171-2186.
- [117] Chen H-J, Yen T, Chen K-H. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*. **2003**;33:125-132.
- [118] Akhtaruzzaman AA, Hasnat A. Properties of concrete using crushed brick as aggregate. *Concrete International*. **1983**;5:58-63.
- [119] Alves AV, Vieira TF, de Brito J, Correia JR. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*. **2014**;64:103-113.

- [120] 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**;141:248-255.
- [121] Tavakoli M, Soroushian P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *ACI Materials Journal*. **1996**;93:178-181.
- [122] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. **2002**;24:269-279.
- [123] 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.
- [124] Pedro D, de Brito J, Evangelista L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*. **2014**;71:141-151.
- [125] Corinaldesi V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. **2010**;24:1616-1620.
- [126] Afroughsabet V, Biolzi L, Ozbakkaloglu T. Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. *Composite Structures*. **2017**;181:273-284.
- [127] Khatib JM. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*. **2005**;35:763-769.
- [128] ACI 555R-01. Removal and Reuse of Hardened Concrete-ACI 555R-01. ACI manual of concrete practice, part 6 Farmington Hills, MI: American Concrete Institute **2001**. p. 26.
- [129] Fan C-C, Huang R, Hwang H, Chao S-J. The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar. *Materials*. **2015**;8:2658-2672.
- [130] Domingo-Cabo A, Lázaro C, López-Gayarre F, Serrano-López MA, Serna P, Castaño-Tabares JO. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2009**;23:2545-2553.
- [131] Xiao J, Fan Y, Tam VWY. On creep characteristics of cement paste, mortar and recycled aggregate concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. **2015**;19:1234-1252.
- [132] Anderson KW, Uhlmeier JS, Russell MA. Use of recycled concrete aggregate in PCCP: literature search. In: Research Report WA-RD 726.1. Olympia WWSDoTW, **2009**. p. 37.
- [133] Tam VWY, Tam CM. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*. **2007**;42:3592-3602.

- [134] Kou SC, Poon CS. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*. **2012**;35:69-76.
- [135] Shaikh FUA. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*. **2016**;5:277-287.
- [136] Kapoor K, Singh SP, Singh B. Water Permeation Properties of Self Compacting Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. *International Journal of Civil Engineering*. **2018**;16:47-56.
- [137] Xiao J, Lei B, Zhang C. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Science China Technological Sciences*. **2012**;55:2609-2616.
- [138] Levy SM, Helene P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34:1975-1980.
- [139] Sun H, Wang P, Sun J. Study on the gas anti permeability and carbonation resistance of recycled concrete. *Journal of Building Materials*. **2006**;9:91-96.
- [140] Lei B, XIAO J-z. Research on carbonation resistance of recycled aggregate concrete. *Journal of Building Materials*. **2008**;11:605-611.
- [141] Ryu JS. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. **2002**;54:7-12.
- [142] Eguchi K, Teranishi K, Nakagome A, Kishimoto H, Shinozaki K, Narikawa M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*. **2007**;21:1542-1551.
- [143] 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**;15:443-451.
- [144] Vázquez E, Barra M, Aponte D, Jiménez C, Valls S. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials*. **2014**;67:61-67.
- [145] Kapoor K, Singh SP, Singh B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. **2016**;128:67-76.
- [146] Andal J, Shehata M, Zacarias P. Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. *Construction and Building Materials*. **2016**;125:842-855.
- [147] Leng F, Feng N, Lu X. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*. **2000**;30:989-992.

- [148] Salem RM, Burdette EG, Jackson NM. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete. *ACI Materials Journal*. **2003**;100:216-221.
- [149] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, Hisada M. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34:799-806.
- [150] Haitao Y, Shizhu T. Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas. *Materiales de Construcción*. **2015**;65:050.
- [151] Yildirim ST, Meyer C, Herfellner S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **2015**;91:288-296.
- [152] Bogas JA, de Brito J, Ramos D. Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*. **2016**;115:294-306.
- [153] Fernández-Ledesma E, Jiménez J, Ayuso J, Corinaldesi V, Iglesias-Godino F. A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*. **2016**;66:075.
- [154] Alnahhal MF, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Alsubari B, Alqedra MA, Mo KH. Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*. **2018**;163:482-495.
- [155] Rao KJ, Keerthi K, Vasam S. Acid resistance of quaternary blended recycled aggregate concrete. *Case Studies in Construction Materials*. **2018**;8:423-433.
- [156] ACI 234R. Guide for the use of silica fume in concrete. **2006**.
- [157] Çakır Ö, Sofyanlı ÖÖ. Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. *HBRC Journal*. **2015**;11:157-166.
- [158] Dilbas H, Şimşek M, Çakır Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Construction and Building Materials*. **2014**;61:50-59.
- [159] Khodabakhshian A, Ghalehnovi M, de Brito J, Asadi Shamsabadi E. Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*. **2018**;170:42-60.
- [160] 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.

- [161] Zaitri R, Bederina M, Dif F, Guetaf Y. Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés. 33èmes Rencontres de l'AUGC. ISABTP/UPPA, Anglet **2015**.
- [162] Larbi J, Heijnen W, Brouwer J, Mulder E. Preliminary laboratory investigation of thermal treated recycled concrete aggregate for general use in concrete. in G R Wooley and G Wainwright Waste Materials in Construction-WASCON, Pergamon, England **2000**. p. 129-139.
- [163] Mandal S, Chakraborty S, Gupta A. Some studies on durability of recycled aggregate concrete. *Indian Concrete Journal*. **2002**;76:385-388.
- [164] Poon C, Kou S, Lam L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*. **2002**;16:281-289.
- [165] Ann KY, Moon H, Kim Y, Ryou J. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste management*. **2008**;28:993-999.
- [166] Buyle-Bodin F, Hadjieva-Zaharieva R. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*. **2002**;35:504-509.
- [167] Leite MB, Monteiro PJM. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. *Cement and Concrete Research*. **2016**;81:38-48.
- [168] Le T, Le Saout G, Garcia-Diaz E, Betrancourt D, Rémond S. Hardened behavior of mortar based on recycled aggregate: Influence of saturation state at macro- and microscopic scales. *Construction and Building Materials*. **2017**;141:479-490.
- [169] Liang Y-c, Ye Z-m, Vernerey F, Xi Y. Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **2015**;27:04014163.
- [170] Zhong W, Yao W. Influence of damage degree on self-healing of concrete. *Construction and Building Materials*. **2008**;22:1137-1142.
- [171] Granger S, Loukili A, Pijaudier-Cabot G, Chanvillard G. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research*. **2007**;37:519-527.
- [172] Qian S, Zhou J, de Rooij MR, Schlangen E, Ye G, van Breugel K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement and Concrete Composites*. **2009**;31:613-621.
- [173] Şahmaran M, Keskin SB, Ozerkan G, Yaman IO. Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites*. **2008**;30:872-879.

- [174] Gao D, Zhang L, Nokken M. Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear. *Cement and Concrete Composites*. **2017**;79:1-8.
- [175] Bordelon A, Cervantes V, Roesler JR. Fracture properties of concrete containing recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research*. **2009**;61:665-670.
- [176] Médevielle M. Utilisation de la bioprécipitation de carbonates de calcium pour améliorer la qualité de granulats de béton recyclé: Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, France; **2017**.
- [177] Tam VWY, Butera A, Le KN, Li W. Utilising CO₂ technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*. **2020**;250:118903.
- [178] Liang C, Pan B, Ma Z, He Z, Duan Z. Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. **2020**;105:103446.
- [179] Shi C, Wu Z, Cao Z, Ling TC, Zheng J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*. **2018**;86:130-138.
- [180] Singh S, Singh N. Reviewing the carbonation resistance of concrete. *Journal of Materials and Engineering Structures*. **2016**;3:35-57.
- [181] Kashef-Haghighi S, Shao Y, Ghoshal S. Mathematical modeling of CO₂ uptake by concrete during accelerated carbonation curing. *Cement and Concrete Research*. **2015**;67:1-10.
- [182] Grabiec AM, Klama J, Zawal D, Krupa D. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. *Construction and Building Materials*. **2012**;34:145-150.
- [183] Qiu J, Tng DQS, Yang E-H. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*. **2014**;57:144-150.
- [184] Wang J, Vandevyvere B, Vanhessche S, Schoon J, Boon N, De Belie N. Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*. **2017**;156:355-366.
- [185] Wu C-R, Zhu Y-G, Zhang X-T, Kou S-C. Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. *Cement and Concrete Composites*. **2018**;94:248-254.
- [186] Wang Y, Jin Z, Liu S, Yang L, Luo S. Physical filling effect of aggregate micro fines in cement concrete. *Construction and Building Materials*. **2013**;41:812-814.
- [187] De Weerd K, Haha MB, Le Saout G, Kjellsen KO, Justnes H, Lothenbach B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*. **2011**;41:279-291.

- [188] Andreu G, Miren E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. **2014**;52:227-235.
- [189] 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**;44:101-109.
- [190] NF EN 12350-6. Essais pour béton frais - Partie 6: masse volumique. AFNOR; **2012**.
- [191] NF EN 12350-2. Essais pour béton frais - Partie 2 : Essai d'affaissement. AFNOR; **2012**.
- [192] NF EN 12390-7. Essai pour béton durci - Partie 7 : Masse volumique du béton. AFNOR; **2001**.
- [193] NF EN 12390-3. Essais pour béton durci - Part 3 : Résistance à la compression des éprouvettes. AFNOR; **2003**.
- [194] NF EN 12390-5. Essai pour béton durci - Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes. AFNOR; **2001**.
- [195] ASTM C469. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. ASTM International, West Conshohocken, PA **2014**.
- [196] NF EN 12504-4. Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son. AFNOR; **2005**.
- [197] 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**;114:40-48.
- [198] ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. **2006**.
- [199] ASTM C1585. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International, West Conshohocken, PA **2011**.
- [200] NF EN 12390-8. Essais pour béton durci - Partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression. AFNOR; **2001**.
- [201] DIN 1048. Testing method for concrete – determination of the depth of penetration of water under pressure. **2000**.
- [202] Shi C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*. **2004**;34:537-545.
- [203] ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration electrical conductance. **2012**.

- [204] ASTM C1012. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution sulfate resistance. **2013**.
- [205] ASTM-C267. Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, monolithic surfacings, and polymer concretes, ASTM International **2012**.
- [206] González-Taboada I, González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Seara-Paz S. Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. **2017**;157:18-25.
- [207] Alnahhal W, Aljidda O. Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. **2018**;169:165-178.
- [208] Le T. Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers. Univesité Lille 1, France **2015**.
- [209] Marmash BE, Elliott KS. The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete. In: Woolley GR, Goumans JJM, Wainwright PJ, editors. Waste Management Series: Elsevier **2000**. p. 769-781.
- [210] Neville AM. Properties of concrete. Wiley ed: Fourth and Final Edition **1981**.
- [211] Fan C-C, Huang R, Hwang H, Chao S-J. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*. **2016**;112:708-715.
- [212] 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**;168:818-830.
- [213] Wang Q, Geng Y, Wang Y, Zhang H. Drying shrinkage model for recycled aggregate concrete accounting for the influence of parent concrete. *Engineering Structures*. **2020**;202:109888.
- [214] Turcry P, Loukili A, Barcelo L, Casabonne JM. Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age? *Cement and Concrete Research*. **2002**;32:1443-1450.
- [215] Mehta PK, Monteiro PJM. Concrete, Microstructure, Properties and Materials. McGraw-HillISBN ed: fourth Edition **2013**.
- [216] Kisku N, Joshi H, Ansari M, Panda SK, Nayak S, Dutta SC. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*. **2017**;131:721-740.

- [217] Debieb F, Courard L, Kenai S, Degeimbre R. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*. **2010**;32:421-426.
- [218] 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**;25:742-748.
- [219] Bravo M, de Brito J, Pontes J, Evangelista L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*. **2015**;77:357-369.
- [220] García-González J, Rodríguez-Robles D, Juan-Valdes A, Pozo J, Guerra-Romero M. Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture. *Materials*. **2014**;7:6224-6236.
- [221] Haddad K. Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages: Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie; **2018**.
- [222] Wirquin E, Zaharieva R, Buyle-Bodin F. Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete - application to recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*. **2000**;33:403-408.
- [223] Amorim Júnior N, Silva GAO, Ribeiro D. Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*. **2017**;161:723-730.
- [224] Vieira T, Alves A, de Brito J, Correia JR, Silva RV. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. *Materials & Design*. **2016**;90:767-776.
- [225] Leung HY, Kim J, Nadeem A, Jayaprakash J, Parvez A. Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*. **2016**;113:369-375.
- [226] Alexandridou C, Angelopoulos GN, Coutelieris FA. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. *Journal of Cleaner Production*. **2018**;176:745-757.
- [227] Hall C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of concrete research*. **1989**;41:51-61.

- [228] Pedro D, Guedes M, de Brito J, Evangelista L. Microstructural Features of Recycled Aggregate Concrete: From Non-Structural to High-Performance Concrete. *Microscopy and Microanalysis*. **2019**;25:601-616.
- [229] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*. **2006**;58:683-690.
- [230] Yue P, Tan Z, Guo Z. Microstructure and Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete in Seawater Environment. *The Scientific World Journal*. **2013**;2013:306714.
- [231] Gomes M, de Brito J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Materials and Structures*. **2009**;42:663-675.
- [232] Titi HH, Tabatabai H. Effect of coarse aggregate type on chloride ion penetration in concrete. *Construction and Building Materials*. **2018**;162:871-880.
- [233] Goyal S, Kumar M, Sidhu DS, Bhattacharjee B. Resistance of mineral admixture concrete to acid attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*. **2009**;7:273-283.
- [234] Chang Z-T, Song X-J, Munn R, Marosszeky M. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research*. **2005**;35:1486-1494.
- [235] Tangchirapat W, Khamklai S, Jaturapitakkul C. Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates. *Materials & Design*. **2012**;41:150-157.
- [236] ASTM C1074. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM International, West Conshohocken, PA **2019**. p. 1074-1093.
- [237] 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**;105:171-186.
- [238] Chu I, Kwon SH, Amin MN, Kim J-K. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model. *Construction and Building Materials*. **2012**;35:171-182.
- [239] Liu K, Lu L, Wang F, Liang W. Theoretical and experimental study on multi-phase model of thermal conductivity for fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. **2017**;148:465-475.
- [240] 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.
- [241] Kim K-H, Jeon S-E, Kim J-K, Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. **2003**;33:363-371.

- [242] 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**;99:260-271.
- [243] Balaji A, Muhamed Luquman K, Nagarajanb P, Pillai T. Prediction of response of reinforced concrete frames exposed to fire. *Advances in Computational Design*. **2016**;1:105-117.
- [244] MC2010. fib Model Code for Concrete Structures. Ernst & Sohn publishing company, Lausanne, Switzerland **2013**.
- [245] Tazawa E, Miyazawa S. Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete. In: Tazawa iE, editor. Proc Int Workshop, Autogenous shrinkage of concrete. Hiroshima, Japan, E & FN Spon **1998**. p. 269-280.
- [246] Bouziadi F, Boulekbache B, Haddi A, Djelal C, Hamrat M. Numerical analysis of *Construction and Building Materials*. **2018**;181:381-393.
- [247] Dahmani L. Thermomechanical response of LNG concrete tank to cryogenic temperatures. *Strength of Materials*. **2011**;43:526-531.
- [248] Shen D, Jiang J, Wang W, Shen J, Jiang G. Tensile creep and cracking resistance of concrete with different water-to-cement ratios at early age. *Construction and Building Materials*. **2017**;146:410-418.
- [249] Mohammadi T, Wan B, Foley CM. The role of shrinkage strains causing early-age cracking in cast-in-place concrete bridge decks. **2015**.
- [250] ANSYS. Release 15.0 Mechanical User's Guide. **2013**.