

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Ben Bouali – Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف
كلية الهندسة المدنية و المعمارية
قسم الهندسة المدنية

Laboratoire Géomatériaux مخبر هندسة المواد



THESE



Présentée par:

AIT MOHAMED AMER Adem

Pour obtention du diplôme de :

DOCTORAT 3^{ème} Cycle (LMD)

Spécialité : Génie Civil

Option : Géomatériaux

Thème

***Valorisation des matériaux de démolition
dans la construction***

Soutenue publiquement le : **16/02/2017**

Devant le jury composé de :

KASSOUL Amar	Professeur	UHB Chlef	Président
BOUKENDAKJI Otman	Professeur	UAT Médéa	Examineur
DEBIEB Farid	Professeur	UAT Médéa	Examineur
EZZIANE Karim	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
BOUGARA Abdelkader	Professeur	UHB Chlef	Co-Rapporteur



De droite à gauche :

*Pr BOUKENDAKJI Otman, Pr Ezziane Karim, AIT MOHAMED AMER Adem,
Pr KASSOUL Amar, Pr DEBIEB Farid, Pr BOUGARA Abdelkader.*

Remerciements

D'abord louange à Allah qui nous a donné le courage et la patience afin de terminer ce travail. J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse monsieur le professeur Ezziane Karim pour, ses précieux conseils, ses interventions et l'intérêt qu'il a porté à ce travail de m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, je tiens également à le remercier de sa gentillesse et sa grande disponibilité. Le partage de l'ensemble de ses connaissances m'a toujours permis de travailler dans les meilleures conditions.

Mes vifs remerciements s'adressent à monsieur Bougara Abdelkader, mon co-directeur de thèse et professeur à l'université de CHLEF, et monsieur : Adjoudj M'hamed, maître de conférence à l'université de Tessemsilt, de m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, je tiens également à les remercier de leur gentillesse et leur grande disponibilité et l'intérêt qu'ils alloué ont à ce travail.

Je remercie vivement Monsieur BOUKENDAKJI Otman, et monsieur DEBIEB Farid; Professeurs à l'Université de Médéa, pour avoir accepté de examiner ce travail et consacré une partie de leurs temps si précieux. De même, j'adresse mes remerciements à Monsieur KASSOUL Amar ; Professeur à la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de Chlef, pour avoir accepté de présider le membre du jury. A cette occasion, j'exprime à tous les membres du jury toute ma gratitude pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de ce travail et pour leurs appréciations.

Je tiens à remercier monsieur Ghrici Mohammed, directeur du laboratoire de Géomatériaux de l'université de Chlef (LaG) pour ses précieux conseils tout au long de notre formation. J'adresse mes remerciements aux responsables de laboratoire de génie civil et de l'hydraulique, surtout à monsieur Wali Fouad, pour leurs disponibilités durant la campagne expérimentale de cette étude. Je voudrais également remercier tous les membres et responsables du laboratoire Géomatériaux, et tous ma promo de doctorat.

J'adresse également mes vifs remerciements à ma famille et surtout ma mère (que dieu la protège) et mes frères Nabil et Anissa et leurs enfants et toute la famille Ait Hamouda. Je dédie ce travail à une personne qui vaut chère, et qui me soutient dans toutes les épreuves de ma vie, merci ma chère femme Amel et toute sa famille.

A.AIT MOHAMED AMER

Résumé

Ce travail vise à déterminer l'influence des granulats de béton recyclé (GBR) pré-saturé et à l'état sec sur les propriétés mécaniques, rhéologiques, et le retrait de séchage du béton. Pour tous les mélanges de béton, des gros granulats ordinaires (GGO) sont partiellement substitués avec les GBR et une quantité de superplastifiant a été ajoutée pour garder la même ouvrabilité. Les résultats trouvés montrent que le béton avec des GBR secs requis un grand dosage de superplastifiant et atteint la plus grande résistance à la compression et les plus grandes valeurs de paramètres rhéologiques. Cependant, pour le béton avec des GBR pré-saturés, le dosage en superplastifiant est réduit et la résistance à la compression et les paramètres rhéologiques sont diminués. L'utilisation de granulats pré-saturée garde le dosage de superplastifiant adéquat et donne les meilleurs paramètres rhéologiques. Des relations mathématiques sont proposées pour exprimer la variation des propriétés mécaniques et des paramètres rhéologiques en fonction de la composition de béton avec des coefficients de corrélation satisfaisants.

Mots clés : Résistance à la compression, pré-saturation, Granulats de béton recyclé, propriété rhéologique, Ouvrabilité, Superplastifiant, Viscosité plastique, Seuil de cisaillement.

Abstract

This investigation aims to determine the influence of pre-saturation and dried recycled concrete aggregates (RCA) on mechanical, rheological properties and durability of concrete. Coarse ordinary aggregates (COA) were partially substituted with RCA and an amount of superplasticizer was added to keep the same workability. The results found show that concrete with dried RCA aggregates requires a great dosage of superplasticizer and achieves high compressive strength and rheological parameters. However, for concrete with pre-saturated RCA aggregates, the needed dosage of superplasticizer is reduced and the mechanical properties and the rheological parameters are decreased. The use of pre-saturated RCA aggregates is better to keep adequate superplasticizer dosage and relevant rheological parameters. Mathematical relationships are proposed to express the variation of the compressive strengths and the rheological parameters according to the concrete composition with fair correlation coefficients.

Keywords: compressive strength, pre-saturation, recycled concrete aggregate, rheological properties, slump, superplasticizer, viscosity, yield stress.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تحديد تأثير حصى الخرسانة المعاد تدويرها (GBR) المشبعة سابقا والجافة على الخواص الميكانيكية، والريولوجية، و الانكماش بالتجفيف على الخرسانة. لجميع الخلطات الخرسانية، الحصى الكبيرة المعتادة (GGO) يتم استبدالها جزئيا ب GBR وتمت إضافة كمية من الملدن المتفوق للحفاظ على نفس القابلية. وأظهرت النتائج أن الخرسانة مع GBR الجافة تتطلب جرعة كبيرة من الملدن المتفوق وتصل إلى أكبر قدر من المقاومة للضغط وقيم أكبر للخصائص الريولوجية. مع ذلك، حصى GBR المشبعة سابقا تقوم بتقليل الجرعة المطلوبة من الملدن المتفوق و تخفض من الخواص الميكانيكية و المعايير الريولوجية. استخدام الحصى GBR المشبعة سابقا هو الأحسن لجعل جرعة الملدن المتفوق مناسبة ويوفر أفضل معايير ريولوجية. و في الأخير نقترح علاقات رياضية للتعبير عن الاختلاف في قوة الضغط والمعايير الريولوجية اعتمادا على تركيبة الخرسانة مع معاملات الارتباط جيدة .

كلمات البحث : مقاومة الضغط, المشبعة سابقا, حصى الخرسانة المعاد تدويرها , الخصائص الريولوجية, قابلية, الملدن المتفوق, اللزوجة البلاستيكية, عتبة الانفصام.

Listes des Figures

Figure 1.1 :	<i>Schématisation d'un granulat recyclé [3]</i>	5
Figure 1.2 :	<i>Démolition d'une construction (problème de débris)</i>	6
Figure 1.3 :	<i>Déchets de démolition et taux de recyclage dans certains pays européens selon l'UEPG en 2006[5]</i>	7
Figure 1.4 :	<i>Compositions des déchets, chiffres de 2004 [5]</i>	8
Figure 1.5 :	<i>Distributions granulométrique de deux types de GBR pour des fractions fines et grossières [9]</i>	14
Figure 1.6 :	<i>Analyse granulométrique des gros granulats recyclés et naturel [11]</i>	15
Figure 1.7 :	<i>Relation entre la densité et le taux de mortier résiduel [15].</i>	16
Figure 1.8 :	<i>Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [21]</i>	18
Figure 1.9 :	<i>Relation entre mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau des GBR [15].</i>	18
Figure 1.10:	<i>Relations entre la densité et la capacité d'absorption d'eau des GBR [15].</i>	19
Figure 1.11:	<i>Relation entre le mortier résiduel et la valeur d'abrasion Los Angeles [15]</i>	20
Figure 1.12:	<i>Teneur en mortier résiduel des GBR évalué par diverses méthodes [15]</i>	23
Figure 2.1 :	<i>La courbe d'écoulement des fluides Benghamiens.</i>	33
Figure 2.2 :	<i>Viscosimètre ConTec BML 3 [52]</i>	34
Figure 2.3 :	<i>Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton recyclé [49]</i>	36
Figure 2.4 :	<i>Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton ordinaire [49]</i>	36
Figure 2.5 :	<i>Retrait due au séchage des différents types de béton recyclé [20].</i>	43
Figure 2.6 :	<i>Retrait endogène pour les différents types de béton. [20]</i>	43
Figure 2.7 :	<i>Evolution du retrait des bétons recyclés à base de gros granulats de béton concassé. [66]</i>	45
Figure 3.1 :	<i>Courbe granulométrique des granulats utilisés.</i>	50
Figure 3.2 :	<i>Courbe granulométrique de référence.</i>	53
Figure 3.3 :	<i>Bétonnière électrique 115 litres.</i>	56
Figure 3.4 :	<i>Cône d'Abrams</i>	56
Figure 3.5 :	<i>Rhéomètre à béton.</i>	57
Figure 3.6 :	<i>Agitateur.</i>	57
Figure 3.7 :	<i>Croisillon.</i>	58
Figure 3.8 :	<i>Récipient.</i>	58
Figure 3.9 :	<i>Schéma descriptif du rhéomètre à béton.</i>	58

Figure 3.10:	<i>Balance électronique.</i>	59
Figure 3.11:	<i>Réalisation de l'essai d'affaissement su cône d'Abrams</i>	59
Figure 3.12:	<i>Profil de vitesse [95].</i>	61
Figure 3.13:	<i>Schéma du cisaillement du béton dans le récipient.</i>	62
Figure 3.14:	<i>Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement. MD60 (GBR=60% sec)</i>	63
Figure 3.15:	<i>Essai de compression</i>	65
Figure 3.16:	<i>Essai de traction par flexion</i>	65
Figure 3.17:	<i>Dispositif pour le calcul du module d'élasticité</i>	66
Figure 3.18:	<i>Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes</i>	66
Figure 3.19:	<i>Comparateur d'exactitude inférieure ou égale à 0,001 mm</i>	68
Figure 3.20:	<i>Répétitivité des résultats des taux de cisaillement du béton adjuvanté de E/C =0.5 (GBR sec et pré-saturé).</i>	69
Figure 3.21:	<i>Répétitivité des résultats de la viscosité plastique du béton adjuvanté de E/C =0.5 (GBR sec et pré-saturé).</i>	69
Figure 3.22:	<i>Répétitivité des résultats de la résistance à la compression du béton adjuvanté de E/C =0.6 (GBR sec).</i>	70
Figure 3.23:	<i>Répétitivité des résultats de l'évolution dans le temps du retrait du béton adjuvanté de E/C =0.6 (60% GBR sec)</i>	70
Figure 4.1 :	<i>Variation de l'ouvrabilité du béton sans superplastifiant en fonction de la substitution des GGO par les GBR (E/C=0.6)</i>	74
Figure 4.2 :	<i>Variation des paramètres rhéologique du béton sans superplasfiant en fonction de la substitution des GGO par les GBR (E/C=0.6)</i>	75
Figure 4.3 :	<i>Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement des GBR sans SP (E/C=0.6).</i>	77
Figure 4.4 :	<i>Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de remplacement des GBR sans SP (E/C=0.6).</i>	79
Figure 4.5 :	<i>Besoin en superplastifiant pour les bétons utilisés en fonction de la substitution des GGO par les GBR.</i>	80
Figure 4.6 :	<i>Effet du taux de remplacement des GBR sur les paramètres rhéologiques du béton (E/C=0.4)</i>	81
Figure 4.7 :	<i>Effet du taux de remplacement des GBR sur les paramètres rhéologiques du béton (w/c=0.5)</i>	83
Figure 4.8 :	<i>Effet du taux de remplacement des GBR sur les paramètres rhéologiques du béton (E/C=0.6).</i>	83
Figure 4.9 :	<i>Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement des GBR (E/C=0.4).</i>	86
Figure 4.10:	<i>Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement des GBR (E/C=0.5).</i>	86
Figure 4.11:	<i>Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement des GBR (E/C=0.6).</i>	87

Figure 4.12:	<i>Résistances à la traction des bétons à base de GBR sec pour différents rapports E/C et différents âges.</i>	88
Figure 4.13:	<i>Variation de la résistance à traction en fonction du taux de remplacement des GBR (E/C=0.4).</i>	88
Figure 4.14:	<i>Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de remplacement des GBR (E/C=0.5).</i>	89
Figure 4.15:	<i>Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de remplacement des GBR (E/C=0.6).</i>	89
Figure 4.16 :	<i>Evolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation. (100% GGO ; E/C=0.5).....</i>	90
Figure 4.17 :	<i>Evolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation (20% GBR sec ; E/C=0.5)</i>	90
Figure 4.18 :	<i>Variation du module d'élasticité en fonction du taux de remplacement des GBR secs.....</i>	92
Figure 4.19 :	<i>Pertes en poids des éprouvettes en fonction de la teneur en granulats recyclés (t=140 jours)</i>	93
Figure 4.20 :	<i>Variation du retrait final (t=140 jours) en fonction du rapport E/C.....</i>	94
Figure 4.21 :	<i>Evolution du retrait du séchage avec le temps (E/C=0.4)</i>	95
Figure 4.22 :	<i>Evolution du retrait du séchage avec le temps (E/C=0.5)</i>	95
Figure 4.23 :	<i>Evolution du retrait du séchage avec le temps (E/C=0.6)</i>	96
Figure 4.24 :	<i>Relation entre les valeurs de la viscosité plastique calculée et la viscosité plastique mesurée.....</i>	97
Figure 4.25 :	<i>Relation entre les valeurs du seuil de cisaillement calculé et du seuil de cisaillement mesuré.....</i>	98
Figure 4.26 :	<i>Relation entre les valeurs de la résistance à la compression calculée et la résistance à la compression mesurée à 28 jours.....</i>	99
Figure 4.27 :	<i>Comparaison de la variation du module d'élasticité prédit par des différents codes et les résultats expérimentaux obtenus.....</i>	101
Figure 4.28 :	<i>Relation entre les valeurs du module d'élasticité calculé et le module d'élasticité mesuré à 28 jours.....</i>	102
Figure 4.29 :	<i>Corrélation entre la résistance à la compression et la traction.....</i>	103
Figure 4.30 :	<i>Corrélation entre le retrait total et la perte en poids à 140 et 28 jours...</i>	104

Liste des tableaux

Tableau 1.1:	<i>Etude économique de l'utilisation des granulats ordinaire et les granulats recyclés [7]</i>	11
Tableau 1.2:	<i>Prix comparés des granulats recyclés et des granulats naturels dans différents pays de l'Union Européenne (UEPG, 2005)[8]</i>	11
Tableau 1.3:	<i>Objectifs fixés pour le recyclage des matériaux secs dans différents pays [2]</i>	12
Tableau 1.4:	<i>Valeurs d'abrasion Los Angeles des GBR et des GN.....</i>	20
Tableau 2.1:	<i>Densité des granulats naturels et recyclés [29]</i>	31
Tableau 3.1:	<i>Composition chimique et minéralogiques du ciment de CHLEF.....</i>	49
Tableau 3.2:	<i>Propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés.....</i>	51
Tableau 3.3:	<i>Composition chimique de l'eau de gâchage</i>	51
Tableau 3.4:	<i>Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant (Medaflo 30).</i>	52
Tableau 3.5:	<i>Formulation de 1 m³ de béton ordinaire.....</i>	53
Tableau 3.6:	<i>Notations et compositions des différents bétons étudiés.</i>	54
Tableau 3.7:	<i>Procédure de malaxage du béton.</i>	55
Tableau 4.1:	<i>Coefficients de l'équation (4.1) trouvés pour les paramètres rhéologique par la corrélation des résultats expérimentaux.....</i>	97
Tableau 4.2:	<i>Coefficients de l'équation (4.3) trouvés pour la résistance à la compression par la corrélation des résultats expérimentaux.....</i>	99
Tableau 4.3 :	<i>Coefficients de l'équation (4.8) trouvés pour le module d'élasticité par la corrélation des résultats expérimentaux.....</i>	102

Liste des symboles

GBR	Granulat de béton recyclé.
GGO	Gros granulats ordinaire.
τ	Contrainte de cisaillement [Pa].
τ_0	Seuil de cisaillement [Pa].
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement [1/s].
μ :	Viscosité plastique [Pa.s].
A	l'affaissement du béton [mm].
ρ	Densité du béton.
ρ_g	gravité spécifique.
CaO	Oxyde de calcium
SiO ₂	Silice
Al ₂ O ₃	Alumine
Fe ₂ O ₃	Oxide de fer
MgO	Oxyde magnesium
Na ₂ O	Oxide de sodium
K ₂ O	Oxide de potassium
SO ₃	Trioxide de soufre
C ₃ S	Silicate tricalcique (Aalite)
C ₂ S	Silicate bicalcique (bélite)
C ₃ A	Aluminate tricalcique (célite)
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique
PC	Polycarboxylates
Ca(OH) ₂	Chaux
CSH	Silicates de calcium hydratés
Ca	Le calcium
Mg	Le magnésium
Na	Le sodium
K	Le potassium
Cl	Les chlorures
SO ₄	Les sulfates
HCO ₃	Les Bicarbonates
NO ₃	les nitrates
T (°C)	Température (degré Celsius)
V_s	Volume absolu de la matière solide
V	Volume apparent des particules
p	Porosité
V_v	Volume des vides
e	L'indice des vides
BAP	Béton auto plaçant
BHP	Béton à hautes performances

Tables des Matières

Remerciements

Résumé

Abstract

الملخص

Listes des Figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction Générale 1

Chapitre 01 :

État de l'art et propriétés des granulats de béton recyclé

1.1. Introduction.....	5
1.2. Description du granulat recyclé	5
1.3. Chiffres et Historique.....	6
1.4. Classification des déchets de la construction.....	7
1.5. Processus de fabrication des granulats recyclés	9
1.6. Aspect écologique.....	10
1.7. Aspect économique.....	10
1.8. Aspect technique.....	11
1.9. Perspectives et avenir.....	12
1.10. Caractéristiques des granulats recyclés.....	13
1.10.1. Distribution granulométrique.....	14
1.10.2. Densité / Masse volumique.....	15
1.10.3. Absorption	16
1.10.4. Résistance à l'abrasion.....	19
1.10.5. Teneur en mortier résiduel et méthodes d'évaluation	21
1.11. Conclusion	23

Chapitre 02 :

Influence des GBR sur les propriétés du béton

2.1. Introduction.....	25
2.2. Technique d'utilisation des granulats recyclés	25
2.2.1. Ajout de la quantité d'eau exacte d'absorption	25
2.2.2. Immersion dans l'eau avant le malaxage.....	26

2.3. Facteurs affectant les propriétés du béton.....	26
2.3.1. Rapport E/C	26
2.3.2. Teneur et qualité du mortier attaché	27
2.3.3. Granulométrie du granulat recyclé	28
2.3.4. Méthode de préparation et teneur en eau du granulat	28
2.3.5. Taux de remplacement.....	29
2.4. Propriétés du béton à l'état frais	30
2.4.1. Ouvrabilité et Densité à l'état frais	30
2.4.2. Rhéologie	31
2.5. Propriétés à l'état durcie	34
2.5.1. Zone interfaciale de transition.....	34
2.5.2. Perméabilité / porosité	36
2.5.3. Propriétés mécaniques	38
2.5.3.1. Résistance à la compression.....	38
2.5.3.2. Résistance à la traction et à la flexion.....	40
2.5.3.3. Module d'élasticité	41
2.6. Propriétés liées à la durabilité.....	42
2.6.1. Retrait et fluage.....	42
2.6.2. Résistance aux cycles de gel-dégel.....	45
2.6.3. Carbonatation.....	46
2.7. Conclusion	47

Chapitre 03 :

Etude expérimentale

3.1. Introduction.....	49
3.2. Matériaux utilisés.....	49
3.2.1. Ciment Portland	49
3.2.2. Sable.....	50
3.2.3. Gravier ordinaire et Gravier recyclé	50
3.2.4. Eau de gâchage	51
3.2.5. Superplastifiant :	52
3.3. Formulation du béton de référence	52
3.4. Composition des bétons	53
3.5. Préparation des bétons	54
3.6. Matériels utilisés	55
3.6.1. Malaxeur	55
3.6.2. Cône d'Abrams	56
3.6.3. Rhéomètre à béton	57
3.6.4. Autres accessoires.....	59
3.7. Essais réalisés	59
3.7.1. Ouvrabilité	59

3.7.2. Essai de rhéologie	60
3.7.2.1. Profil de vitesse imposée.....	60
3.7.2.2. Déroulement de l'essai	61
3.7.2.3. Mesure des paramètres rhéologiques	62
3.7.3. Essais mécaniques.....	64
3.7.4. Essai de retrait.....	67
3.8. Répétitivité des résultats	68
3.9. Conclusion	71

Chapitre 04 :

Présentation et analyse des résultats

4.1. Introduction.....	73
4.2. Influence des GBR sur les propriétés du béton non adjuvanté	73
4.2.1. Effet des GBR sur l'ouvrabilité	73
4.2.2. Effet des GBR sur les propriétés rhéologiques	74
4.2.3 Effet des GBR sur la résistance à la compression	75
4.2.4. Effet des GBR sur la résistance à la traction	78
4.3. Influence des GBR sur les propriétés du béton adjuvanté	79
4.3.1. Effet des GBR sur le besoin en superplastifiant	79
4.3.2. Effet des GBR sur les propriétés rhéologiques	80
4.3.3. Effet des GBR sur la résistance à la compression	83
4.3.4. Effet des GBR sur la résistance à la traction	87
3.3.4. Effet des GBR sur le module d'élasticité.....	90
4.3.5. Effet des GBR sur la perte en poids.....	92
4.3.6. Effet des GBR sur le retrait de séchage	93
4.4. Modélisation des paramètres rhéologiques.....	96
4.5. Modélisation de la résistance à la compression	98
4.6. Modélisation du module d'élasticité.....	100
4.7. Modélisation de la résistance à la traction	102
4.8. Modélisation du retrait.....	104
4.7. Conclusion	105
Conclusions générales.....	107
Références Bibliographiques	111

Introduction générale

Introduction Générale

La croissance de la population mondiale, l'urbanisation généralisée et la situation économique des pays en développement a remarquablement augmenté le rythme de développement de l'industrie de la construction. Le béton est, juste après l'eau, le matériau le plus consommé au monde. Chaque habitant de la planète en consomme en moyenne un mètre cube par an. Environ 25 milliards de tonnes de béton sont fabriquées chaque année selon le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable [1]. Lors de la démolition des vieux bâtis ou en cas de catastrophes naturelles, les décharges de ce matériau causent un problème environnemental crucial à cause de sa durabilité et de l'absence de sa dégradation. Le recyclage de ce matériau permettrait à la fois de supprimer ces décharges et récupérer des matériaux utiles. Maintenant, en utilisant les déchets de démolition comme une source de granulats pour fabriquer un nouveau béton devient très intéressant pour l'industrie de la construction. Les principales raisons de cet intérêt croissant sont liées à la protection de l'environnement, la préservation des ressources en agrégats naturels, l'élimination des décharges publiques et la diminution du coût de traitement des déchets, sans oublier l'empreinte carbone surtout si le béton recyclé est utilisé sur place. Au niveau mondial, le recyclage est désormais en marche, réunissant de nombreux scientifiques et industriels du secteur de la construction pour décider des cadres d'utilisation de ce nouveau matériau.

Certains pays recyclent presque tout leur béton, comme la Suisse. En Europe, le taux de recyclage varie du minium (comme au Portugal) jusqu'à 95% en Suisse. En Algérie, en plus du déficit important (10 à 20%) connu ces dernières années en granulats et ciment, l'application des granulats recyclés dans la production du béton n'a pas encore franchi le seuil des laboratoires et 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) suite au tremblement de terre de 1980 en collaboration avec le Centre Scientifique et Technique de Construction (C.S.T.C) Belge. Les experts estiment qu'environ 20% du béton utilisé actuellement pourrait techniquement être remplacé par du béton recyclé

Les propriétés du béton recyclé ont déjà été étudiées par de nombreux scientifiques à travers le monde, mais très peu d'auteurs se sont intéressés à la problématique de la rhéologie de ce matériau. De par leur composition, les granulats recyclés présentent

des caractéristiques différentes des granulats naturels. En effet, les granulats recyclés sont plus poreux, avec un coefficient d'absorption d'eau plus important, contiennent des hydrates, et présentent des zones de transition interfaciale connues pour être la zone de faiblesse mécanique du béton. De ceci, il est primordial d'être en mesure d'anticiper le comportement mécanique et rhéologique du béton recyclé afin de permettre son utilisation dans le bâtiment.

Le travail de thèse de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif d'améliorer la compréhension du comportement mécanique, rhéologique et la durable des bétons de granulats recyclés. Les travaux ont été réalisés dans le cadre du laboratoire LaG de l'université Hassiba Ben Bouali à Chlef. Les granulats recyclés testés proviennent du concassage, après une année de durcissement, d'un béton fabriqué avec le même ciment et la même composition que le béton ordinaire utilisé dans cette étude. Les bétons incorporant ces granulats sont formulés avec la méthode de Dreux Gorisse, plusieurs types de matrices cimentaires ont été utilisé avec un rapport E/C de 0.6, 0.5 et 0.4. L'évolution des propriétés mécaniques, rhéologiques et du retrait de séchage sont analysées.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres. Le premier chapitre est une étude bibliographique qui consiste à définir les caractéristiques des granulats de béton recyclé (GBR). L'analyse de travaux précédemment réalisés permet d'identifier et de comprendre les lignes directives à développer tout au long de ce programme de recherche. Le chapitre est divisé en deux parties faisant état de domaines de recherche distincts. La première partie expose la description, les chiffres et l'historique des granulats de béton recyclé, puis la classification et processus de fabrication des déchets de construction. La deuxième partie consiste à caractériser les granulats recyclés concernant la distribution granulométrique, la densité, la masse volumique, l'absorption, la résistance à l'abrasion et la teneur en mortier résiduel.

Le deuxième chapitre est une analyse de travaux précédemment réalisés sur les caractéristiques des bétons avec des granulats recyclés. Les travaux concernant les facteurs affectant les propriétés du béton recyclé sont démontrés. Puis, les travaux portant sur le comportement d'ouvrabilité et la rhéologie ainsi que les propriétés mécaniques (résistance à la compression et la traction), et l'étude de la zone de transition interfaciale dans les bétons de granulats recyclés sont exposés. Enfin, quelques travaux portant sur le comportement du

béton aux propriétés de durabilité (retrait, gel/dégel et carbonatation) sont prises en considération.

Ce chapitre sera suivi d'un troisième chapitre qui présente en premier lieu une caractérisation détaillée des matériaux utilisés. On présente leurs caractéristiques physiques (granulométrie, masse volumique apparente et spécifique, porosité, absorption), ainsi que leurs caractéristiques mécaniques (telles que leur abrasion Los Angeles). Ensuite, une description détaillée du matériel utilisé en donnant un aperçu sur les techniques expérimentales ainsi que la préparation des mélanges et les essais réalisés durant cette étude.

Le quatrième chapitre porte sur l'analyse et la discussion des résultats de l'influence des granulats recyclés sur le comportement rhéologiques, mécanique et de la durabilité du béton fait par ces granulats. On cherche à déterminer l'influence des granulats issus de béton concassé et à suivre l'évolution de différentes propriétés (physiques et mécaniques) en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés. Des commentaires avec une comparaison avec d'autres résultats ont été démontrés. A la fin de ce chapitre, des relations mathématiques sont proposées pour exprimer la variation des résistances à la compression et des paramètres rhéologiques en fonction de la composition de béton avec des coefficients de corrélation équitables.

A la fin de cette thèse, une conclusion générale est introduite pour récapituler les principaux résultats trouvés, ainsi que des perspectives de recherche envisagées.

Chapitre 01 :

État de l'art et Propriétés des granulats de béton recyclé

1.1. Introduction

Le cadre du présent chapitre concerne initialement la définition des granulats de béton recyclé (GBR), la classification des déchets de chantier ainsi que le contexte générale de la production et la consommation de ces granulats. Ensuite, on présente les caractéristiques physico-mécaniques des granulats de béton recyclés où l'analyse des travaux précédemment réalisés permet d'identifier et de comprendre les lignes directives à développer tout au long de ce programme de recherche.

1.2. Description du 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. Les granulats recyclés sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine [1]. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [2]. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La schématisation du granulat recyclé est illustrée sur la figure 1.1 [3].

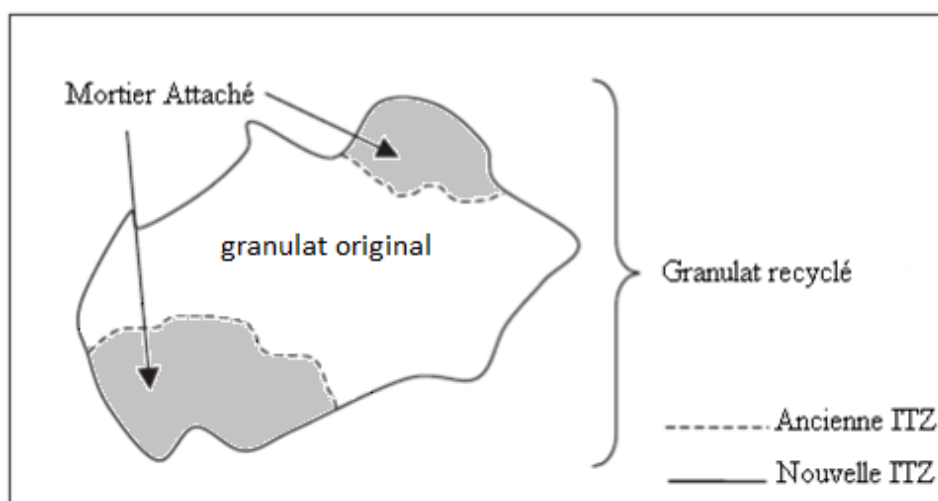


Figure 1.1: Schématisation d'un granulat recyclé [3]

1.3. Chiffres et Historique

Les premiers essais sur le recyclage des bétons ont débuté aux États-Unis et au Japon à la fin des années 1970 [4]. L'idée, de transformer les blocs de béton en matériaux valorisables dans les travaux publics, consiste à broyer le béton, comme on le fait avec une roche afin d'en extraire un grave (mélange de sables et de gravillons). Le matériau ressemble à celui utilisé dans une carrière de roche massive classique.

En Europe, sur les 1,4 milliards de tonnes de déchets annuels, 40% (soit 510 millions de tonnes) sont des déchets de construction (figure 1.2). En 2006, il a été signalé que près de 850 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition ont été générés dans l'union européenne par an, ce qui représente 31% de la production globale de déchets [5]. Les Etats-Unis produisent 325 millions de tonnes de déchets de construction et le Japon 77 millions. Comme la Chine et l'Inde produisent maintenant plus de 50% du béton mondial, leurs déchets de béton seront eux aussi considérables.

Deux milliards de tonnes de granulats sont extraits chaque année aux États-Unis, et ce nombre atteindra 2,5 milliards de tonnes d'ici 2020, ce qui soulève des préoccupations au sujet de la source des nouveaux granulats. Une alternative consiste à réutiliser des matériaux recyclés, ce qui peut être considéré comme une ressource plutôt que comme des "déchets". Au Royaume-Uni, la demande en granulats pour tous les usages est d'environ 270 millions de tonnes par an, avec 70 millions de tonnes de cette demande à venir à partir des granulats secondaires et recyclés.



Figure 1.2 : Démolition d'une construction (problème de débris).

Certains pays recyclent presque tout leur béton, comme la Suisse. En Europe, le taux de recyclage varie du minimum (comme au Portugal) jusqu'à 95% en Suisse, passant par la France et l'Allemagne qui recyclent respectivement 63 et 80% de leurs bétons. Dans le monde, de nombreuses sociétés sont spécialisées dans le recyclage du béton dans le but d'éliminer complètement le béton de ses décharges ; une obligation déjà en vigueur notamment dans les pays scandinaves.

La figure 1.3 Compare le taux de production des déchets de démolition de certains pays européens par rapport au pourcentage de recyclage de ces déchets. La France est encore un peu en retard sur la mise en place d'une industrie du recyclage des matériaux de démolition, alors que les Pays Bas recyclent presque tous leurs déchets de démolition.

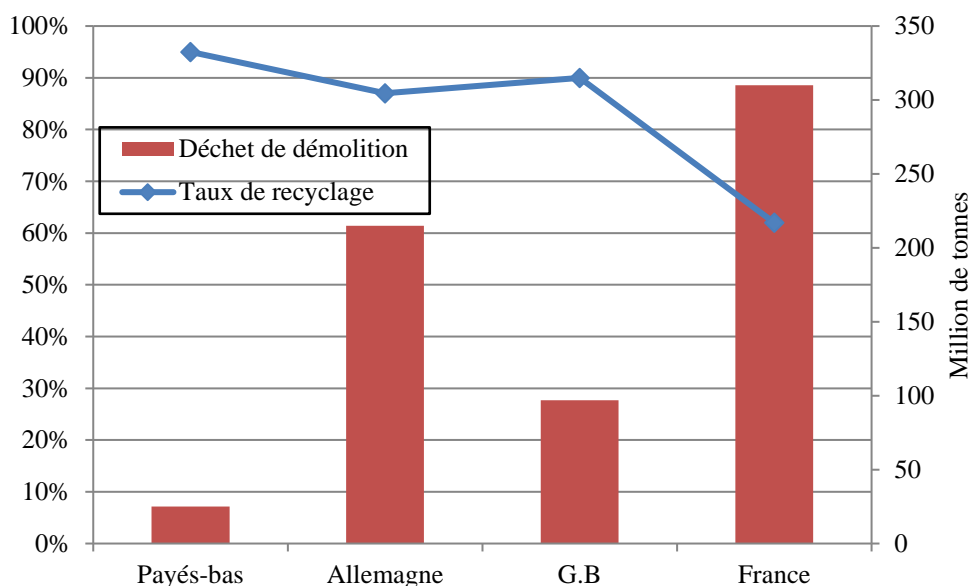


Figure 1.3 : Déchets de démolition et taux de recyclage dans certains pays européens selon l'UEPG en 2006[5].

1.4. Classification des déchets de la construction

Les granulats recyclés proviennent des déchets de démolition de bâtiments ou de routes. Ces déchets de chantier sont constitués de résidus des procédés de production et de transformation (déchets chimiques, emballages, bois traités ou non traités...). Ces déchets de démolition font partie des déchets industriels dans la classification usuelle (à distinguer des déchets urbains et des déchets agroalimentaires). La figure 1.4 montre les quatre grandes catégories permettant de classer ces déchets industriels :

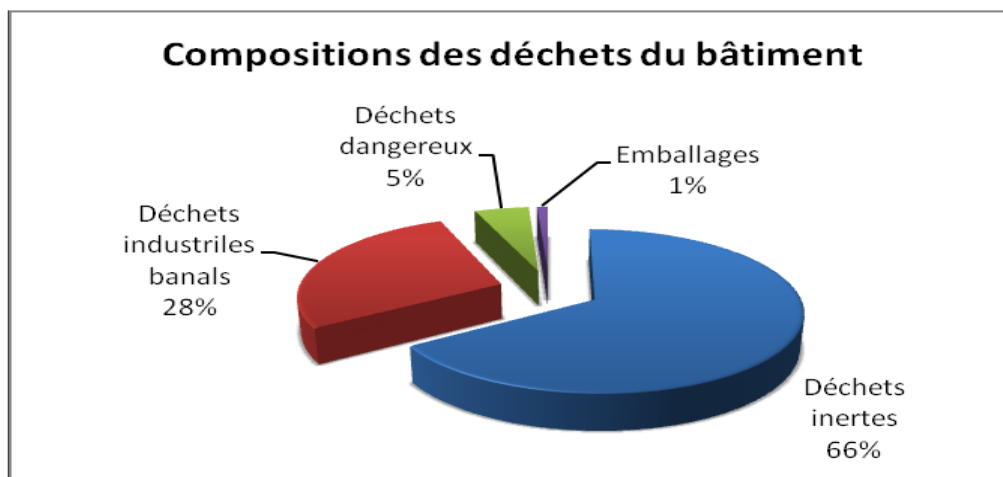


Figure 1.4: Compositions des déchets, chiffres de 2004 [5].

La composition approximative des déchets de démolition de bâtiments peut donc être constituée comme suit :

- ✓ béton (40 %),
- ✓ brique (30 %),
- ✓ bois (10 %),
- ✓ plastique (5 %),
- ✓ métaux (5 %),
- ✓ autres éléments (10 %).

La démolition des routes génère des déchets d'enrobés mais également des déchets de bétons hydrauliques, le traitement de ces déchets permet d'extraire les éléments non appropriés comme les métaux. Dans la fabrication de granulats recyclés pour usage routier, on distingue trois types de matériaux issus du recyclage :

- ✓ Granulat recyclé béton,
- ✓ Granulat recyclé enrobés,
- ✓ Granulat recyclé tout venant.

En Europe, l'applicabilité des règles de calcul aux granulats recyclés n'est pas encore établie. Le dispositif normatif est le même pour les granulats naturels et recyclés, bien que certaines caractéristiques spécifiques à ces derniers induisent une réflexion autour de son applicabilité. Selon la norme EN 206-1 [6], l'utilisation des granulats recyclés a été autorisée, mis à part dans les bétons précontraints, mais avec des proportions limitées qui dépendent de leur qualité et de la classe de résistance souhaitée pour le béton.

1.5. Processus de fabrication des granulats recyclés

Différentes étapes visent à obtenir un produit de recyclage répondant aux caractéristiques souhaitées. 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 brise roche hydraulique (B.R.H.), à couper les éléments longs à l'aide d'une cisaille et à retirer les impuretés les plus grosses.
- ✓ 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 (bois, papiers, plastiques) résiduelles.
- ✓ Concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire. L'installation secondaire peut aussi être équipée d'un séparateur magnétique, d'un dispositif d'épuration (lavage, tables densimétriques, ...). On voit donc que les centres de recyclage peuvent offrir une technicité très variée allant du simple concasseur à mâchoire sans criblage ni épuration jusqu'à l'installation industrielle sophistiquée disposant de deux, voire trois niveaux de concassage, de criblage et d'épuration.
- ✓ Stockage.
- ✓ Analyses éventuelles avant utilisation.

Les installations de recyclages peuvent être fixes ou mobiles, et dites «primaires» ou «secondaires» selon qu'elles proposent un ou plusieurs niveaux de concassage. Les produits résultant de ces installations sont de natures variées, allant du matériau de pré-criblage, aux graves non calibrées, graves 0/D, sables et gravillons. Ils sont aujourd'hui généralement utilisés pour réaliser des terrassements (remblayages divers, couches de forme...) et des chaussées (assises).

Les granulats de béton recyclés peuvent être relativement propres, mais dans un autre cas ils peuvent être contaminés par de la brique, du sable, de la poussière, du verre, du plastique, etc. Il a été prouvé que ces granulats recyclés, même légèrement contaminés, pouvaient être utilisés dans la formulation des bétons à la place de granulats naturels [7].

Cependant, de la même manière que pour les granulats naturels, la qualité des granulats recyclés, en termes de distribution de taille, absorption, abrasion, et autres, doit être évaluée avant utilisation.

On obtient généralement la meilleure distribution de taille et de forme en procédant à un premier concassage, suivi d'un second. Cependant, pour des raisons économiques, un seul concassage est généralement effectué et il en résulte des graves de 50 mm de diamètre en moyenne. Un second broyage permettrait de descendre à un diamètre de 14 à 20 mm environ.

1.6. Aspect écologique

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau. Afin de préserver l'environnement, de nombreux professionnels se sont intéressés aux déchets provenant de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments comme matières premières de ces bétons.

Les avantages du recyclage incluent la préservation de l'espace d'enfouissement, la conservation des ressources naturelles et l'épargne des coûts de transport et d'énergie. En outre, cette solution contribue à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles et s'intègre ainsi au concept de développement durable. Le recyclage nécessite souvent moins d'énergie que l'exploitation minière et le transport des matériaux nouveaux, ce qui peut aider à réduire la pollution de l'air et l'eau ainsi que les émissions de gaz à effet de serre.

1.7. Aspect économique

Tam [8] a réalisé une étude économique complète en comparant les coûts et bénéfices engendrés par la méthode de production de granulats actuelle avec ceux engendrés par la méthode de recyclage (Tableau 1.1). Il a été démontré que sur le long terme les granulats recyclés sont économiquement bien plus intéressants, mais que le facteur « disponibilité » affecte quelque peu la viabilité de cette méthode. En effet, la quantité de matériaux disponibles est limitée par le nombre de chantiers de démolition locaux, 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 1.1. Etude économique de l'utilisation des granulats ordinaire et les granulats recyclés [8]

	Méthode actuelle (1000\$/an)	Méthode de recyclage (1000\$/an)
Coût total	44097,16	6738,06
Bénéfices totaux	20,3	37654,61
Bénéfices nets	44076,84	30916,55

Les granulats recyclés sont, d'une façon générale, plus compétitifs partout en Europe, excepté en France où la différence provient essentiellement du fait que les sources d'approvisionnement en granulats naturels sont plus importantes que dans le reste de l'Europe. La tendance est récapitulée dans le Tableau 1.2 :

Tableau 1.2. Prix comparés des granulats recyclés et des granulats naturels dans différents pays de l'Union Européenne (UEPG, 2005) [5]

Pays	Prix moyen des granulats recyclés (1), €/t	Prix moyen des granulats naturels (2), €/t	Rapport (1) / (2)
France	4.4 – 9.0	3.6 – 6.5	1.2 – 1.4
Espagne	3.0	6.0 – 14.4	0.2 – 0.5
Belgique	2.4 – 7.2	2.4 – 10.8	0.7 – 11
Royaume-uni	3.3 – 8.4	4.4 – 15.2	0.5 – 0.6
Allemagne	4.8 – 8.4	6.5 – 8.8	0.7 – 0.95
Pays-bas	8.7	11.4	0.76

Les granulats recyclés ont un rendement plus élevé parce qu'elles sont plus légers en poids (10 à 15%) par rapport au granulat naturel par unité de volume, ce qui signifie moins de poids par mètre cube, ce qui entraîne une réduction du coût des matières, les coûts de transport et alors les coûts globaux du projet.

1.8. Aspect technique

Du point de vue 'technique, grâce à la normalisation, la qualité des produits 'granulats recyclés' est identifiable et reconnue. Néanmoins, différents problèmes apparaissent au niveau technique et constitue des freins à l'exploitation des granulats recyclés; parmi ceux-ci on identifie:

- ✓ Le cadre normatif : l'utilisation des granulats recyclés est très stricte et ciblée. Le contenu des normes oriente le marché et donc la production.
- ✓ L'adaptation des infrastructures : l'utilisation des granulats recyclés nécessite l'adaptation des infrastructures de production. Cette adaptation a des implications directes sur les investissements or, à ce jour, l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons reste assez faible. Par conséquent, les producteurs de béton hésitent à effectuer les investissements requis.
- ✓ La disponibilité des produits : la mise à disposition sur le marché de produits stables, homogènes et en quantité suffisante est un pré-requis pour les fabricants de béton. Ces derniers portent la responsabilité sur la caractéristique des produits livrés dont la qualité doit être irréprochable et constante.

1.9. Perspectives et avenir

Aujourd'hui, certain pays d'Europe recyclent quasiment tout leur béton. La majorité des pays développés se sont fixés des objectifs de valorisation des déchets qui sont donnés dans le tableau 1.3.

Le taux de valorisation des déchets inertes est établi en prenant en considération les méthodes suivantes:

- ✓ Réutilisation sur le chantier ou à un autre endroit;
- ✓ Recyclage sur le chantier;
- ✓ Recyclage après regroupement en un lieu prévu à cet effet;
- ✓ Exportation en vue de la réalisation en remblai.

Tableau 1.3 : Objectifs fixés pour le recyclage des matériaux secs dans différents pays [2]

Pays	Objectifs
Australie	Réduire de 50% les résidus destinés aux décharges.
Autriche	A long terme, réutilisation de 90% des matériaux routiers.
Danemark	Réutiliser 54% de la quantité totale des résidus. Réutiliser 60% des résidus de construction et de démolition.
France	Supprimer complètement les décharges traditionnelles.
Japon	Réduire la production de résidus de 10% et augmenter la réutilisation de 42% à 80%.
Pays-Bas	Réutiliser 90% des matériaux de construction et de démolition et poursuivre la réutilisation à 100% des cendres provenant des incinérateurs municipaux.
Royaume-Uni	Doubler l'utilisation des matériaux recyclés en 15 ans.

Quelques projets expérimentaux de réutilisation du béton de déconstruction dans le bâtiment ont déjà vu le jour en Europe:

- Suisse : école « Leutschenbach », 2009
- Suisse : appartements « Brunnenhof », 2007
- République Tchèque : « multipurpose experimental building » à l'UCEEB, 2014
- Belgique : « A recycled house », 2000
- Royaume-Uni : « New operations center for Wessex Water », 2000

Si ce système de recyclage du béton est aujourd'hui si peu systématiquement mis en place, c'est avant tout parce que les premières études réalisées en laboratoire tendent à montrer que les bétons élaborés à partir de granulats recyclés présentent des problèmes d'hétérogénéité, et quelques difficultés de mise en œuvre avec des problèmes d'ouvrabilité, qui nécessitent d'utiliser plus d'eau et plus de ciment pour atteindre des performances mécaniques similaires aux bétons ordinaires.

La première étape à franchir en Algérie est d'estimer le taux de déchets de démolition produit par le secteur du bâtiment et des travaux publics en créant des décharges publiques spécialisées à ces déchets, ensuite d'encourager les recherches scientifiques dans ce domaine en lançant un projet national. En effet, les professionnels de la construction en Algérie doivent de plus en plus être sensibilisés aux questions d'environnement et s'interroger sur le devenir de leurs matériaux en fin de vie. Les industriels et les universitaires spécialistes du génie civil doivent se regrouper pour changer la tendance au niveau national en favorisant la réutilisation de l'intégralité des produits issus des bétons déconstruits. En traitant la problématique des granulats recyclés avec un intérêt également au recyclage des matériaux hydrauliques. Le but est d'aboutir à des normes visant à cadrer l'utilisation des bétons recyclés, afin de permettre enfin en Algérie leur bonne utilisation dans le bâtiment.

1.10. Caractéristiques des granulats recyclés

La présence du mortier résiduel attaché au granulat original affecte plusieurs propriétés du granulat. Les propriétés détaillées dans cette section sont la distribution granulométrique, la masse volumique, l'absorption d'eau et la résistance à l'abrasion. Les méthodes de mesure du mortier résiduel sont aussi présentées.

1.10.1. Distribution granulométrique

La distribution granulométrique des GBR est généralement différente par rapport à celle des granulats ordinaires. Cependant, dans les usines et également dans plusieurs travaux de recherches, les GBR sont produits en adoptant les procédés de broyage et de criblage et, par conséquent, la taille des GBR se situent généralement dans les limites maximales de la gradation du broyeur. L'utilisation de la technique de broyage similaire avec la même taille maximale (ou si le broyeur est réglé sur une ouverture spécifique) génère des GBR avec des distributions granulométriques similaires [9].

Chen et *al.* [9] ont trouvé des distributions granulométriques similaires pour deux types de GBR, où la composition de leurs bétons d'origine est légèrement différente, mais broyés par des concasseurs similaires avec la même taille maximale (Figure 1.5).

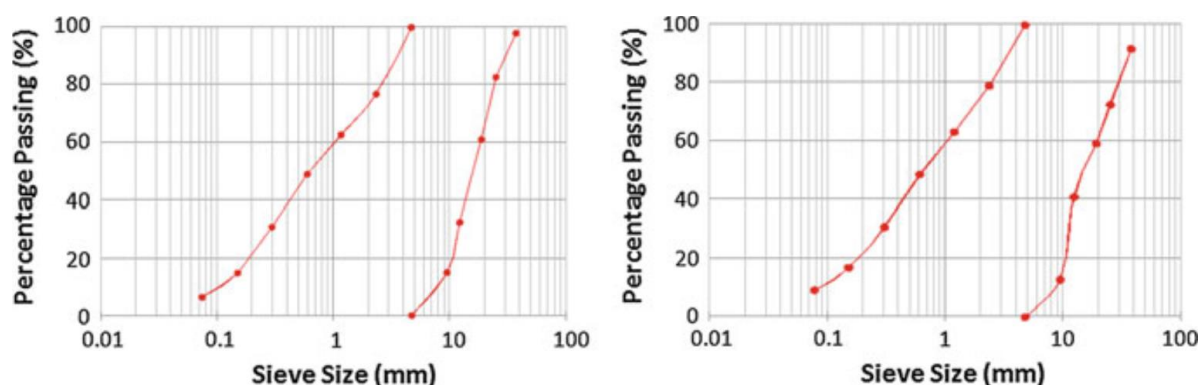


Figure 1.5 : Distributions granulométrique de deux types de GBR pour des fractions fines et grossières [9].

La plupart des chercheurs ont trouvé que les granulats recyclés ont souvent plus de particules fines que les granulats ordinaires [10, 11] (figure 1.6). Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé utilisé et du type de granulat ordinaire auquel on le compare [12]. L'analyse de ces résultats montre que les granulats recyclés de tailles maximales de 20 mm contiennent 2,3% de particules plus fines que 4,75 mm.

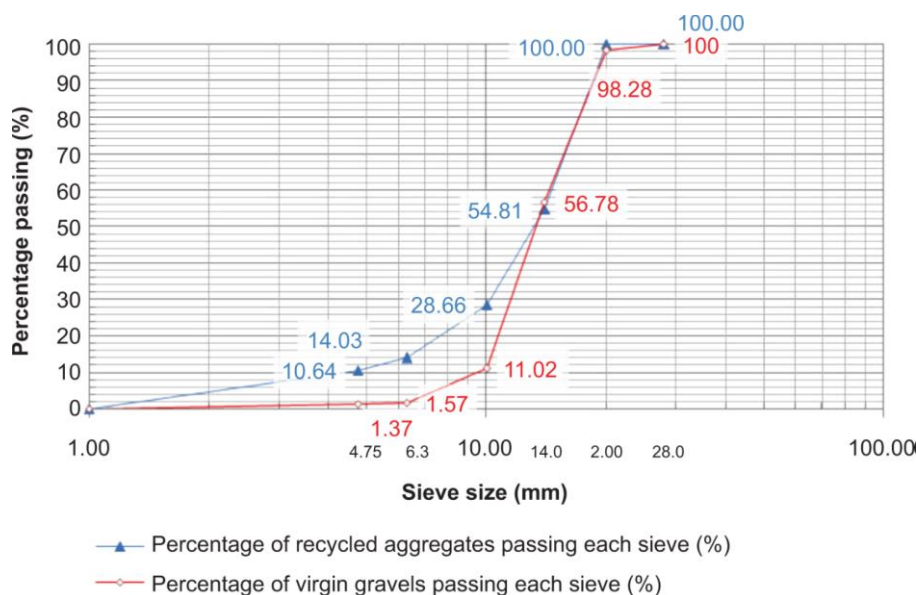


Figure 1.6 : Analyse granulométrique des gros granulats recyclés et naturels [11]

Gonzalez-Fonteboa et al. [13] ont mélangé deux fractions de gravier naturel pour obtenir une courbe granulométrique similaire à celle des GBR. De même, Yang et al. [14] ont aussi remixé les GBR pour répondre aux spécifications requises.

1.10.2. Densité / Masse volumique

La densité est l'un des paramètres fondamentaux des granulats. Elle est aussi importante pour la composition des mélanges de béton et influe sur plusieurs propriétés du béton résultant. La densité des bétons de GBR est inférieure à celle des bétons avec des granulats naturels. Cela est dû à l'existence de la pâte de ciment poreuse et moins dense dans les granulats recyclés. En raison de leur origine et de leur taille, les GBR peuvent avoir des densités différentes en fonction de la quantité de la pâte du mortier attaché. La densité est plus élevée pour les GBR qui ont moins de mortier attaché, comme il est mentionné par la figure 1.7 [15].

La densité relative des granulats recyclés est moins grande que celle des granulats naturels [12, 15, 1, 16]. La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2,75. La masse volumique plus faible des granulats recyclés est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle des granulats ordinaires ce qui fait diminuer par conséquent la masse volumique totale des granulats recyclés [12]. Cette réduction en densité est fonction de la teneur en mortier résiduel [15].

Poon et *al.* [17 ; 18] ont trouvé une faible densité des GBR obtenus à partir de béton de haute performance (BHP) que celle des GBR obtenu à partir de béton de résistance normale (BN), les deux types de béton ont été préparés en utilisant le même type de granulats de granit mais le BHP contient des cendres volantes et la fumée de silice comme additions minérales. Santos et *al.* [19] ont constaté une légère variation dans les paramètres de densité ainsi que d'autres propriétés des deux types des GBR préparés à partir de deux types de béton avec différentes résistances à la compression à 28 jours allant de 45 à 56 MPa. Le contenu de mortier dans ces deux bétons était, respectivement, de 36,3 et 49,4%. Généralement, la densité des GBR augmente avec la taille des granulats [20].

Plusieurs chercheurs ont trouvé que la densité apparente des GBR est également inférieure à celle des granulats ordinaire et la masse volumique apparente des GBR est généralement dans la plage de 1,15 à 1,40 kg/m³ à quelques exceptions près. Selon Ferreira et *al.* [21], la densité apparente des GBR est inférieure par rapport aux granulats naturels, cela est due à l'augmentation du volume des vides entre les particules dans l'ensemble des GBR, ils ont trouvé 48,8 et 50,4% de vides respectivement, dans les granulats naturels et les GBR.

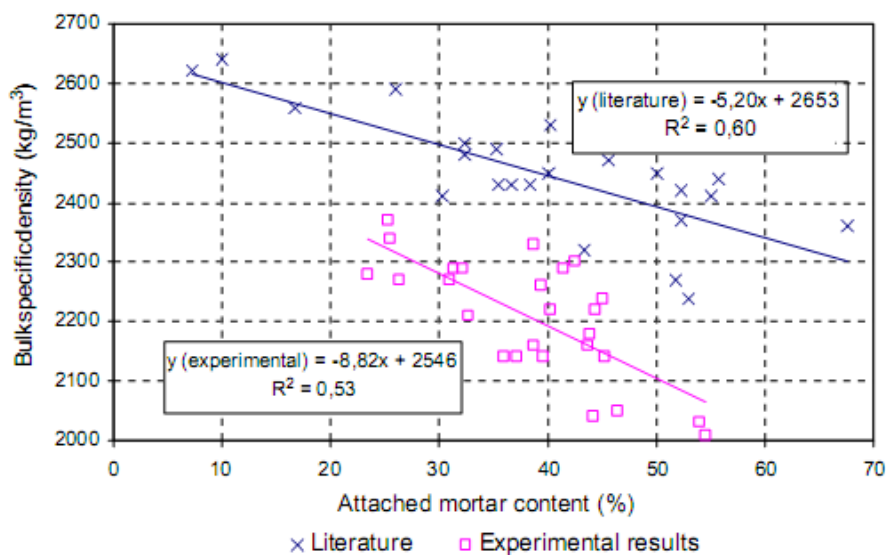


Figure. 1.7 : Relation entre la densité et le taux de mortier résiduel [15].

1.10.3. Absorption

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable (ouverte ou fermée), en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis

de manière prolongée à des basses températures, ainsi qu'à la corrosion des armatures à l'intérieur du béton. En générale, les particules de granulats sont poreuses et peuvent absorber une certaine quantité du liquide.

Les études réalisées sur les granulats recyclés ont révélé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes pour les granulats recyclés que pour les granulats naturels [22, 12, 1, 2, 23, 24, 16]. Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre les granulats recyclés et les granulats naturels [16]. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour des granulats naturels sont souvent en dessous de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [25].

Une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier attaché [3] et par le fait même, ces granulats ont un impact important sur les propriétés du béton. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption des granulats recyclés est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels, la quantité d'eau contenue à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport E/L.

La Figure 1.8 présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 premières minutes [21]. Ce graphique démontre que la plus grande partie d'eau absorbée par le granulat se fait dans les 30 premières minutes comme l'a avancée Malesev [24]. On remarque aussi une absorption très élevée même après seulement 5 minutes (89,2 %). La vitesse de cette absorption diminue significativement par la suite. Il est donc estimé que 90 % du potentiel d'absorption du granulat s'effectue lors des 5 premières minutes.

L'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Étant donné que les granulats secs absorbent une partie de l'eau présente dans le béton frais, il est nécessaire d'ajouter jusqu'à 10 % de l'eau totale pour obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [24].

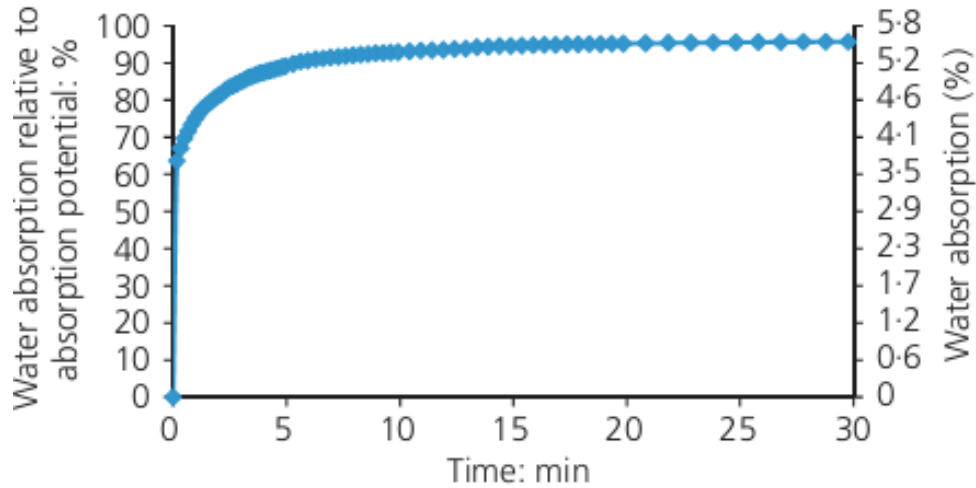


Figure 1.8 : Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [21]

La relation entre le mortier résiduel et la capacité d'absorption d'eau des GBR est présentée dans la figure 1.9. De Juan et Gutiérrez [15] ont également établi une relation inverse entre la densité globale des GBR et la capacité d'absorption d'eau (Figure 1.10). La capacité d'absorption d'eau des GBR est plus rapide et plus élevée par rapport à celle des granulats ordinaires ce qui implique une diminution de l'ouvrabilité pour un même rapport eau/ciment. Donc une quantité d'eau ou d'adjuvant est nécessaire afin de compenser la perte d'ouvrabilité du béton préparé en utilisant des GBR.

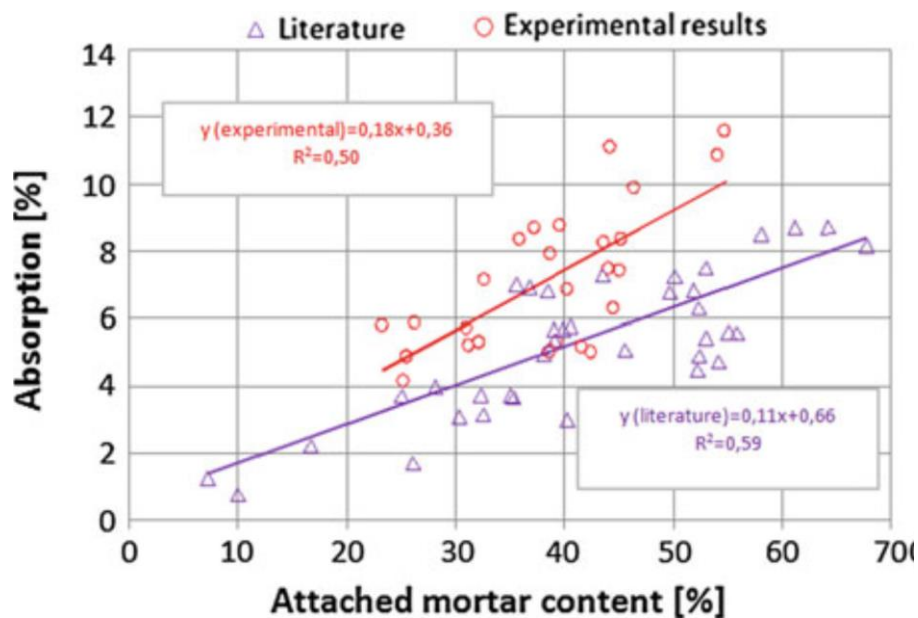


Figure 1.9 : Relation entre mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau des GBR [15].

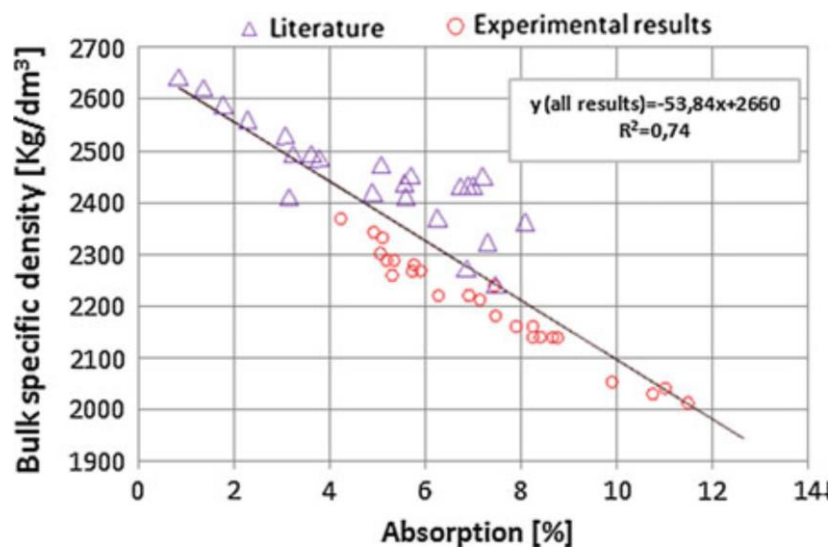


Figure 1.10 : Relations entre la densité et la capacité d'absorption d'eau des GBR [15].

1.10.4. Résistance à l'abrasion

La valeur d'abrasion des granulats est définie comme le pourcentage de perte en poids par abrasion, de sorte qu'une valeur élevée indique une faible résistance à l'abrasion [26]. Plusieurs tests sont effectués pour évaluer la valeur d'abrasion des granulats. Parmi ceux-ci, le test d'abrasion Los Angeles qui est le plus couramment utilisé partout dans le monde et donc les valeurs d'abrasion obtenus à partir de ce test sont signalés dans plusieurs travaux de recherche. Selon la norme ASTM C-33 [27], " la spécification standard pour les granulats du béton, " la valeur d'abrasion Los Angeles devrait être inférieure à 50% pour les granulats utilisés pour la confection du béton, et devrait être inférieure à 40% pour les granulats utilisés dans le domaine routier.

Lors de l'essai de résistance à l'abrasion Los Angeles, tout le mortier résiduel lié au granulat d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion [15]. On observe ainsi une grande perte de masse pour le granulat recyclé ce qui explique des coefficients Los Angeles plus élevés que ceux généralement relevés pour des granulats ordinaires [12, 16, 28]. La résistance à l'abrasion est donc directement reliée à la résistance et à la teneur en mortier résiduel [15].

Le tableau 1.4 montre une comparaison des valeurs d'abrasion Los Angeles entre des GBR et des GN obtenue par différents chercheurs. En général, les granulats recyclés ont une valeur d'abrasion supérieure par rapport aux granulats ordinaires à cause de la présence de mortier résiduel, qui se désintègre lors de l'abrasion en même temps que certaines

parties des granulats ordinaires. Toutefois, ces valeurs pour la majorité des GBR mentionnées dans la littérature répondent aux diverses exigences standards pour le béton et les constructions routières. De Juan et Gutierrez [15] ont constaté une augmentation de la valeur de Los Angeles avec la croissance du contenu en mortier résiduel, qui est présentée dans la figure. 1.11. Même s'il n'est pas clair, la taille des particules des GBR pourrait avoir un certains effets sur la valeur d'abrasion Los Angeles. Hansen et Narud [29] ont trouvé la valeur d'abrasion de 22,4 et 41,4% pour le même type de GBR avec des dimensions de 16-32 mm et 8.4 mm, respectivement. D'autre part, Gonzalez-Fonteboa et Martinez-Abella [30] ont trouvé des valeurs d'abrasion inférieures pour les gros granulats que pour les granulats fins.

Tableau 1.4 : Valeurs d'abrasion Los Angeles des GBR et des GGO.

Référence	Dimension des granulats (mm)	Abrasion de Los Angeles (%)	
		BGR	GGO
Gonzalez-Fonteboa and Martinez-Abella [13]	5 – 40	39.65	–
Gonzalez-Fonteboa and Martinez-Abella [30]	4 – 12	32	32
	10 – 25	34	27
Rao et al. [12]	4 – 20	37.1	21.56
López-Gayarre et al. [31]	4 – 20	37.2, 33.1	24, 26.4
Fonseca et al. [32]	4 – 25.4	42.7	29.5
Gomes et de Brito [33]	<25.4	37.96	28.52
		65.47	

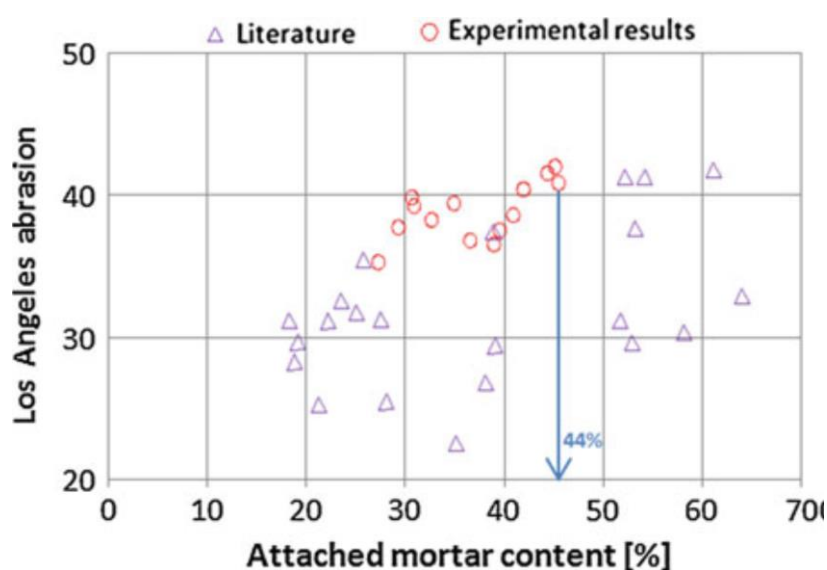


Figure 1.11 : Relation entre le mortier résiduel et la valeur d'abrasion Los Angeles [15]

La valeur d'abrasion Los Angeles des GBR préparés à partir de béton à haute résistance est supérieure à celle préparée à partir de béton de faible résistance [15]. La valeur d'abrasion Los Angeles des GBR peut être améliorée en modifiant la procédure de broyage. Li et *al.* [34] ont trouvé une valeur de l'abrasion Los Angeles de 24,2% pour les GBR broyés à l'aide d'un broyeur à mâchoires, et une valeur de 20% quand un broyeur à percussion est utilisé après broyage des GBR par un concasseur à mâchoires.

1.10.5. Teneur en mortier résiduel et méthodes d'évaluation

La teneur en mortier résiduel est le facteur le plus important pour déterminer la qualité d'un granulat recyclé puisque ses autres propriétés sont liées étroitement à celle-ci. La quantité du mortier résiduel dépend du nombre de processus de broyage dans les usines de production. La teneur en mortier attaché aux granulats peut être réduite en augmentant le nombre de processus de broyage. Cependant, l'augmentation du nombre de processus de broyage augmente les coûts de production des granulats recyclés et donc une optimisation est nécessaire pour obtenir des GBR de haute qualité avec des coûts de production minimaux.

Certains auteurs affirment que le type de broyeur utilisé dans le processus de broyage affecte également le contenu de mortier attaché des GBR [35, 2]. Cette valeur peut varier beaucoup selon le granulat et la méthode utilisée pour la mesurer (20 % à 55 % [22] et 25 à 70 % [15]). Plusieurs auteurs [2, 36] ont également constaté une augmentation du contenu du mortier résiduel dans l'ensemble des GBR avec la diminution de la grandeur de ces derniers. Les GBR préparé à partir d'ancien béton de faible résistance contient moins de mortier résiduel que les GBR préparés à partir d'ancien béton à haute résistance [2; 16].

Comme les autres propriétés du granulat sont directement liées à la teneur en mortier résiduel, il est important de mesurer celle-ci précisément. Quatre techniques sont proposées dans la littérature :

La méthode de la dissolution dans l'acide nitrique consiste à plonger le granulat recyclé dans une solution diluée d'acide nitrique. On chauffe, par la suite, la solution pendant deux heures pour permettre au mortier de se dissoudre. Cependant, cette technique n'est pas adaptée aux granulats recyclés d'origine calcaire [22]. La sensibilité de ceux-ci à l'acide utilisé peut faire en sorte que le granulat d'origine se désagrège en plus du mortier, faussant ainsi les résultats.

Dans la seconde méthode, un nouveau béton est réalisé à partir des GBR avec un ciment coloré. La surface de mortier est facilement détectée au moyen de la différence de couleur entre les deux granulats ordinaire et le nouveau mortier [37].

La méthode du gel/dégel consiste à plonger le granulat dans une solution de sulfate de sodium et de lui faire subir 5 cycles journaliers de gel/dégel. Cette méthode a été adaptée par Abbas et al [38]. Ces cycles sont formés d'une période de 16 heures à -17°C et d'une autre période de 8 heures dans un four à 80°C [1]. Cette méthode utilise une combinaison d'attaque chimique et de contraintes mécaniques induites par le gel pour détacher le mortier du granulat originel.

La méthode de l'expansion thermique consiste à appliquer un gradient de température élevée au granulat afin de rendre le mortier résiduel friable. Pour ce faire, le granulat est saturé d'eau et chauffé dans un four à 500°C pendant 2 heures. Suite à l'application de la température, on plonge le granulat rapidement dans l'eau froide pour le fragiliser [15].

Ces méthodes ont pour but de détacher le mortier résiduel du granulat original afin de déterminer la perte de masse associée à l'élimination du mortier résiduel. La méthode de l'expansion thermique semble être la plus efficace pour détacher le mortier du granulat [22]. En effet, selon cette étude, près de 100% du mortier résiduel est détaché du granulat recyclé en utilisant cette technique. La méthode du gel/dégel est moins efficace puisqu'elle ne détache que 80 à 90% du mortier résiduel. La méthode de la dissolution dans l'acide nitrique est la moins efficace des 4 méthodes, bien qu'il y ait une certaine perte de masse, il reste beaucoup de mortier attaché au granulat [22]. La méthode de l'expansion thermique a aussi l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre que la méthode de gel/dégel [15]. La Figure 1.12 [15], montre que le procédé thermique donne la valeur la plus faible et le procédé de traitement à l'acide le plus élevé.

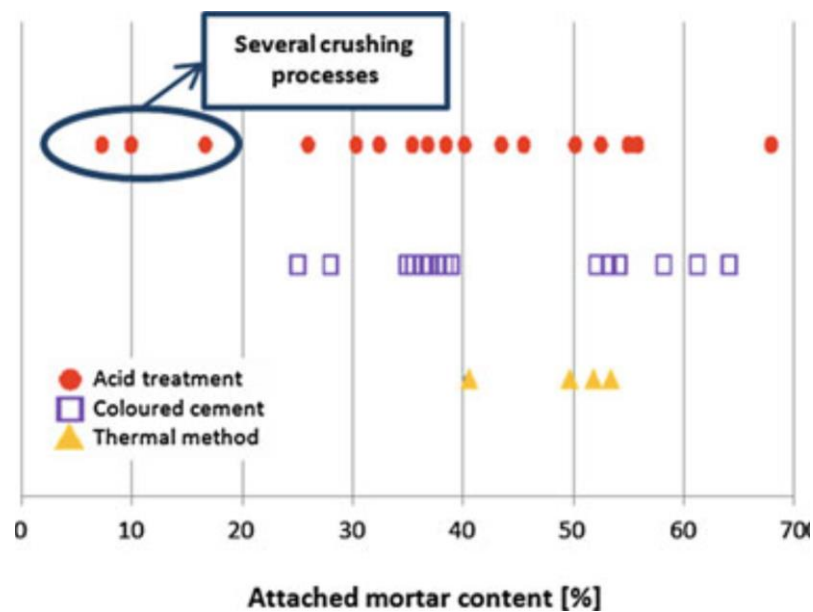


Figure 1.12 : Teneur en mortier résiduel des GBR évalué par diverses méthodes [15]

Plusieurs autres méthodes sont proposées pour supprimer le contenu du mortier résiduel et donc d'améliorer la qualité des GBR [39]. Ce sont le traitement thermique, traitement mécanique, traitement thermique-mécanique, trempage acide, traitement mécanique aux produits chimiques et le traitement assisté par micro-ondes.

Récemment, la méthode d'analyse d'image a été utilisée pour quantifier la teneur en mortier attaché dans les granulats de béton recyclé, dans laquelle il a été montré que les granulats de la pierre de calcaire broyée comprennent des particules généralement recouvertes de résidus de mortier. En outre, plus de 50% de granulats naturels contiennent moins de 15% des résidus de mortier [40].

1.11. Conclusion

Dans le monde il existe un réel potentiel d'utilisation des granulats recyclés dans le secteur de la construction des bâtiments, en génie civil et en travaux routiers. Les techniques modernes de recyclage peuvent aider à réduire l'impact environnemental des déchets de béton, ce qui rend ce produit plus respectueux vis-à-vis de l'environnement. Au même titre que les granulats naturels, les granulats recyclés répondent à des normes et à des réglementations strictes garantissant la connaissance qualitative performante des produits. Cette première étude bibliographique a aussi permis de définir les caractéristiques physique et mécanique des granulats de béton recyclés.

Chapitre 02 :

*Influence des GBR sur
les propriétés du béton*

2.1. Introduction

La thématique des bétons de granulats recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. La plupart des études de la littérature axent la problématique sur l'analyse des résistances mécaniques des bétons de granulats recyclés liées aux propriétés des bétons initiaux, appelés bétons parents, et aussi sur leur durabilité. Cette partie bibliographique présente les éléments essentiels à l'étude de la rhéologie du béton de granulats recyclés à l'état frais et la caractérisation de ses propriétés physiques et mécaniques à l'état durci.

2.2. Technique d'utilisation des granulats recyclés

Il est clair que les états d'humidité des GBR peuvent modifier l'ouvrabilité et l'uniformité des mélanges de béton et donc aurait une incidence sur les propriétés du béton durci. S'il nous semble évident que la saturation des granulats recyclés avant le gâchage permet d'inhiber leur forte absorption d'eau, il existe plusieurs techniques de pré-saturation qui présentent des résultats plus ou moins efficaces.

2.2.1. Ajout de la quantité d'eau exacte d'absorption

La quantité d'eau ajoutée dépend de la teneur initiale en eau et l'absorption efficace des granulats recyclés. L'absorption d'eau potentielle et l'évolution de l'absorption avec le temps des granulats recyclés devraient également être connues afin de prédire le rapport E/C après le malaxage. Cela devrait garantir que l'eau ajoutée correspond bien à la quantité d'eau absorbée par les GBR. La méthode de compensation de l'eau de gâchage a l'avantage de rendre possible la production du béton de GBR et le béton ordinaire d'une manière similaire. Cependant, Barra [41] note que l'absorption d'eau des GBR lors du malaxage du béton peut ne pas correspondre à l'absorption d'eau libre déterminée dans le laboratoire, car les pores des GBR sont remplis avec de la pâte de ciment pendant le malaxage, ce qui peut conduire à un excès d'eau dans le mélange, et ainsi une augmentation indésirable dans le rapport E/C efficace. Cette situation est plus probable tant que le mélange le plus riche en eau est dans la pâte de ciment.

2.2.2. Immersion dans l'eau avant le malaxage

Cette technique consiste à ajouter les GBR au mélange à l'état saturé, en annulant l'absorption d'eau du mélange, ou presque saturée, ce qui rend l'absorption d'eau négligeable. Le but de cette méthode est de réduire l'échange d'eau entre les granulats et la pâte de ciment, autant que possible. Il est suggéré par de nombreux chercheurs en tant que moyen d'améliorer l'homogénéité de la teneur en eau des granulats et de préserver le rapport E/C de la pâte de ciment. Les principaux problèmes de cette méthode sont comment définir la quantité d'eau nécessaire pour la pré-saturation et comment y atteindre. Des auteurs tels que Nealen et Schenk [42] observent que les granulats doivent être complètement saturés afin d'arrêter tout transfert d'eau dans les agrégats. Cependant, Barra [41] et Poon et *al.* [18] suggèrent que le point de saturation ne doit pas être atteint en raison du risque de ressuyage, qui est le transfert de l'eau de l'intérieur des granulats à la pâte de ciment. Ce ressuyage pourrait modifier le rapport E/C dans l'interface de la zone de transition (ITZ) entre les GBR et la pâte de ciment, ce qui affecte la force de liaison.

Les GBR peuvent être pré-saturées par l'immersion dans l'eau pendant une période de temps déterminée. La surface du granulat doit, cependant, être séchée parce que l'eau de surface pourrait augmenter le rapport E/C. A cause de la difficulté de garantir cette condition à grande échelle, Etxeberria et *al.* [2] suggèrent l'utilisation d'arroseurs sur les granulats dans le chantier. Mais Lima [43] estime qu'il y aurait des problèmes d'homogénéité et le risque que les particules fines soit emportées. Pour cette raison, l'auteur suggère que la pré-saturation devrait être effectuée à l'intérieur du mélangeur. Encore cela pourrait provoquer la désintégration du mortier attaché, en changeant la distribution granulométrique des particules du mélange. Pour cette dernière alternative, il est fondamental de connaître le processus d'absorption de l'eau par des GBR en détail, en particulier pendant la phase de pré-saturation.

2.3. Facteurs affectant les propriétés du béton

2.3.1. Rapport E/C

Le rapport E/C est un des facteurs de formulation les plus importants pour les bétons en général. Il existe une grande corrélation entre le rapport E/C et la résistance finale du béton. Il semble que l'impact négatif du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé augmente quand le rapport E/C diminue. La perte de résistance causée par

L'utilisation d'un granulats recyclés est fonction de la résistance finale du béton et par le fait même de son rapport E/C. À cet effet, il est recommandé d'utiliser des granulats recyclés dans les bétons à résistance « moyenne » (20 à 40 MPa) puisque l'obtention de résistance plus élevée nécessite un apport en ciment plus grand et, par le fait même, des coûts plus élevés [2]. Une étude de Sagoe-Crentsil et al. [44] montre que la résistance à la compression à 28 jours est la même pour le béton à granulats recyclés que pour le béton témoin pour un rapport E/C élevé (0,7) [44]. D'autres études réalisées avec des rapports E/C inférieurs à 0,7 ont trouvé une baisse des résistances de 10 % [45] ou même plus [2, 46] dans les bétons incorporant des granulats recyclés par rapport aux bétons témoins.

Il est aussi intéressant de noter que pour un rapport E/C total constant et lorsque le granulats recyclés n'est pas pré-saturé lors de la formulation, il est possible que la grande absorption des granulats recyclés diminue le rapport E/C effectif et, par conséquent, compense l'impact négatif des granulats recyclés sur la résistance à la compression [47]. Ceci peut cependant avoir un effet négatif sur l'affaissement.

2.3.2. Teneur et qualité du mortier attaché

La teneur et la qualité du mortier résiduel ont une grande influence sur plusieurs propriétés du granulats recyclés, dont l'absorption. Une comparaison a été effectuée par Yang [48] entre des bétons utilisant deux types de granulats recyclés dont la principale différence est leurs absorptions. Il a été observé que les bétons incorporant le granulats ayant une absorption plus faible (1,9 %) ont une résistance à la compression similaire au béton témoin, par contre l'utilisation du granulats ayant une plus grande absorption (6,2 %), affecte négativement la résistance à la compression du béton. On a observé des résistances de 20 à 40% inférieures des bétons utilisant ces granulats par rapport au béton témoin pour un rapport E/C de 0,5 [48].

Comme mentionné précédemment, la qualité du mortier résiduel attaché au granulats recyclés a un impact important sur la résistance du béton formulé avec ces granulats. L'impact de la qualité du mortier résiduel sur la résistance à la compression du béton vient du fait que la qualité du mortier contrôle la microdureté Vickers de la vieille interface granulats-pâte. Or, il a été démontré que plus la microdureté Vickers de la vieille interface augmente, plus la résistance à la compression du béton augmente [49]. Ceci est

généralement vrai pour les bétons ayant un rapport E/C relativement faible puisque dans ce cas, la vieille interface est moins résistante que la nouvelle interface formée entre le gros granulat et le mortier. Pour des rapports E/C plus élevés (0,55 dans le cas de l'étude de Otsuki), l'impact de la qualité du mortier résiduel diminue puisque pour ces rapports E/C la nouvelle interface est plus faible que la vieille interface. La qualité du mortier résiduel a donc peu d'impact dans un béton proportionné avec un rapport E/C plus élevé car c'est la nouvelle interface qui contrôle la résistance.

Des observations similaires ont été relevées par Peng [50] qui a conclu que pour un granulat recyclé provenant d'un béton à faible rapport E/C (0,255) les résistances mécaniques étaient contrôlées par les défauts dans le granulat original alors que dans le cas de granulats provenant de bétons à rapport E/C plus élevés (0,586), le mortier résiduel contrôle les résistances mécaniques obtenues.

2.3.3. Granulométrie du granulat recyclé

La granulométrie des granulats recyclés diminue la résistance du béton entre 10 à 35%. Plus la taille maximale de ces granulats est petite plus la réduction de la résistance mécanique observée est élevée [16]. Il peut donc être nécessaire de diminuer le rapport E/C pour maintenir la même résistance à la compression.

2.3.4. Méthode de préparation et teneur en eau du granulat

La méthode de préparation du béton est étroitement liée à la teneur en eau des granulats lors de la préparation. Plusieurs méthodes de préparation et de formulation ont été développées spécifiquement pour les bétons contenant les granulats recyclés. Ces méthodes de préparation alternatives cherchent généralement à compenser l'effet négatif de la grande absorption des granulats sur les propriétés du béton. La grande absorption du granulat recyclé fait en sorte qu'il peut absorber l'eau du mélange s'il n'est pas humide ou saturé lors de la préparation du béton. Plusieurs méthodes sont utilisées pour contrôler ce problème avec des résultats parfois contradictoires.

Par exemple, Butler et al. [22] a observé une augmentation des résistances à la compression de 28% et 8% par rapport aux granulats naturels pour des bétons de 30 et 50 MPa respectivement en utilisant des granulats pré saturés pendant 24 heures. Il obtient

donc d'excellents résultats avec un granulat saturé à 100% alors que d'autres chercheurs conseillent une saturation de 90% du granulat [2, 21]. Selon ces chercheurs, un granulat saturé à 100% a plus de chance de causer des ressuyages et, par le fait même, une diminution des propriétés du béton. De Oliveira et Vazquez [51] ont quant à eux observé qu'il n'y avait pas de variation significative entre les bétons utilisant des granulats recyclés à des teneurs en eau variables pour un béton de rapport E/C de 0,5.

Une des méthodes de formulation de bétons à granulats recyclés est la méthode du mélange en deux étapes [3]. Cette méthode a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton en améliorant la qualité de l'interface granulat/pâte. Une autre méthode de formulation du béton recyclé est la méthode du mortier équivalent [52, 53]. Cette méthode cherche à diminuer l'apport en ciment au béton en considérant le mortier résiduel attaché au granulat recyclé comme faisant partie du mortier total du béton.

2.3.5. Taux de remplacement

Le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé a un impact très important sur les propriétés du béton recyclé. Bien que l'impact pour un taux de remplacement de 100% varie beaucoup en fonction des mélanges et des études, il est clair que l'impact sur les propriétés du béton est fonction du taux de remplacement. L'impact du remplacement de 50% des granulats naturel sera donc presque toujours moindre que lors du remplacement de 100%.

Bien qu'un taux de remplacement de 100% des granulats naturels ait dans la plupart des cas un impact négatif sur la résistance à la compression et certaines autres propriétés du béton, il semble exister un taux de remplacement pour lequel l'utilisation de granulats recyclés n'a pas d'impact négatif observable. Pour ce taux de remplacement, il n'y a pas d'impact significatif lors du remplacement d'une portion des granulats naturels par des granulats recyclés. La valeur de ce taux de remplacement varie, où, beaucoup d'études relient ce taux en fonction des formules de mélanges et des paramètres analysés. Les valeurs de remplacement généralement proposées dans la littérature se situent entre 20 et 50% [12, 2, 6].

2.4. Propriétés du béton à l'état frais

2.4.1. Ouvrabilité et Densité à l'état frais

Il apparaît généralement que l'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton contenant un granulats naturel pour un même rapport E/C [12, 22, 47]. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, selon Butler [22], on observe une augmentation de 3,1 à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton [22].

La grande absorption des granulats recyclés peut affecter l'ouvrabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons incorporant ceux-ci puisque les granulats non saturés (secs) peuvent absorber l'eau du mélange lors du malaxage [22]. Il reste donc moins d'eau libre pouvant servir à lubrifier les composantes du béton, diminuant par le fait même son affaissement.

Il est, cependant, possible d'atteindre le même affaissement après un certain temps si l'on ajoute l'eau nécessaire à remplir la porosité du granulats recyclé selon Malesev [24]. Cet auteur rapporte que, pour un béton de rapport E/C de 0,5, l'affaissement reste sensiblement le même si les granulats sont à l'état saturé et avec une surface sèche (SSS), peu importe le type de granulats. Il est aussi possible d'obtenir le même affaissement en faisant varier le rapport E/C du béton. Dans le cas de rapport E/C élevé égal à 0,7, on observe le même affaissement pour le béton témoin et le béton contenant les granulats recyclés [44].

La masse volumique à l'état frais est plus faible pour les bétons fabriqués avec des granulats recyclés par rapport aux bétons fabriqués avec des granulats ordinaires. Cela serait dû à la grande proportion de mortier total dans le béton fabriqué avec des granulats recyclés [1]. De plus, il a été observé que la teneur en air entraînée ne semble pas être affectée par l'utilisation d'un granulats recyclé [24, 44].

En raison de la faible densité du vieux mortier de ciment qui reste collé à l'ensemble, les bétons de granulats recyclés ont généralement une densité légèrement inférieure à celle du béton ordinaire, tel que présenté dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Densité des granulats naturels et recyclés [29]

Type de granulats	Dimension (mm)	Densité
Gravier naturel	4-8	2.50
	8-18	2.62
	16-32	2.61
Agrégats recyclé (à partir d'un béton de haute résistance)	4-8	2.34
	8-18	2.45
	16-32	2.49
Agrégats recyclé (à partir d'un béton de faible résistance)	4-8	2.34
	8-18	2.42
	16-32	2.49

Mathias et *al.* [54] ont noté que la forte capacité d'absorption d'eau des GBR a une grande influence sur l'eau de gâchage qui peut affecter l'ouvrabilité du béton. Ainsi, il est nécessaire d'estimer la quantité d'eau de gâchage qui est absorbée par les GBR pour déterminer et préciser le temps de malaxage ce qui peut affecter l'ouvrabilité et la résistance du béton. Padmini et *al.* [16] ont également signalé que 10 minutes d'immersion des GBR dans l'eau satisfait d'atteindre l'ouvrabilité désirée du béton.

La pré-saturation des GBR avant la préparation du béton peut empêcher l'absorption de l'eau de gâchage [55]. Cependant, la saturation complète des GBR peut améliorer la maniabilité pendant la préparation du mélange de béton [17] et affecte les performances mécaniques du béton, du fait de la formation d'une faible zone de transition interfaciale entre les GBR et la nouvelle pâte de ciment [2].

2.4.2. Rhéologie

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement d'une mixture. Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement, viscosité plastique). Plusieurs méthodes d'essai sont actuellement disponibles pour estimer les différents types de comportement rhéologique du béton frais. Les exemples sont l'étalement, L-box et le teste V-funnel, où certains concernent les mélanges très fluide.

Pour une meilleure évaluation des paramètres rhéologiques spécifiques, les viscosimètres peuvent être utilisés pour obtenir des quantités physiques. La géométrie de cylindre coaxial pour béton frais, a été utilisée avec de bons résultats depuis sa première utilisation en 1941 par Power et Wiler [56], suivie par Tattersall et Banfill [57] et Wallevik [58], et peut extraire les paramètres du modèle de Bingham, à savoir, la viscosité plastique μ et la tension τ_0 .

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

Knaack et Kurama [59] ont étudié le comportement rhéologique des BGR conçus selon diverses méthodes, le remplacement direct de poids (DWR), le remplacement direct du volume (DVR) et la méthode du volume de mortier équivalent (EMV) [1]. Ils ont conclu que par rapport à la conception classique des BGR (DWR, DVR), l'ouvrabilité des mélanges de béton de la nouvelle méthode (EMV) est considérablement améliorée. Il convient de noter que le comportement rhéologique a été analysé selon l'essai du 'mini-con', une variation sur le test classique décrit par les mêmes auteurs [59].

La rhéologie du béton a été largement étudiée et la littérature confirme que le béton ordinaire, avec des valeurs d'ouvrabilité supérieures à 8 cm et aucune ségrégation sous l'action de la gravité, peut être considéré comme un fluide Binghamien [60, 61]. L'écoulement d'un matériau granulaire, tel que le béton frais, peut donc être considéré comme un fluide, et doit être décrit par au moins deux paramètres, à savoir, la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique, telle que définie par l'équation de Bingham. Cette équation est la plus couramment utilisée, parce que ses paramètres peuvent être mesurés indépendamment, et aussi parce que l'écoulement du vrai béton obéit à ce comportement. D'autres modèles peuvent également être utilisés pour modéliser les écoulements de béton frais comme le montre la figure 2.1, comme l'équation de Herschel-Bulkley, qui décrit le mieux le comportement du béton autoplaçant [61]. Avec ces hypothèses, le béton frais est représenté comme un fluide viscoplastique, caractérisé par le seuil de cisaillement τ_0 [Pa],

qui doit être dépassée avant qu'une déformation significative peut se produire. Après la motion de déclenchement, une relation linéaire associe la contrainte de cisaillement τ avec le taux de cisaillement appliqué $\dot{\gamma}$, appelée viscosité plastique μ [Pa.S]. La figure 2.1 montre la courbe d'écoulement d'un fluide Binghamien, qui peut également être décrite par l'équation (3.1), où $\eta(\dot{\gamma})$ représente la viscosité de cisaillement, en fonction du taux de cisaillement d'un fluide non newtonien:

$$\begin{cases} \tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} = \left(\mu + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}\right)\dot{\gamma} = \mu\dot{\gamma} + \tau_0 \text{ avec } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 \text{ avec } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

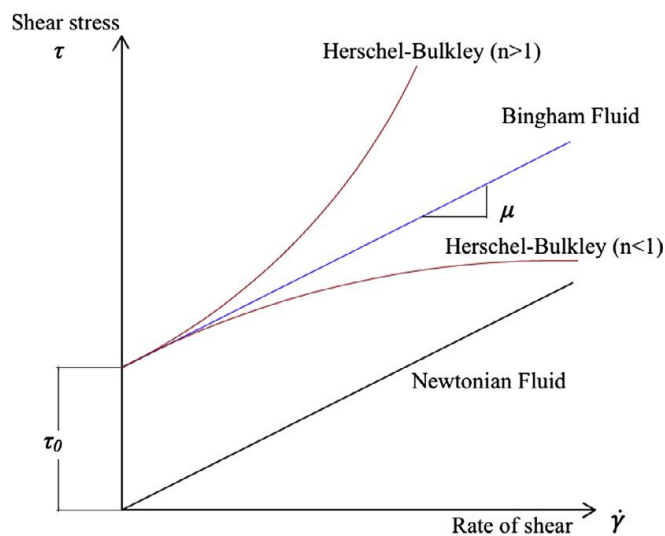


Figure 2.1 : La courbe d'écoulement des fluides Binghamiens.

Faleschini et *al.* [52] ont étudié les propriétés rhéologiques de différents mélanges de béton réalisés avec différentes méthodes de malaxage y compris EMV. Le béton de granulats recyclés a été modélisé comme un fluide Binghamien, alors la viscosité μ et le seuil de cisaillement τ_0 peuvent correctement décrire son comportement rhéologique. Le seuil de cisaillement et la viscosité ont été obtenus avec un viscosimètre ConTec BML 3 (figure 2.2), dans le but d'étudier le comportement de l'écoulement du béton avec des teneurs différentes de GBR. Les paramètres rhéologiques physiques des échantillons de béton frais ont été calculés avec l'équation Reiner-Rivlin [63;64]. Les résultats obtenus montrent qu'une grande teneur en superplastifiant réduit les valeurs du seuil de cisaillement pour les différents rapports de E/C, en particulier pour E/C = 0,4. Une teneur en eau élevée entraîne une réduction générale tant dans la viscosité et le seuil de

cisaillement dans tous les mélanges. Une étude paramétrique a donc été menée afin d'optimiser le protocole de fabrication de bétons fabriqués à partir de ces granulats.



Figure 2.2 : Viscosimètre ConTec BML 3 [52].

2.5. Propriétés à l'état durcie

2.5.1. Zone interfaciale de transition

Il n'est pas tout à fait exact de considérer le matériau béton comme étant un composite à deux phases ; granulats et matrice cimentaire. En réalité, la pâte de ciment n'est pas complètement homogène et sa microstructure est modifiée à proximité des granulats. Cette zone est généralement appelée « zone de transition interfaciale » ou ITZ (Interfacial Transition Zone). Bien que la zone de transition à l'interface granulats-pâte soit relativement étroite, elle occupe une proportion relativement grande du volume de la pâte de ciment. Pour une zone de transition de 40 μm d'épaisseur, ce volume se situe entre 20 %

et 40 % du volume de la matrice cimentaire [3]. Cette zone de transition a beaucoup d'influence sur les propriétés du béton et représente le maillon faible et la source de faiblesse pour le béton [65]. Pour cette raison, la zone de transition est généralement la cause de rupture du béton à des contraintes inférieures à la résistance individuelle de ses deux composantes (matrice de mortier et granulats grossiers).

La zone de transition à l'interface granulats-pâte sert de lien entre la matrice de mortier et le gros granulats. Ce lien entre les deux composantes majeures a un impact critique sur les propriétés mécaniques du béton [3]. Même lorsque la résistance de ces deux composantes est élevée, la résistance du béton peut être basse à cause de défauts dans le lien entre les granulats et la pâte, tels que les vides et les microfissures dans cette zone de transition), qui ne permettent pas de transférer les efforts [65]. Il est donc pertinent de considérer l'interface granulats-pâte lorsqu'on évalue la résistance mécanique et la durabilité du béton.

En comparaison avec des granulats ordinaires, les granulats recyclés sont plus poreux et habituellement partiellement carbonatés en raison de l'adhérence des anciennes pâtes de ciment sur la surface des granulats. La microstructure ITZ du béton de granulats recyclés sera différente de celle du béton de granulats ordinaires [18]. La particularité des bétons recyclés est que ceux-ci ont deux zones de transition distinctes, contrairement aux bétons conventionnels qui n'ont qu'une zone de transition. La première zone de transition est à l'interface granulats d'origine-mortier résiduel et la seconde est à l'interface mortier résiduel-nouveau mortier [49]. Les figures 2.3 et 2.4 ci-dessous illustrent bien cette différence.

Dans le cas des bétons fabriqués à partir de granulats recyclés, il a été montré dans différentes études que la présence d'ancien mortier autour des granulats améliore significativement les performances mécaniques de la zone de transition. En effet, on observe une bonne interaction entre l'ancien et le nouveau mortier et également une bonne résistance à l'abrasion [46].

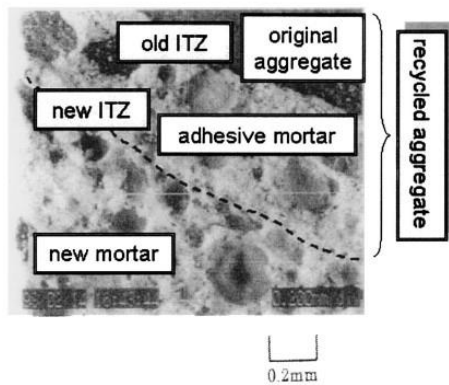


Figure 2.3 : Zone de transition à l'interface granulats/pâte d'un béton recyclé [49]

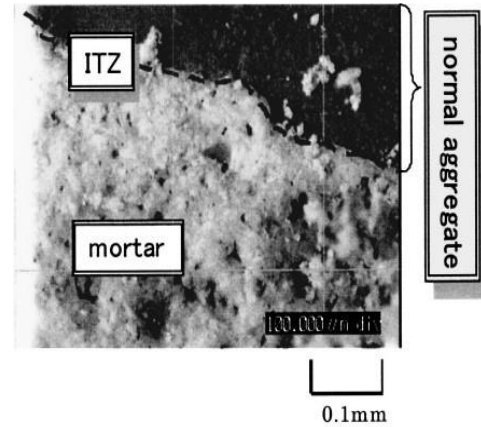


Figure 2.4 : Zone de transition à l'interface granulats/pâte d'un béton ordinaire [49]

La microdureté Vickers de la nouvelle zone de transition augmente lorsque le rapport E/L diminue pour les bétons incorporant des granulats recyclés ainsi que pour les bétons contenant des granulats naturels. La microdureté Vickers de la vieille zone de transition est quant à elle contrôlée par la qualité du mortier résiduel. La quantité de mortier attaché au granulats recyclés ne semble pas avoir d'impact sur la microdureté Vickers de la vieille zone de transition [49].

2.5.2. Perméabilité / porosité

La perméabilité du béton se définit comme la capacité d'un fluide à passer à travers un solide poreux tel que le béton. Comme la perméabilité du béton détermine la facilité avec laquelle le béton peut devenir saturé avec de l'eau, elle a un impact important sur plusieurs propriétés liées à la durabilité du béton, telles que la résistance au gel/dégel et la résistance à la pénétration des ions de chlorures [67].

La perméabilité à l'eau du béton augmente avec le taux de remplacement du granulats naturels [12, 23, 24, 66, 67]. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés qui est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels. Cette augmentation n'a, cependant, pas été observée pour un taux de remplacement de 20% selon certains travaux [67]

Une légère diminution de la perméabilité a été observée dans le cas de l'étude de Levy et Helene [23] et Tam et Tam [67], celle-ci est attribuée au changement de la granulométrie causée par l'ajout de 20% de granulats recyclés. Selon ces auteurs, le mélange de granulats dans le béton à 20% de remplacement aurait un meilleur facteur de

compaction. Le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé ne semble pas avoir d'impact significatif pour un béton à un rapport E/C élevé de 0,7 [44].

Il a été largement prouvé que les bétons fabriqués à partir de granulats recyclés sont nettement plus perméables que les bétons classiques, cela dit, il faut tout de même noter que cette perméabilité peut facilement être réduite en utilisant des fines (cendres volantes, fillers, fumée de silice... etc.).

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Ceci a un impact important sur la durabilité du béton, notamment sur sa résistance au gel/dégel. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire, et cela est d'autant plus significative quand le taux de remplacement est important [44, 28, 68]. Cela est suivi par une diminution de la densité totale du matériau de l'ordre de 5 à 10% pour une substitution de 100% des gravillons naturels par des granulats recyclés. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de 14% à 20,1%. Cependant il a été observé une diminution de porosité significative une fois que le béton a mûri quelques temps. En effet, Gomez-Soberon [20] a montré que le taux de remplacement des granulats est directement corrélé au volume total des pores et à leurs tailles, mais que si cette influence est tout à fait vérifiée au jeune âge du béton, elle s'atténue à mesure que le béton vieillit. Ceci semble dû à la cristallisation de nouveaux produits qui réduisent à la fois le nombre et la taille des pores.

Selon certains auteurs [12, 69, 23], le volume de pore augmente en fonction du taux de remplacement. La porosité totale et le volume moyen des pores augmentent avec le taux de remplacement [69]. Cette augmentation n'a pas été observée pour un taux de remplacement de 20% selon certains résultats [23]. La légère diminution observée dans ce cas peut être due au changement de la granulométrie par rapport au béton témoin. Le béton à 20% de taux de remplacement aurait un meilleur facteur de compaction. Des résultats divergents sont, par contre, observés dans l'étude récente de Kou et al. [46] où les bétons à granulats recyclés et naturels ont une porosité similaire à 28 jours. La porosité du béton à granulat recyclé diminue, par contre, davantage entre 28 jours et 5 ans que celle du béton à base de granulat naturel [46].

2.5.3. Propriétés mécaniques

2.5.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton est un des paramètres fondamentaux employés pour évaluer la qualité d'un béton. En général, la majorité des chercheurs ont observés entre 5% à 30% de diminution dans la résistance à la compression du béton fait de gros agrégats recyclés [70, 71, 72], en fonction de la qualité du béton et la composition du mélange [73]. En 1977, Buck [4] réalise l'une des premières enquêtes sur les propriétés du BGR. Il a utilisé le béton à partir de différentes sources d'agrégats dans le nouveau béton. Il a gardé le rapport eau/ciment constant, il a observé une diminution moyenne de résistance de 20% dans le BGR. Güneyisi et *al.* [74] confirment que la réduction de la résistance à la compression est due à l'augmentation de la teneur en granulats recyclés

Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à 28 jours du béton [51, 45]. Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon les résultats d'Etxeberria et *al.* [2], la résistance à 28 jours serait de 20 à 25% plus faible de 33% et 23% selon Topcu [68], de 22% selon Kou [46], de 20 à 30% selon Martinez-Lage [75] alors que selon Sagoe-Crentsil et *al.* [44] la résistance à 28 jours serait la même que pour le béton témoin. Il est à noter que dans le cas cette étude, un rapport E/C très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulats naturel par un granulats recyclés n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons.

Hansen et Narud [29] font différentes qualités du BGR avec des bétons à haute résistance ($E/C = 0,40$), moyen-résistance ($E/C = 0,70$) et à faible résistance ($E/C = 1,20$) comme agrégat. Les trois BGR ont été préparés avec les mêmes proportions du mélange que les trois bétons d'origine. Tous les types ont été ensuite durcis dans les mêmes conditions que les bétons d'origine c'est à dire dans l'eau à 40 degrés Celsius et des essais de résistance à la compression à 28 jours. Il a été montré que les trois types BGR gagnent à peu près la même résistance que les bétons d'origine. Ils ont donc conclu que la résistance à la compression du béton recyclé dépend de la résistance du béton d'origine, et qu'il est largement influencé par une combinaison du rapport E/C du béton d'origine et celle du GBR.

Poon et *al.* [17] ont également observé que des granulats recyclés ont une forme plus anguleuse et une texture de surface rugueuse par rapport aux granulats naturels qui peuvent conduire à une meilleure liaison et une plus grande résistance du BGR. Ils ont affirmé que pour augmenter la résistance à la compression, les agrégats recyclés devraient être séchés au four pour créer la liaison interfaciale entre la pâte de ciment et les granulats.

Corinaldesi et Moriconi [35] ont étudié l'effet des cendres volantes et des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du BGR. Ils ont observé que la force peut être améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des cendres volantes ou la fumée de silice dans le mélange.

Braymand et *al.* [76] ont fait une étude pour identifier les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés. Il a été montré qu'il est possible d'obtenir des bétons de granulats recyclés pour lesquels les résistances mécaniques sont comparables à celles de bétons classiques, sous réserve que la mise en œuvre soit facilitée par l'ajout d'adjuvants. Les meilleures résistances mécaniques obtenues sont attribuées d'une part à une bonne liaison pâte-granat recyclé et d'autre part à l'origine des granulats et leur degré de contamination par d'autres matériaux de démolition.

Kenai et Debieb [66] ont étudié la résistance à la compression des granulats de béton et de briques concassées, ils ont constaté qu'une chute est survenue en fonction de l'augmentation du pourcentage de substitution en granulats recyclés (gros et fins). Cette chute est due principalement à l'effet du mortier provenant de l'ancien béton qui reste attaché aux granulats recyclés et qui gêne le bon déroulement de l'hydratation du ciment. Elle est due aussi à l'augmentation du rapport E_{eff}/C et à la présence de poussière de concassage qui augmente la quantité d'eau efficace pour maintenir la consistance et par la suite diminue la résistance. 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.

Katz [36] et Rao et *al.* [7] ont également constaté que pourvu que le rapport E/C soit supérieur ou égal à 0.55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de 100%. Cette tendance est liée au fait qu'à un rapport E/C élevé, la résistance à la compression est liée à la qualité de

la pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats. En revanche, avec un rapport E/C réduit à 0.4, la valeur de la résistance chute de 25%. Les études réalisées jusqu'à présent cherchant à relier la résistance à la compression aux conditions de préparation des granulats (séchés en étuve, séchés à l'air, imbibés surface sèche...) n'ont pas donné de résultats très concluants [17, 6]. De manière générale, on peut dire que plus le rapport granulats recyclés/granulats naturels augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises. [77, 20, 68].

2.5.3.2. Résistance à la traction et à la flexion

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer leurs qualités. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction directe, la traction par flexion ou par la traction par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe [1]. Il semble généralement que la baisse de cette résistance, associée au remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés dans le béton, soit de 10% [46], 10 à 15% dans le cas de Tabsh et Abdelfatah [78].

Les études réalisées concernant la résistance à la traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% [6] et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours [79]. De même, il a été constaté que l'utilisation de divers additions, telles que la fumée de silice, permet d'améliorer les performances du béton recyclé. De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel. [20]

Comme plusieurs autres propriétés du béton, on observe que la résistance à la traction du béton diminue lorsque le taux de remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés augmente [12, 80, 6]. Yang et al. [48] a aussi trouvé qu'en variant le taux de remplacement du granulats naturels, la résistance à la traction diminue et la porosité augmente. Dans cette étude, l'impact du remplacement de deux granulats recyclés à porosité différentes a été évalué. Il a été observé que la résistance à la traction était moins

grande pour le béton utilisant un granulats recyclé très poreux que pour un granulats recyclé peu poreux [81]. Le remplacement d'un granulats naturel par un granulats recyclé aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction que sur la résistance à la compression.

Etxeberria *et al.* [2] ont trouvé que la résistance à la traction du béton de granulats recyclés peut être plus élevée que celle du béton ordinaire pour des taux de remplacement qui ne dépasse pas les 25%. Berredjem et Arabi [82] ont trouvé que l'écart de résistance en traction entre les différents bétons est assez faible. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important sur la résistance à la traction et que la rugosité des granulats recyclés est très importante ce qui a amélioré l'adhérence pâte granulats.

Butler *et al.* [22] ont trouvé une forte relation entre la valeur de concassage des granulats et la résistance à la traction. Quand cette valeur augmente, la résistance à la traction du béton diminue. La résistance à la traction devient plus sensible à la résistance des gros granulats ou à la valeur de concassage des granulats dans les grandes résistances à la compression du béton.

2.5.3.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young est normalement représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte-déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée [38].

Différents auteurs [20] se sont intéressés à la question du module d'élasticité. Habituellement, le module d'élasticité d'un BGR fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ 25% à 40% de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ 10% à 33% de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats [80, 83]. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, mais il a été montré que cette porosité diminue avec le temps et donc que la différence de module d'élasticité s'affaiblit [20].

Pour un taux de remplacement du granulats de 100%, on observe des chutes variant de 28 % du module d'élasticité [80], de 35% [12] de 30 à 40% [75] et de 44% [84]. L'impact sur le module d'élasticité est donc moins grand pour un taux de remplacement

plus bas. L'impact d'un bas taux de remplacement sur le module d'élasticité n'est pas le même pour toutes les études sur le sujet. Selon Lopez-Gayarre [47], il n'y a pas d'impact sur le module d'élasticité pour un taux de remplacement inférieur à 50% alors que selon Corinaldesi [35], la différence avec le béton témoin est de 15%.

Selon une étude de Rahal [45], on observe une perte de seulement 3% au niveau du module d'élasticité pour un béton recyclé de rapport E/C de 0,55 et de résistance entre 25 et 30 MPa. Finalement, selon Yang et al [48]; le module d'élasticité diminue lorsque l'absorption du granulat recyclé utilisé augmente [48]. Corinaldesi et Moriconi [35] ont étudié l'effet de la fumée de silice et des cendres volantes sur l'amélioration du module d'élasticité du BGR. Ils ont observé que la résistance peut être améliorée pour égaler ou dépasser celle du béton de granulats naturels en ajoutant des cendres volantes ou de la fumée de silice dans le mélange.

Le module d'élasticité des bétons de granulats recyclés est réduit lorsque le pourcentage d'agrégats recyclé augmente. Cette situation a été prévue, parce que les granulats recyclés sont plus déformable que les agrégats bruts. Etxeberria et al. (2007) [2] ont trouvé que le module d'élasticité des bétons de granulats recyclés diminue lorsque le pourcentage d'agrégats recyclés augmente. Cette situation a été prévue, parce que les granulats recyclés sont plus déformables que les agrégats naturels. Ce résultat est attendu car les granulats de béton recyclé ont un module plus faible que les granulats naturels et, en plus, il est bien connu que le module d'élasticité du béton dépend en grande partie du module des agrégats. Les effets de trois différentes conditions d'humidité sur les bétons d'agrégats recyclé sont comparées (sèche, saturée et semi saturés). Le module d'élasticité des bétons d'agrégats recyclés est toujours inférieur à celui des bétons ordinaires [41].

2.6. Propriétés liées à la durabilité

2.6.1. Retrait et fluage

Le retrait est une mesure du changement volumétrique du béton libre de chargement extérieur. Le béton se dilate avec l'accroissement de la teneur en eau et se contracte avec la perte d'humidité. La contraction normalement observée lors du séchage est appelée retrait de séchage. Ce changement de volume peut causer la fissuration. C'est un aspect important de la durabilité du béton.

José Manuel Gómez-Soberón [20] a fait une analyse expérimentale pour obtenir les propriétés de retrait endogène et de séchage du béton contenant des granulats de béton recyclé. Pour le retrait de séchage (figure 2.5) il indique que le taux de retrait est élevé aux jeunes âges, puis ralentit avec le temps. Les facteurs de remplacement des granulats de béton recyclé par des granulats naturel supérieur à 30% provoquent une augmentation rapide dans les valeurs de retrait de séchage.

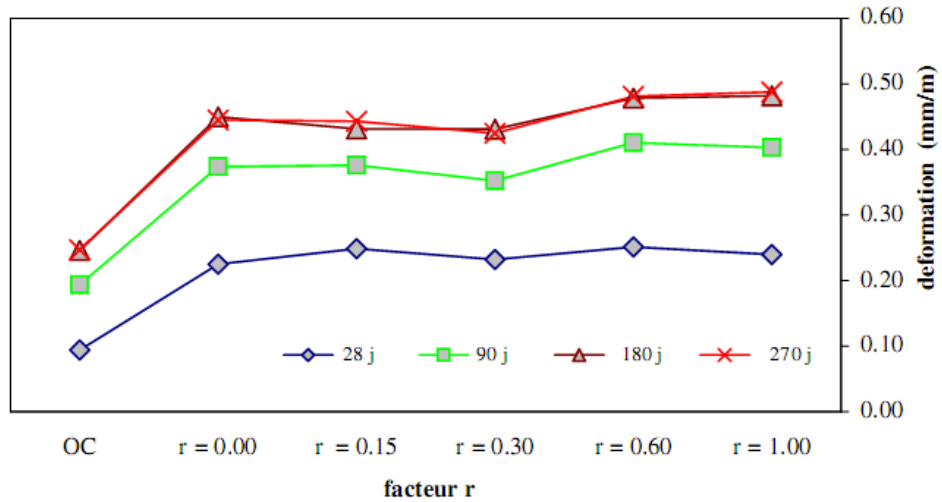


Figure 2.5 : Retrait due au séchage des différents types de béton recyclé [20].

Concernant le retrait endogène, un taux de remplacement supérieur à 60% indique une déformation moyenne de 0,050 mm/m, par contre une moyenne de 0,007 mm/m est indiquée pour un taux de l'ordre 30%, qui est l'équivalent de 7 fois moins comme c'est illustré sur la figure 2.6. Les augmentations considérables de retrait correspondent à la forte porosité et la perméabilité des agrégats recyclés venant du mortier attaché aux granulats recyclés.

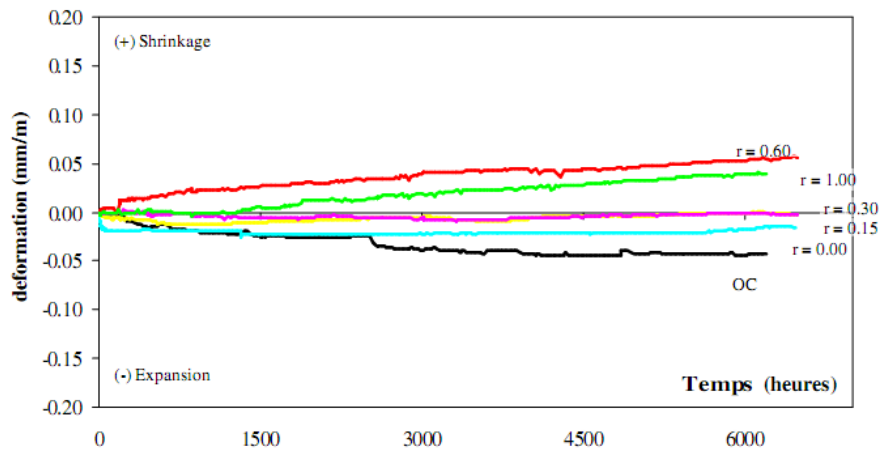


Figure 2.6 : Retrait endogène pour les différents types de béton. [20].

Ravindrarajah et Tam (1985) [37] ont montré que le fluage du BGR est d'environ 30% à 60% plus élevé que celui du béton ordinaire. Ceci est attribué à la teneur plus élevée en pâte du BGR, alors que le fluage du béton est proportionnel à la teneur en pâte ou de mortier dans le béton. Domingo-Cabo et *al.* [85] ont étudié les variations de fluage et de retrait du BGR avec différents pourcentages de substitution (20%, 50% et 100%) des gros granulats, en gardant le pourcentage du ciment et du rapport ciment/eau constant. Ils ont observé que le remplacement de 50% des gros granulats cause plus de 40% d'augmentation dans le fluage et une augmentation de 20% dans le retrait. Dans le cas de remplacement complet des gros agrégats, plus de 50% d'augmentation du fluage et 70% de retrait ont été observés. Kou et *al.* [80] ont montré que le remplacement de 25% à 35% du ciment par des cendres volantes peut réduire considérablement le fluage du BGR.

Kenai et Debieb [66] ont remarqué, en général d'après les résultats montrés dans la figure 2.7, que le retrait de séchage à l'air libre des bétons recyclés est nettement plus important que celui du béton de granulats naturels, cela est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier de l'ancien béton qui recouvre ces granulats. Ils ont observé un retrait important qui ne se manifeste qu'au-delà d'une certaine période de temps; au départ il est limité en intensité. Ceci est dû principalement à la pré-saturation des gros granulats recyclés avant le malaxage du béton. L'incorporation d'un adjuvant superplastifiant, réduit le retrait du béton recyclé.

Il est probablement préférable de limiter le pourcentage de substitution en granulats recyclés et en particulier les granulats fins. En pratique, dans un climat chaud comme celui de l'Algérie, ce type d'augmentation du retrait de béton peut être préjudiciable à son utilisation dans les éléments de structures sensibles aux fissurations comme les dalles et les voiles.

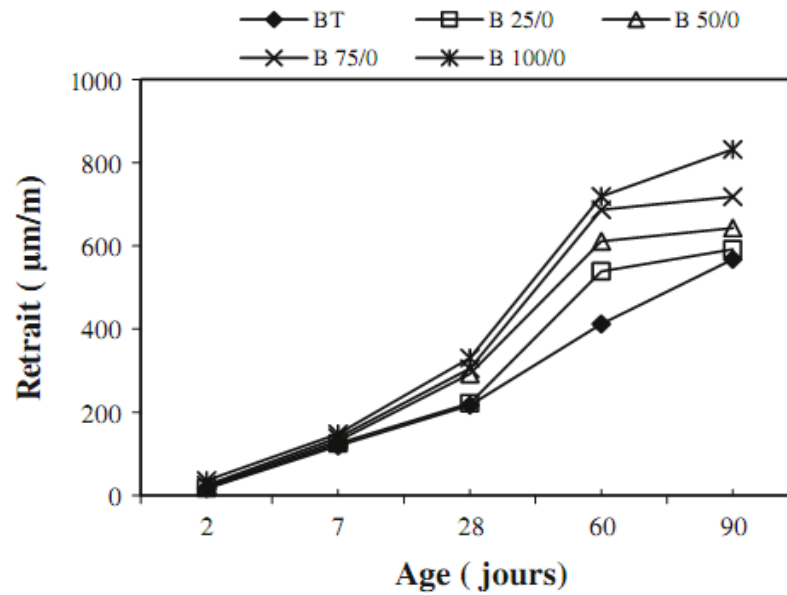


Figure 2.7 : Evolution du retrait des bétons recyclés à base de gros granulats de béton concassé. [66]

2.6.2. Résistance aux cycles de gel-dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel est une caractéristique importante pour les bétons extérieurs dans un environnement humide. Elle est liée à plusieurs autres propriétés du béton, notamment sa porosité, sa perméabilité et la structure de ses pores [11 ; 86]. On étudie cette propriété en mesurant la perte de masse du béton après un nombre de cycles de gel-dégel selon les spécifications de la norme ASTM C666 [87]. Il existe peu d'études évaluant la résistance au gel-dégel des bétons à granulats recyclés. Les études sur ce sujet semblent par contre montrer que les bétons à granulats recyclés performant bien en ces conditions.

Yildirim et al, [86] ont trouvé qu'après l'exposition à 300 cycles de gel-dégel, les performances du béton contenant des GBR ont été comparables à celle du béton ordinaire, en particulier pour les mélanges contenant 50% de GBR à un niveau de pré-saturation de 50%. Alors que selon Richardson [11], les bétons contenant des granulats recyclés sont plus résistants que les bétons témoins. Le béton contenant des granulats recyclés est beaucoup plus durable que le béton témoin (différence de 68% au niveau de la perte de masse observée). Selon l'auteur, une partie de cette différence peut être expliquée par une variation de la qualité du granulat recyclé et par le fait qu'une méthode de cure différente a été utilisée pour le béton contenant des granulats recyclés [11].

Les bétons incorporant des granulats recyclés provenant de béton contenant de l'air entraîné sont résistants aux cycles de gel-dégel même, légèrement supérieur au béton témoin [88]. Les bétons utilisant des granulats recyclés ne contenant pas d'air entraîné présentent, par contre, de mauvaises performances, même si la teneur en air du nouveau béton est acceptable [88].

2.6.3. Carbonatation

Le gaz carbonique de l'air réagit avec le béton durci causant un certain retrait. Il est donc pertinent de considérer la carbonatation lorsqu'on évalue la durabilité d'un béton. La carbonatation ne détruit pas le béton, mais peut réduire le pH du béton, rendant celui-ci plus susceptible à des phénomènes comme la corrosion des armatures.

Concernant la carbonatation des bétons contenant des granulats recyclés il ne semble pas y avoir de consensus dans la littérature. Selon Sagoe-Crentsil [44], l'utilisation de granulats recyclés avec des rapports E/C très élevés, a peu d'impact significatif sur la résistance à la carbonatation du béton.

Selon Levy et Helene [23], la profondeur de carbonatation diminue avec le remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés à résistance à la compression constante. Cette diminution est, par contre, plus grande pour des taux de remplacement de 20 et 50% que pour un taux de remplacement de 100% [23]. La meilleure performance des bétons contenant des granulats recyclés peut être expliquée par le fait que ceux-ci ont un contenu en ciment plus élevé.

Silva *et al.* [89] ont trouvé que l'augmentation de quantités des GBR provoque des plus grandes profondeurs de carbonatation quand tous les autres facteurs sont égaux. L'utilisation de 100% de GBR dans le béton peut entraîner jusqu'à 2 fois plus de profondeur de carbonatation de celle de béton ordinaire. La taille des GBR a également un effet clair sur le comportement de carbonatation du béton, où il y a une plus grande probabilité que les mélanges de béton avec des granulats recyclés fins exposent les plus grandes profondeurs de carbonatation que les mélanges avec granulats recyclés grossiers. Ceci peut être facilement expliqué par la plus grande porosité des granulats fins en raison de la plus grande quantité de mortier adhérent, qui ne pouvait être séparés pendant le processus de concassage.

Selon Zhuang [90], les granulats recyclés ont deux effets principaux sur la carbonatation du béton. En premier lieu, la grande porosité des granulats recyclés fait en sorte que le béton dans lequel ils sont utilisés est plus poreux, ce qui entraîne une réduction de la résistance à la carbonatation du béton. D'un autre côté, les granulats recyclés peuvent avoir une plus grande quantité en liant grâce au mortier résiduel. Ceci fait en sorte que le béton a une plus grande réserve d'alcalis, ce qui entraîne une plus grande résistance à la carbonatation [90]. Lorsque le taux de remplacement est inférieur à 70% la profondeur de carbonatation augmente avec le taux de remplacement. Cette tendance s'inverse, par contre, pour des taux de remplacement supérieurs à 70% [90].

2.7. Conclusion

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton a fait le sujet de divers travaux de recherche partout dans le monde. De manière générale, on observe une forte dispersion des valeurs des propriétés du béton fait avec ces granulats, notamment pour les résistances mécaniques et l'influence du taux de substitution sur ses propriétés mécaniques. Cette synthèse bibliographique a permis de dégager les paramètres les plus influant sur les propriétés du béton recyclé que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

A la base de ces résultats, il devient plus clair de tracer un plan expérimental pour évaluer les propriétés du béton à base de granulats recyclés

Chapitre 3 :

Etude expérimentale

3.1. Introduction

L'objectif général de ce travail est d'évaluer l'effet du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des bétons. Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation des granulats recyclés dans le béton, la caractérisation et la définition des propriétés du matériau recyclé est nécessaire afin d'obtenir l'information qui permet d'adapter la méthode de préparation du béton aux granulats recyclés. On présente des formulations de bétons ayant des taux de remplacement du granulat recyclé variables et l'évaluation de leurs impacts. Les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité (retrait du séchage) de ces mélanges sont testés.

3.2. Matériaux utilisés

Pour des considérations pratiques, on a choisi des vieux bétons employés dans la région de Chlef. Ce choix a permis de garantir la même provenance des matériaux et d'assurer un contrôle régulier pendant la période d'essai.

3.2.1. Ciment Portland

Le ciment utilisé dans le cadre de cette étude est un ciment portland composé (CEM II/A 42.5) produit de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) dont l'ajout est de 10% de calcaire, sa surface spécifique Blaine est de 3200 cm²/g et sa résistance moyenne à la compression à 28 jours est supérieure à 42,5 MPa. Ces caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique et minéralogiques du ciment de CHLEF.

	Composition chimique (%)								Composition Minéralogique (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	PAF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Ciment	22.6	4.20	3.55	62.17	2.19	0.63	0.42	1.84	41.8	33.3	5.1	10.7

Différents essais de caractérisation ont été effectués sur les granulats recyclés, les résultats sont regroupés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Propriétés physiques et mécanique des granulats utilisés

Essai	Résultats		
	GGO	GBR	SN
Module de finesse	-	-	2.71
Equivalent de sable	-	-	79.00
Compacité (%)	56.13	50.59	62.48
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1477.2	1204.6	1562
Masse volumique spécifique (Kg/m ³)	2631.57	2380.9	2608
Los-Angeles (%)	38.9	51.5	-
Absorption d'eau (%)	0.96	5.05	-

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée provient du réseau d'eau potable de la ville de Chlef, sa composition minéralogique est mentionnée dans le tableau 3.3. Cette eau est potable et propre à la consommation. De plus, elle renferme toutes les prescriptions de la norme P18-303 [91].

Tableau 3.3 : Composition minérale de l'eau de gâchage.

Echantillon	Concentration (mg/l)
Ca	53
Mg	6.6
Na	5.8
K	0.5
Cl	11
SO ₄	9
HCO ₃	168
NO ₃	2
Résidus secs à 180°C	160
pH	7.3

3.2.5. Superplastifiant :

Pour la présente étude, le superplastifiant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau appelé MEDAFLOW 30. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés rhéologiques du béton frais et ne présente pas d'effet retardataire. Le tableau 3.4 présente quelques caractéristiques de ce produit.

Tableau 3.4 : Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant (Medaflow 30)

Superplastifiant MEDAFLOW 30	
Teneur en extrait sec	30%
Aspect	liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 – 6,5
Densité	1,07 g/cm ³
Dosage recommandé	0,5% à 2,0%
Nature chimique	polycarboxylate

3.3. Formulation du béton de référence

La formulation du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable, graviers) en produisant un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistance mécanique, faible retrait, bonne durabilité...).

Pour définir ces proportions, on doit passer tout d'abord par l'essai de l'analyse granulométrique puis choisir une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Joisel ...etc.

Dans notre recherche il a été choisi la méthode de Dreux-Gorisse [92]. L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. Cette méthode a été retenue pour sa simplicité à déterminer les différents composants du béton.

Les résultats de la méthode de Dreux Gorisse, et après le traçage de la courbe granulométrique de référence représentée sur la figure 3.2, on obtient donc un mélange optimal avec un volume absolu de 37% de sable et 63% de gravier (Gravier 8/15), avec $E/C = 0.6$.

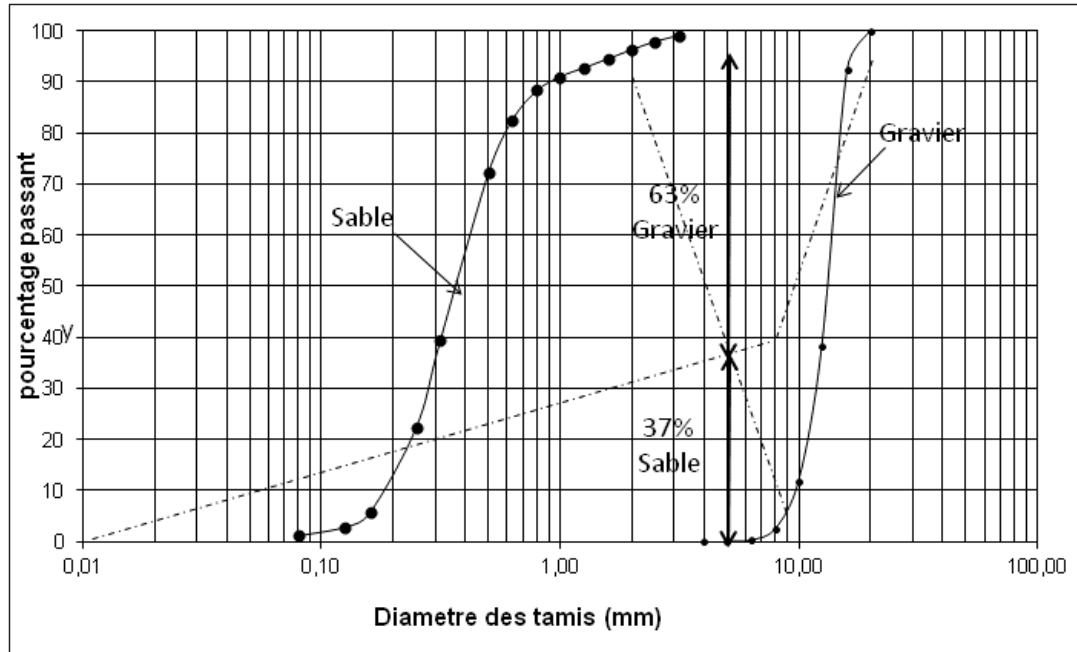


Figure 3.2 : Courbe granulométrique de référence.

Les dosages en volume de chacun constituant du béton sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.5 : Formulation de $1m^3$ de béton ordinaire

Constituants	Masse (Kg)
Sable (S)	607.02
Gravier 8/15 (G)	1045.50
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (C)	400
Eau (E)	240

3.4. Composition des bétons

Pour les besoins de l'étude, un béton ordinaire (béton témoin) est fabriqué à base de 100% de gros et fins granulats ordinaires; il constitue le béton naturel de référence (BNR). Dans le béton ordinaire; on a substitué partiellement le gravier ordinaire (20, 40, 60, 80, et 100%) par masse par un gravier recyclé (BGR) à son état sec et après pré-saturation dans

l'eau pendant 24 heures. Pour bien mener la comparaison, on a confectionné trois classes de bétons avec trois rapports E/C (0.4, 0.5, 0.6). L'ouvrabilité a été conservée pour les différents bétons en incorporant la quantité nécessaire de superplastifiant. Les paramètres d'étude sont récapitulés dans le Tableau 3.6

Tableau 3.6 : Notations et compositions des différents bétons étudiés.

Désignation	Matériaux (kg/m ³)				SP (%)			L'affaissement (mm)			
	Ciment	Sable	GGO	GBR							
					E/C=0.4	E/C=0.5	E/C=0.6	E/C=0.4	E/C=0.5	E/C=0.6	E/C=0.6 SP=0%
Béton avec les GBR secs											
B0	400	608	1047	0	1.3	0.4	0	168	168	170	170
BD20	400	608	837.6	209.4	2.2	0.6	0.1	164	165	170	110
BD40	400	608	628.2	418.8	2.8	0.7	0.2	167	170	166	90
BD60	400	608	418.8	628.2	3.2	0.8	0.2	170	160	170	70
BD80	400	608	209.4	837.6	(*)	0.9	0.3	(*)	170	167	50
BD100	400	608	0	1047	(*)	0.9	0.3	(*)	165	170	40
Béton avec des GBR pré-saturés											
B0	400	608	1047	0	1.3	0.4	0	168	168	170	170
BP20	400	608	837.6	209.4	1.2	0.3	0	161	162	168	168
BP40	400	608	628.2	418.8	1.1	0.3	0	167	165	168	168
BP60	400	608	418.8	628.2	1	0.3	0	170	166	166	166
BP80	400	608	209.4	837.6	1	0.2	0	167	162	160	160
BP100	400	608	0	1047	1	0.3	0	163	170	162	162

B(D/P)x; B: Béton, D: GBR secs, P: GBR pré-saturés, x: taux de remplacement des GGO par des GBR.

() L'essai ne peut pas être performé*

3.5. Préparation des bétons

Il est essentiel, lorsqu'on fabrique une quantité de béton nécessitant plusieurs gâchées, de s'assurer de la reproductibilité de la procédure de fabrication. Le respect de cette procédure, ainsi que les mesures d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2 [93], nous assurent une homogénéité entre les différentes gâchées, et donc une possibilité de comparaison entre elles.

La procédure de malaxage et le mode d'introduction de l'adjuvant utilisé pour fabriquer les bétons sont illustrés dans le tableau 3.7. Chaque type de béton a été confectionné en suivant les étapes ci-dessous :

- les surfaces des moules sont recouvertes d'huile afin d'éviter tout risque d'adhérence entre le moule et le béton.

- Pré mouillage du malaxeur pour éviter une absorption d'eau par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il a été utilisé auparavant.
- Introduire en premier le gravier (naturel et recyclé), le sable et le ciment, dans la cuve de la bétonnière et mélanger à sec pendant 1min.
- Ajouter les 2/3 de l'eau de gâchage et malaxer pendant 1 min.
- Introduire le 1/3 de l'eau de gâchage plus la quantité du superplastifiant progressivement en malaxant pendant 1 minute.
- Préparer le béton à l'essai d'affaissement et de rhéologie.
- on remplit les moules destinés aux autres essais. le remplissage des moules s'effectue par deux couches, chacune est mise sous vibration à l'aide d'une aiguille vibrante pendant une vingtaine de seconde, enfin on fait un surfacage avec une truelle manuelle.

Tableau 3.7 : Procédure de malaxage du béton.

Temps	0	1min	2min	3min	Essais	
Ajouts	GG + SE + C	+ 2/3E	+ 1/3E + SP			
Opération	Malaxage à sec	Malaxage humide	Malaxage humide		Essai de rhéologie	Remplissage des moules

GG : Gros granulats, SN : Sable naturel, E : Eau de gâchage, SP : Superplastifiant

3.6. Matériels utilisés

3.6.1. Malaxeur

Les propriétés rhéologiques varient énormément selon le mode de malaxage et le dosage des constituants employés. Avant tout travail, le mode de malaxage doit être désigné selon les moyens disponibles et la quantité de bétons à préparer. Le malaxeur représenté sur la figure 3.3 est parmi les appareils utilisés au laboratoire pour la confection des bétons. Cet appareil normalisé (EN 12390-2) [94], sur lequel se basent pratiquement toutes les normes pour la préparation du béton.



Figure 3.3 : Bétonnière électrique 115 litres.

3.6.2. Cône d'Abrams

Un cône d'Abrams est employé pour évaluer l'ouvrabilité des bétons à la fin du malaxage. Ce cône, présenté sur la figure 3.4, possède une hauteur de 300 mm avec un diamètre de la base de 150 mm et un diamètre supérieur de 100 mm.



Figure 3.4 : Cône d'Abrams

3.6.3. Rhéomètre à béton

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des bétons, on a utilisé un rhéomètre rotatif ; Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre présenté sur la figure 3.5 est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation (figure 3.6), un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires en forme de U inversée, de dimensions 5x10 cm (figure 3.7) et d'un récipient cylindrique de dimension 30x30 cm (figure 3.8). Le schéma de la figure 3.9 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur.

Le rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z peut fonctionner en imposant des taux de cisaillement appliqués sur le béton d'où on obtient les contraintes de cisaillement. A partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de chaque béton. Le Heidolph- RZR 2102 Control Z est piloté par un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Ensuite, il faut régler la température manuellement et la garder constante pour tous les essais.



Figure 3.5: Rhéomètre à béton.



Figure 3.6: Agitateur.



Figure 3.7: Croisillon.



Figure 3.8: Récipient.

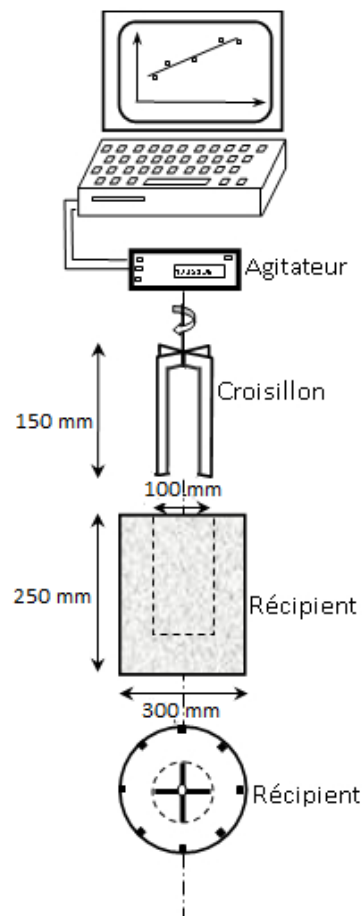


Figure 3.9 : Schéma descriptif du rhéomètre à béton.

3.6.4. Autres accessoires

Une balance électronique, avec une précision de 0.1g, a été utilisée pour mesurer les ingrédients et la préparation des différents bétons (figure 3.10). De même, un thermomètre avec une précision de 0.1 °C a été utilisé après chaque malaxage pour vérifier la température des bétons.



Figure 3.10 : Balance électronique.

3.7. Essais réalisés

3.7.1. Ouvrabilité

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams ou Slump-test, est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Cet essai est effectué conformément à la prescription de la norme EN 12350-2 [93]. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 30 cm de hauteur. Le moule tronconique étant légèrement huilé et fixé sur la plaque d'appui, on le remplit en trois couches de hauteur équivalente avec un piquage à raison de 25 coups par couche. Après avoir arasé le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure exprimée en centimètres est réalisée sur le point le plus haut du béton et à une minute du démoulage (figure 3.11).



Figure 3.11 : Réalisation de l'essai d'affaissement du cône d'Abrams.

3.7.2. Essai de rhéologie

Le rhéomètre utilisé est un rhéomètre de type Couette développé par l'équipe de recherche de l'université de Chlef en collaboration avec celle de l'université de Cergy Pontoise (France) [95, 96, 97]. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre, ce qui est un avantage pour les matériaux thixotropes comme le béton [98].

Après la mesure de l'affaissement, on verse le béton préparé dans le récipient qui sera fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, on fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du béton. A l'aide du logiciel et l'essai rhéométrique, on démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié.

3.7.2.1. Profil de vitesse imposée.

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [95]. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). La figure 3.12 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

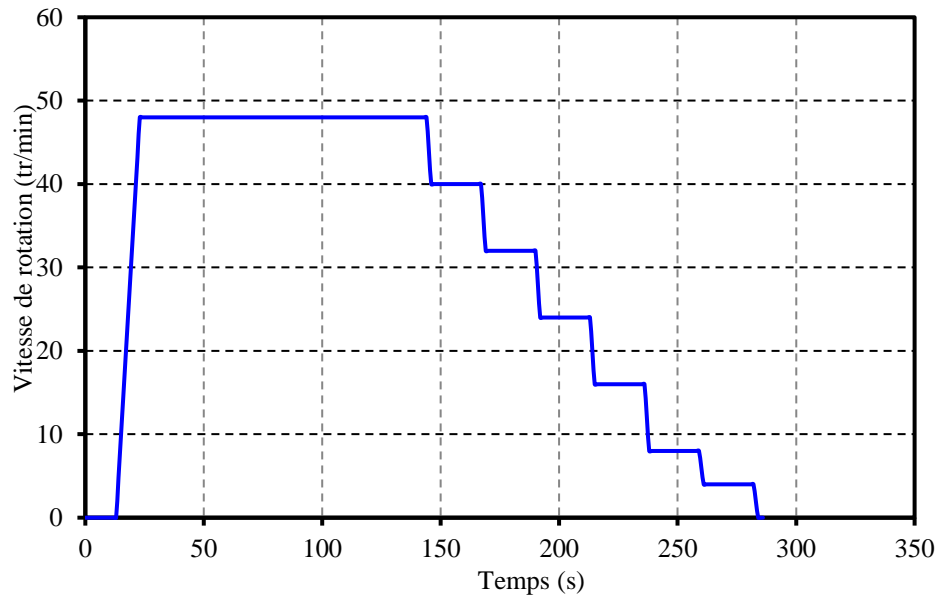


Figure 3.12 : Profil de vitesse [95].

3.7.2.2. Déroulement de l'essai

Afin d'étudier le comportement rhéologiques des différents bétons, on a utilisé un rhéomètre en suivant les étapes suivantes :

1^{ère} étape : avant la réalisation des essais, il faut faire chauffer le rhéomètre en le faisant fonctionner suffisamment à la vitesse maximale de 400 tours/min.

2^{ème} étape : mesurer ensuite les couples à vide (M_{vide}) correspondant aux vitesses imposées selon le profil présenté sur la figure 3.12.

3^{ème} étape : remplir le béton jusqu'à l'arase du récipient et piquer 15 fois avec une tige à piquage du béton; mettre en place et centrer le croisillon de sorte que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arase du récipient; mesurer les couples totaux correspondants aux vitesses imposées (M_{total}).

4^{ème} étape : exploiter les mesures des couples (M) en fonction de vitesse imposée. Les couples M sont obtenus en faisant la différence entre M_{total} et M_{vide} .

$$M_{total} = M_{plein} - M_{vide} \quad (3.1)$$

3.7.2.3. Mesure des paramètres rhéologiques

Les étapes de calcul, le fonctionnement du rhéomètre et la déduction des paramètres rhéologiques des différents bétons ont été obtenus en se basant sur les démarches présentées par de Lanos et Estélé [99]. Ces étapes sont présentées comme suit :

- On ajuste linéairement la variation du moment final, en fonction de la vitesse de rotation et on déduit des nouvelles valeurs du moment.

- La relation contrainte-vitesse de cisaillement dans une géométrie couette est établie en considérant localement le fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham. Pour un tel fluide, l'expression de la vitesse de cisaillement dépend du régime d'écoulement dans l'entrefer. Ainsi, la vitesse de cisaillement s'exprime par l'équation 3.2 lorsque le béton est partiellement cisailé comme le montre la figure 3.13-a.

$$\dot{\gamma}_1 = 2M \frac{\partial \Omega}{\partial M} \quad (3.2)$$

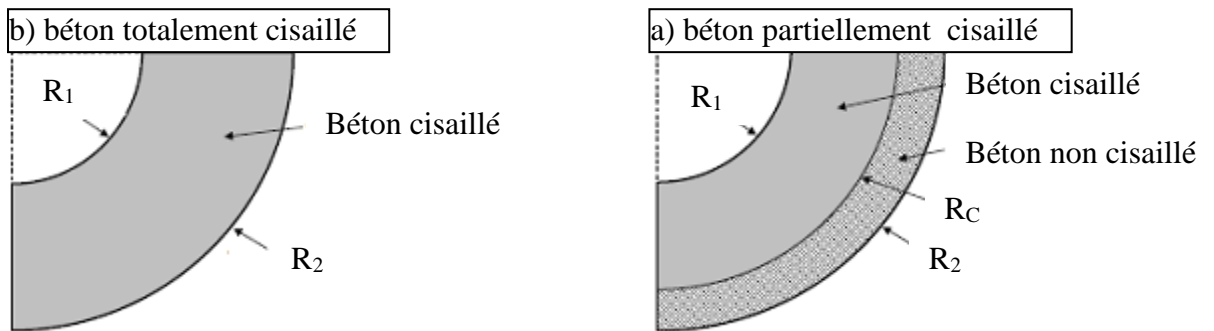


Figure 3.13 : Schéma du cisaillement du béton dans le récipient.

- Lorsque le béton est totalement cisailé, comme illustré sur la figure 3.13-b, l'expression de la vitesse de cisaillement est donnée par l'équation 3.3.

$$\dot{\gamma}_2 = 2 \frac{M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (3.3)$$

- On combine entre les deux expressions des vitesses de cisaillement qui gouvernent l'écoulement dans le récipient. La valeur convenable de la vitesse de

cisaillement est celle entraînant plus de dissipation d'énergie. Donc, la vitesse de cisaillement peut être donnée par l'équation 3.4.

$$\dot{\gamma} = \max\left(\dot{\gamma}_1; \dot{\gamma}_2\right) \quad (3.4)$$

- on calcule la contrainte de cisaillement dans le béton à partir du moment appliqué et les dimensions du croisillon. Pour un calcul simplifié on trouve :

$$\tau = \frac{M_l}{2 \pi R^2 h} \quad (3.5)$$

- Sur un palier de vitesse de cisaillement, on peut évaluer le cisaillement moyen par l'expression 3.6.

$$\tau_{moy} = \frac{1}{2}(\tau_i + \tau_{i-1}) \quad (3.6)$$

- La courbe de tendance obtenue à partir des points $(\tau_i - \dot{\gamma}_i)$ permet d'estimer la viscosité par la pente de la droite et le seuil de cisaillement du béton par la contrainte correspondant à une vitesse nulle. La figure 3.14 présente la corrélation linéaire entre la contrainte et la vitesse de cisaillement sur un béton contenant 60% de GBR sec avec un dosage en superplastifiant de 0.2%. Le seuil de cisaillement trouvé est de 134.7 Pa et la viscosité 20.608 Ps.s pour le béton étudié.

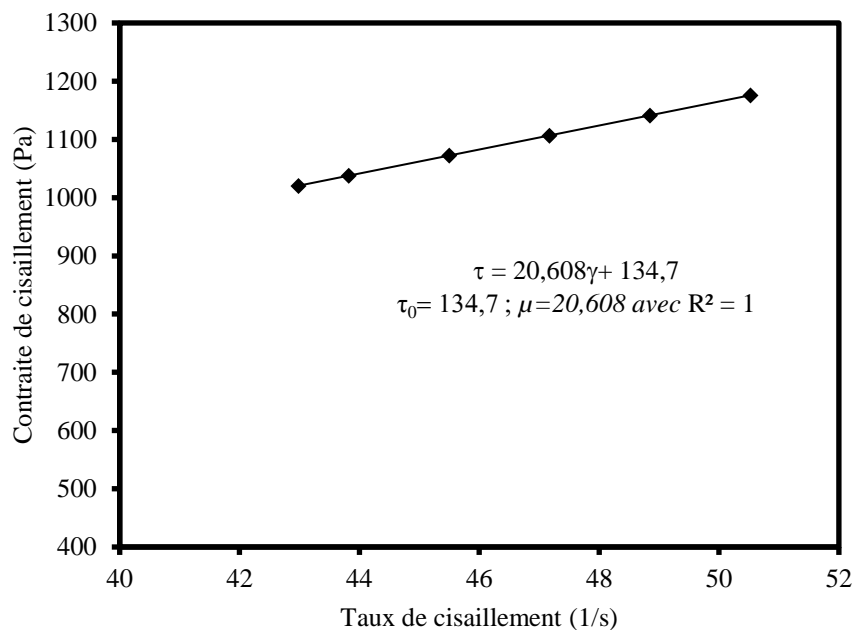


Figure 3.14: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour MD60 (GBR=60% sec).

3.7.3. Essais mécaniques

L'essai de compression consiste à soumettre le corps d'épreuve entre les plateaux d'une presse à forces axiales opposées. La presse utilisée a une capacité maximale de 3000 kN (Figure 3.15). L'essai s'effectue avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s soit 5 kN/s. Les éprouvettes conçues pour mesurer la résistance à la compression sont des cubes de 100 mm. Après un bon centrage de l'éprouvette, l'essai s'effectue avec une vitesse de montée de charge constante. Au moment de la rupture, la machine s'arrête et on mesure la charge de rupture.

La résistance à la traction par flexion est déterminée à l'aide d'une machine de flexion par trois points d'une capacité de 200 kN (Figure 3.16). Les éprouvettes conçues pour mesurer la traction sont des prismes 70 x 70 x 280 mm. Après un bon centrage, la mise en charge est effectuée avec une vitesse de montée de charge constante. On prend la mesure de la charge à la rupture de l'éprouvette.

Les modules d'élasticité des différents bétons ont été mesurés par un compression-mètre qui permet de mesurer la déformation d'un cylindre de 150mm de diamètre soumis à une compression axiale. La levée des mesures est synchronisée par l'analyse d'image fixée sur les deux cadrans ; celui de la force de compression et celui de la déformation comme c'est illustré sur la figure 3.17. La déformation est mesurée par comparateur d'une précision de 0.001 mm et la force de compression par un dynamomètre d'une précision de 0.1 kN. 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 l'échantillon, on a utilisé une boîte à sable sur la partie rugueuse du cylindre.

Les éprouvettes destinées aux essais mécaniques des différents bétons sont conservées immédiatement après leurs coulages dans leurs moules couverts par un chiffon humide. Après le premier jour, les éprouvettes sont démoulées et mise dans un bac d'eau contrôlée en température ($T=20^{\circ}\text{C}$) (figure 3.18). Une heure avant chaque essai mécanique, les éprouvettes sont ressorties du bac et mises à l'air libre sous des conditions ambiantes.



Figure 3.15 : *Essai de compression.*



Figure 3.16 : *Essai de traction par flexion.*



Figure 3.17 : *Dispositif pour le calcul du module d'élasticité.*



Figure 3.18 : *Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.*

3.7.4. Essai de retrait

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante. Ainsi on distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée. La détermination de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton (ponts, ouvrages hydrauliques, etc.).

Pour mesurer le retrait de séchage, on a confectionné des éprouvettes prismatiques 100x100x200 mm recouvertes aux deux bouts par une couche étanches pour éviter la dessiccation et empêcher l'effet de bord lors des mesures. Les éprouvettes sont démoulées le premier jour après le coulage et conservés sous des conditions ambiantes de laboratoire. Lors de la mesure du retrait, les éprouvettes sont placées dans un bâti de mesure de déformations de retrait doté d'un comparateur ayant une précision de 1µm.

La déformation du retrait est estimée à partir de la variation de longueur des éprouvettes. L'appareil servant à mesurer cette longueur est un extensomètre équipé d'un comparateur ayant une précision inférieure ou égale à 0,001 mm (figure 3.16).

La variation de longueur est calculée par différence entre la mesure initiale à l'instant (t_0) et la mesure à l'instant (t).

Les mesures de retrait ont commencé à 24 heures après le coulage du béton. La déformation est donc calculée à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

Avec :

ΔL : variation de longueur exprimée en µm.

L : longueur entre les deux bords de l'éprouvette égale à 200 mm.

ε : déformation de retrait exprimée en µm/m.



Figure 3.19 : *Comparteur d'exactitude inférieure ou égale à 0,001 mm.*

3.8. Répétitivité des résultats

Afin de confirmer la fiabilité de nos résultats, certains ont été refaits et comparés. Les figures 3.17, 3.18, 3.19 et 3.20 illustrent une comparaison entre deux essais de même type sur des valeurs de la résistance à la compression ($E/C=0.6$; SP ; GBR sec), le seuil de cisaillement ($E/C=0.5$; SP ; GBR sec et pré-saturé), la viscosité ($E/C=0.5$; SP ; GBR sec et pré-saturé) et du retrait de séchage ($E/C=0.6$; SP ; 60 GBR sec), respectivement. Les résultats sont encourageants et confirment la convenance de ces essais et leurs fiabilités où les coefficients de corrélations trouvés sont proches de l'unité. Sur l'ensemble des résultats testés, l'écart moyen entre deux seuils de cisaillements obtenus est de 6.4 Pa, et pour la viscosité est de 0.2 Pa.s. Ceci est conforme aux résultats des figures 3.20 et 3.21 qui donnent des coefficients de corrélation très élevés.

An plus, il est bien clair, d'après ces résultats, que la mesure du retrait est estimée avec une précision de 97% ce qui justifie la maîtrise des paramètres d'essai.

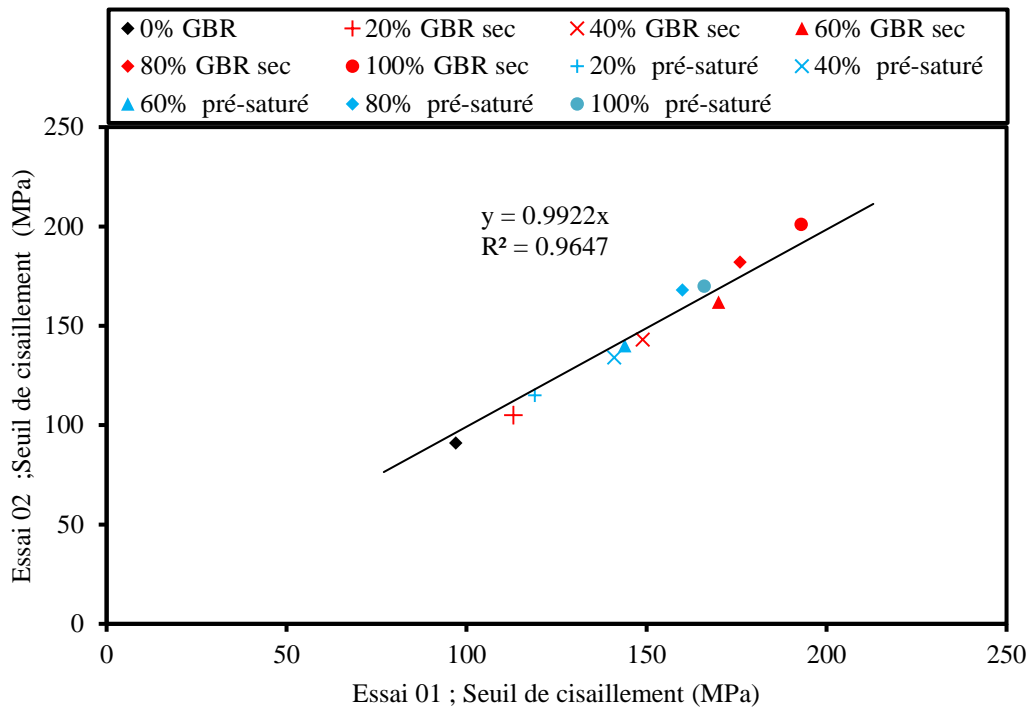


Figure 3.20 : Répétitivité des résultats des taux de cisaillement du béton adjuvanté de E/C =0.5 (GBR sec et pré-saturé).

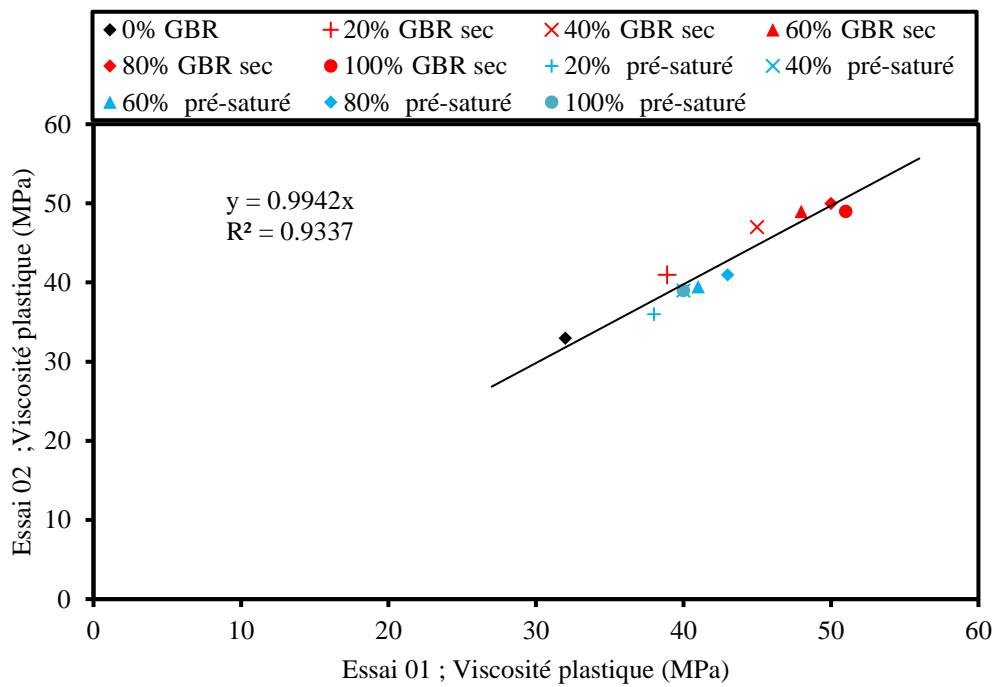


Figure 3.21 : Répétitivité des résultats de la viscosité plastique du béton adjuvanté de E/C =0.5 (GBR sec et pré-saturé).

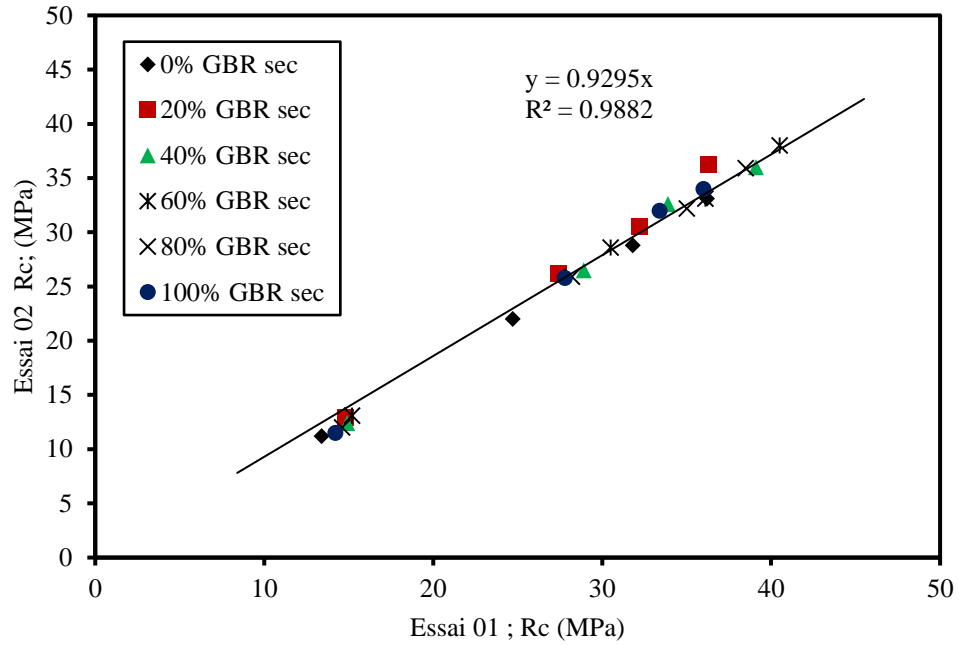


Figure 3.22 : Répétitivité des résultats de la résistance à la compression du béton adjuvanté de $E/C = 0.6$ (GBR sec).

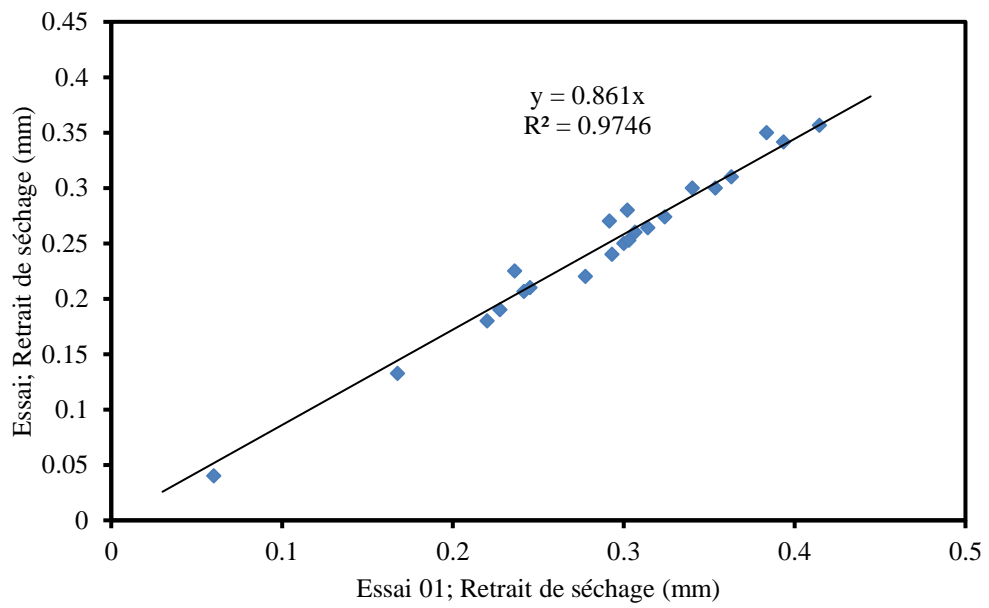


Figure 3.23 : Répétitivité des résultats de l'évolution dans le temps du retrait du béton adjuvanté de $E/C = 0.6$ (60% GBR sec).

3.9. Conclusion

Ce programme expérimental vise à évaluer l'effet de l'incorporation des granulats de béton recyclés sur le béton à l'états frais (ouvrabilité et rhéologie), à l'état durci (résistance à la compression et à la traction) et les propriétés liée à la durabilité (retrait), dans ce cadre, une composition de béton avec un dosage en ciment de 400 kg/m^3 a été retenue, les rapports E/C employés est de 0.4, 0.5 et 0.6. Les essais de compression et de traction sont effectués sur des éprouvettes cubiques de 10 cm et des éprouvettes $70 \times 70 \times 280$ mm respectivement, à l'âge de 3, 7, 28 et 90 jours. La déformation du retrait de séchage est mesurée sur des prismes de $100 \times 100 \times 200$ mm. Les essais de mesure du retrait sont repris plusieurs fois, afin d'enregistrer avec plus de précision, la déformation à chaque instant.

Chapitre 04 :

*Présentation et analyse
des résultats*

4.1. Introduction

Cette phase consiste une étude paramétrique sur béton. Dans le cadre de cette phase, des mélanges de béton ont été confectionnés dans le but d'évaluer l'impact des granulats de béton recyclé secs et pré-saturés sur plusieurs propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Les essais effectués lors de cette phase sont les essais sur béton frais (affaissement, rhéologie), les essais visant à évaluer les propriétés mécaniques du béton durci (résistance à la compression, résistance à la traction) en plus des essais visant à mesurer la durabilité du béton durci (retrait de séchage, perte en poids). Des relations mathématiques sont proposées pour exprimer la variation des résultats trouvés en fonction de la composition du béton avec des coefficients de corrélation équitable.

4.2. Influence des GBR sur les propriétés du béton non adjuvanté

4.2.1. Effet des GBR sur l'ouvrabilité

Les granulats recyclés ont comme caractéristique une forte capacité d'absorption. Cette propriété reste vraie quelle que soit la provenance du béton parent. Une nette diminution de l'ouvrabilité du béton a été observée lorsque les GBR sont utilisés à l'état sec. Pour un rapport E/C de 0.6, la figure 4.1 montre les résultats de l'ouvrabilité du béton non superplastifié pour les différents taux de substitutions des GBR. Lorsque les BGR sont séchés avant le malaxage, l'ouvrabilité marque une forte diminution (46%) puis cette perte suit une diminution monotone avec le taux de substitution des GGO par des GBR.

En augmentant le pourcentage des GBR dans le béton, l'ouvrabilité est divisée par quatre pour un béton ordinaire à un béton fabriqué uniquement avec des GBR. Cela peut être attribué à la texture rugueuse de la surface, l'angularité et à la présence de résidus de mortier dans les GBR tel que rapporté par Hansen et Narud [29]. Pour la même raison, Sagoe et Brown [100] ont trouvé que la densité du béton des GBR est inférieure à celle du béton ordinaire. Pour un béton de 60% de GBR pré-saturé, l'ouvrabilité reste presque constante en la comparant à celle du béton contenant des granulats secs.

Tel que rapporté par Poon et *al.* [18], il est clair que si les GBR sont utilisés dans l'état saturé, le remplacement des granulats ordinaires par des granulats recyclés, pour

n'importe quel pourcentage de substitution, ne résulte qu'une petite chute dans l'ouvrabilité du béton. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par García-González et al. [101] dans lesquels la pré-saturation des GBR dans l'eau pendant environ 3 minutes avant l'incorporation dans le mélange donne une consistance plastique et une consistance fluide si la période de pré-saturation atteint les 5 minutes. De la même manière Ferreira et al. [21] ont confirmé que les mélanges de béton fabriqués en utilisant la pré-saturation affichent un comportement légèrement dégradé à l'état frais et durci. D'une manière générale, pour améliorer l'ouvrabilité, l'utilisation d'un plastifiant est toujours recommandée.

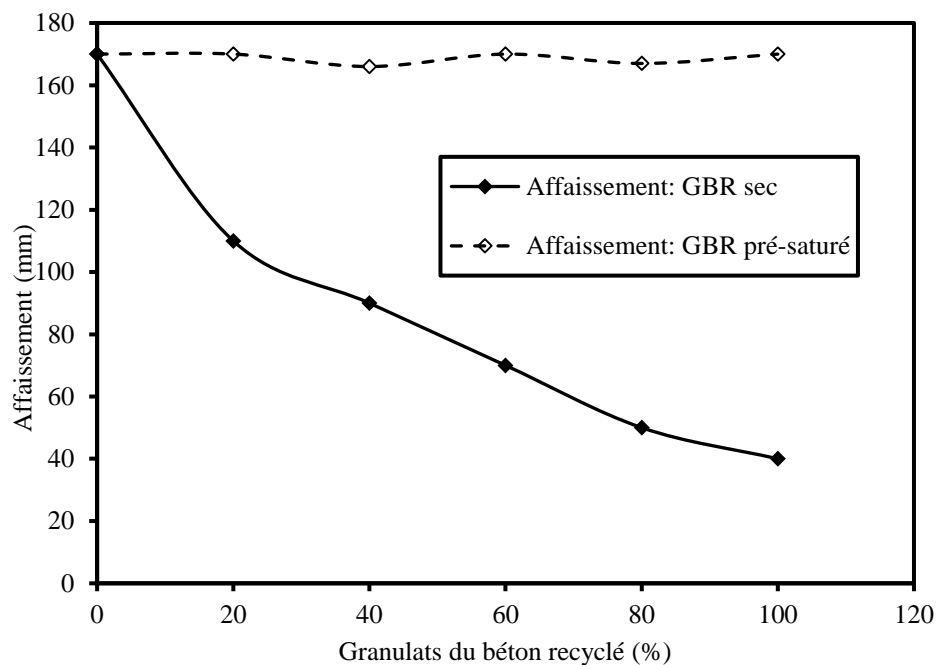


Figure. 4.1 : Variation de l'ouvrabilité du béton sans superplastifiant en fonction de la substitution des GGO par les GBR ($E/C=0.6$).

4.2.2. Effet des GBR sur les propriétés rhéologiques

La figure 4.2 montre les résultats obtenus des paramètres rhéologiques du béton non superplastifié pour les différents taux de substitutions des GBR. Lorsque les BGR sont séchés avant le malaxage le seuil de cisaillement augmente de 30% à 90% lorsque le béton contient respectivement 20% à 60% de GBR. Tandis que la viscosité atteint une augmentation de 50% et 170% pour les mêmes pourcentages utilisés. Au-delà de 60%, le béton devient plus ferme et les paramètres rhéologiques n'ont pas pu être mesurés par le rhéomètre.

En raison de la grande capacité d'absorption d'eau des GBR par rapport aux granulats naturels, il est proposé de procéder à une pré-saturation des GBR avant leurs utilisations au mélange du béton [35]. Poon et *al.* [18] ont estimé que les GBR séchés sont plus pratiques pour éviter le ressuyage de la pâte de ciment. Lorsque les GBR sont utilisés à l'état saturé, l'eau de gâchage reste disponible pour la lubrification des granulats et l'amélioration de la fluidité du béton. L'effet de l'incorporation des GBR saturés devient moins important et les paramètres rhéologiques sont moins affectés. Avec 60% de GBR pré-saturé, l'augmentation de la viscosité est réduite de 170% à 60% et celle du seuil de cisaillement de 90% à 35% en les comparants à celles du béton contenant des granulats secs.

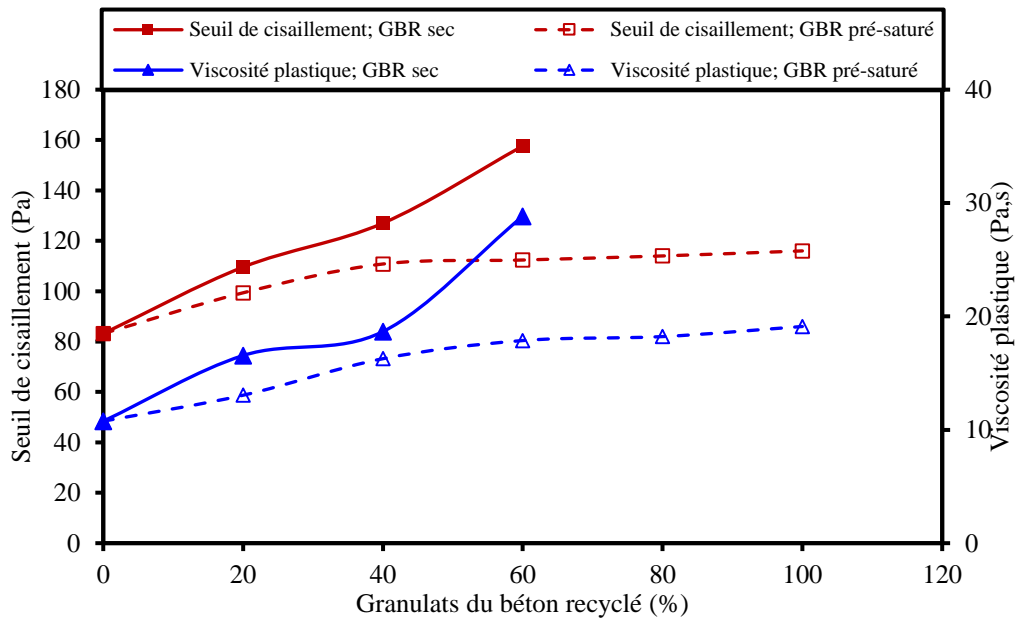


Figure. 4.2 : Variation des paramètres rhéologique du béton sans superplastifiant en fonction de la substitution des GGO par les GBR ($E/C=0.6$).

4.2.3 Effet des GBR sur la résistance à la compression

D'après la figure 4.3, on constate que l'évolution de la résistance suivant l'âge des bétons à base des GBR se comporte d'une manière analogue que celle du béton conventionnel. Cela nous laisse conclure que le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les bétons recyclés se déroule normalement et suit une augmentation avec l'âge.

Les résultats de la résistance à la compression obtenus indiquent un effet légèrement positif des granulats recyclés surtout pour un taux de substitution de 60%, au delà de ce taux une légère baisse a été remarquée. Le remplacement des GGO par les GBR provoque un changement de la résistance mécanique surtout à longue durée de durcissement. Au jeune âge et pour un taux de substitution de 60% des GGO par les GBR, la résistance à la compression reste presque similaire au béton ordinaire, comme le montre la figure 4.3. Par contre, à long terme de durcissement, une augmentation de 1,6 MPa est observée pour le même taux de substitution. Cette augmentation observée, malgré la chute dans l'ouvrabilité, est peut être due à cause de la réduction du rapport E/C effectif causé par la grande absorption des GBR.

Hansen et Narud [29] ont constaté que le béton avec des GBR atteint une résistance à la compression similaire à celle du béton ordinaire, et dépend de la résistance du béton parent (initial). Dans ce contexte, Levy et Helene [23] ont trouvé que les bétons, à base de GBR avec des substituions de 20%, 50%, et 100%, ont la possibilité d'atteindre la même résistance à la compression par rapport a celle du béton fabriqué par des granulats naturels pour des résistances allant de 20 à 40 MPa à 28 jours.

Il a été remarqué que jusqu'au taux de substitution de 60% des GGO par des GBR, la pré-saturation des GBR n'a pas d'influence remarquable sur la résistance à la compression par rapport au béton à base de GBR sec, et la résistance à la compression évolue d'une façon similaire. Mais quand la substitution dépasse ce taux, une chute remarquable dans la résistance à la compression est observée. Cela est peut être due à l'augmentation du rapport E/C effectif à cause des GBR pré-saturés qui libèrent l'eau dans le mélange du béton.

Malgré que la pré-saturation des GBR avant leurs utilisations dans le mélange du béton fait augmenter le rapport E/C effectif et garde la même ouvrabilité, mais les résistances restent comparables à celles des bétons à base de GBR sec qui ont moins d'ouvrabilité. Cette chute d'ouvrabilité à cause de l'absorption des GBR sec fait chuter le rapport E/C effectif est peut être la cause qui augmente les résistances à la compression. La pré-saturation qui garde la même ouvrabilité compense l'effet positif de l'absorption des

GBR secs et donne des résistances mécaniques semblables à celle du béton à base de GBR sec.

De nos jours, il a été montré qu'il est possible d'obtenir des bétons de GBR, où la résistance mécanique est comparable à celle du béton ordinaire, à condition que le mélange soit facilité par l'addition d'un superplastifiant [102, 76], ou par des méthodes de compensation d'eau [21, 103]. Poon et *al.* [18] ont montré que le béton des GBR séché à l'air, utilisé tel qu'il est reçu dans le laboratoire à environ 50% de la teneur en eau potentielle, a montré une évolution d'affaissement normale avec le temps et a présenté la plus haute résistance à la compression. Le béton contenant des GBR pré-saturé montre une grande résistance à la compression tel que conclu par Tam et *al.* [3]. Ces résultats peuvent être expliqués comme une conséquence d'une meilleure ITZ causée par les pores de surface des GBR avec la pâte de ciment dense. Barra et Vazquez [51] ont obtenu des résistances à la compression plus élevées en utilisant des GBR séchés à environ 90% de teneur en eau. De la même manière, Etxeberria et *al.* [2] recommandent 80% de pré-saturation du contenu potentiel d'eau des GBR pour atteindre la meilleure résistance à la compression.

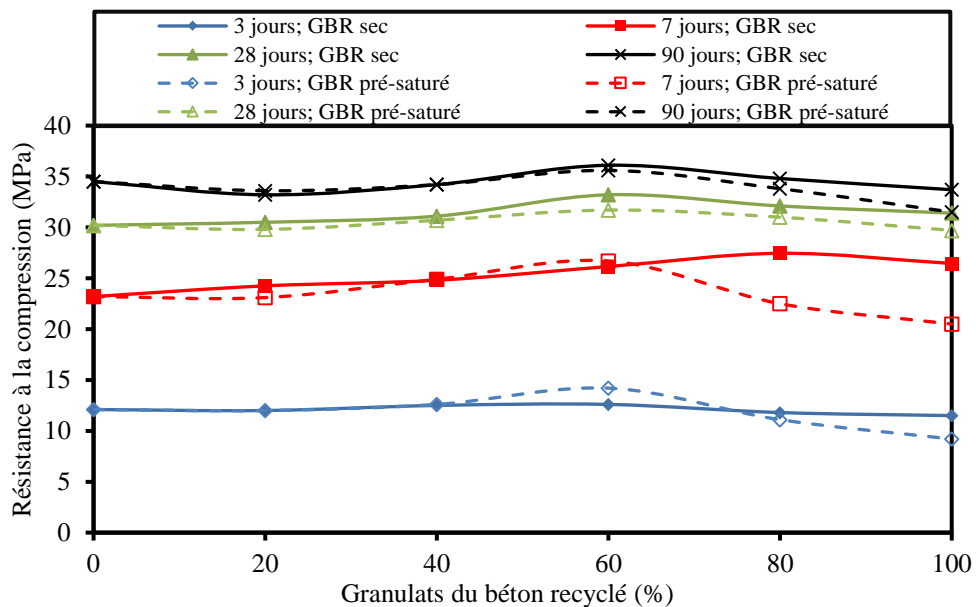


Figure. 4.3 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement des GBR sans SP ($E/C=0.6$).

4.2.4. Effet des GBR sur la résistance à la traction

La figure 4.4 illustre les résistances à la traction mesurées à 3, 7, 28 et 90 jours pour les mélanges de rapport E/C de 0.60. Pour tous les âges, la résistance à la traction semble être améliorée avec l'augmentation du taux de remplacement jusqu'au taux de substitution des GGO par des GBR de 60%. Cette tendance est plus claire à long terme de durcissement. Au delà de ce taux, on voit très bien la diminution de résistance en fonction du taux de remplacement pour tous les essais effectués. La perte de résistance observée entre le béton témoin et le mélange ayant le plus taux de remplacement est de 22% à 90 jours. Ceci est légèrement plus élevé que ce qui est généralement observé dans la littérature. On observe généralement des pertes de résistance à la traction de 10 à 15% [78] pour les taux de remplacement élevés.

Bien que le remplacement total des granulats naturels par des granulats de béton recyclés ait un impact négatif sur la résistance à la traction, des taux de remplacement de 20%, 40 et 60% semble avoir un impact positif sur cette propriété où on remarque un gain dans la résistance à la traction qui peut atteindre les 8% pour un taux de substitution de 60%. Ce taux de remplacement est donc le taux de remplacement optimal pour cette propriété.

Comme pour la résistance à la compression, les résistances à la traction observées pour les bétons à base de GBR pré-saturé évoluent d'une façon similaire que celles des bétons avec des GBR secs jusqu'aux taux de substitution de 60%, puis elles diminuent d'une façon remarquable de 20% et 10 % pour les durées de durcissement respectivement de 3 et 90 jours. Une similitude à celle en compression semble apparaître. Cependant, l'écart de résistance en traction entre les différents bétons est assez faible par rapport à celui observé en compression.

La résistance à la traction devrait diminuer avec l'augmentation de la teneur en GBR. Néanmoins, il est possible de contrôler cet effet en sélectionnant soigneusement les GBR lors de la production du béton selon la quantité, la taille, le type et la qualité des agrégats, il y a une faible perte ou bien une résistance supérieure à la traction des bétons à base de GBR par rapport au béton ordinaire [104].

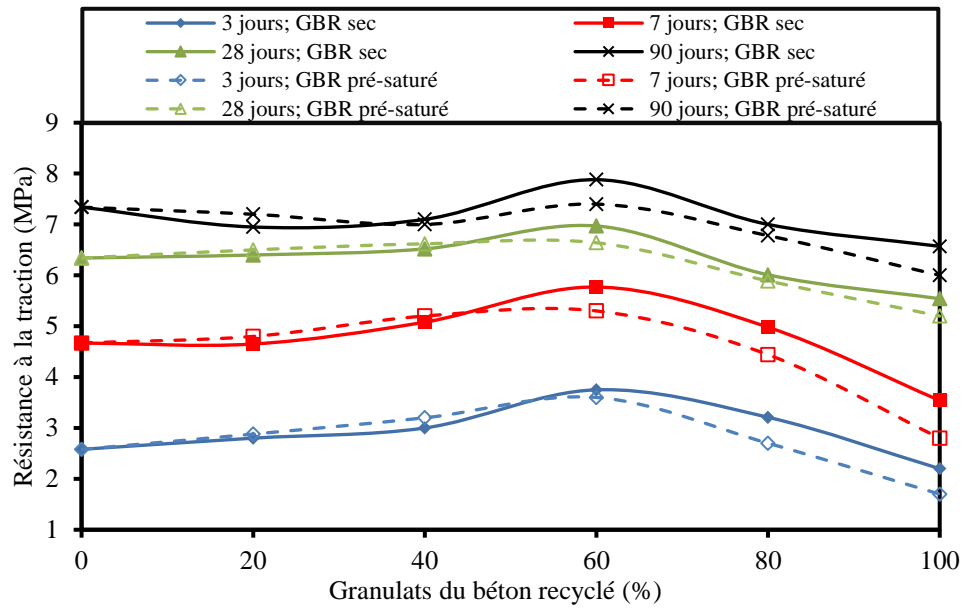


Figure. 4.4 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des GBR sans SP ($E/C=0.6$).

4.3. Influence des GBR sur les propriétés du béton adjuvanté

4.3.1. Effet des GBR sur le besoin en superplastifiant

Pour conserver la même ouvrabilité pour tous les bétons, des dosages convenables de superplastifiant à base de polycarboxylate ont été incorporés pour chaque mélange. L'ouvrabilité a été fixée à 16 ± 1 cm et mesurée par le cône d'Abrams afin d'avoir un béton pratique et maniable. La figure 4.5 montre le besoin en superplastifiant nécessaire pour chaque béton pour atteindre l'ouvrabilité désirée. Le dosage en superplastifiant augmente avec la diminution du rapport E/C et le taux de remplacement des GGO par les GBR dans le béton. Cette augmentation est plus importante lorsque le rapport E/C atteint 0,4 et le taux de substitution est supérieur à 60%. On constate que l'eau de gâchage diminue, alors l'eau ne peut pas couvrir tous les grains de ciment et faciliter ainsi leur mobilité.

Par ailleurs l'introduction des GBR augmente la surface spécifique des granulats dans le mélange et favorise l'absorption d'eau par l'ancien mortier attaché à la surface des granulats. Cela rend la quantité d'eau de gâchage insuffisante pour lubrifier tous les grains et provoque une diminution dans l'ouvrabilité. L'addition de superplastifiant déflocule les grains de ciment et libère l'eau piégée dans les interstices ce qui rend l'eau plus abondante. En plus, l'effet stérique et électrostatique du superplastifiant pousse les particules de

ciment dans la pâte et rend le mélange plus fluide. Le dosage en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la quantité des GBR, cela est dû à la grande capacité d'absorption d'eau des agrégats recyclés conduisant à une faible quantité d'eau libre dans le mélange ce qui nécessite un dosage en superplastifiant plus élevé. Pour un béton contenant 60% de GBR, il faut ajouter 0,2, 0,8 et 3,2% de superplastifiant pour avoir la même ouvrabilité respectivement pour un rapport E/C de 0,6, 0,5 et 0,4. De la même manière, Braymand et al. [76] ont utilisé une grande quantité d'adjuvant (3%) pour le béton à base de granulats recyclés pour remplacer la grande quantité d'absorption d'eau de gâchage des GBR.

Lorsque les GBR sont préalablement saturés avant leurs utilisation dans le béton, le dosage en superplastifiant nécessaire pour atteindre l'ouvrabilité désirée est réduit, même pour le béton à faible E/C. Pour un rapport E/C de 0,4, le béton composé uniquement de GBR pré-saturé devient possible et le besoin en superplastifiant diminue. Le superplastifiant n'est pas nécessaire pour le béton avec un rapport E/C de 0,6 si les GBR sont pré-saturés.

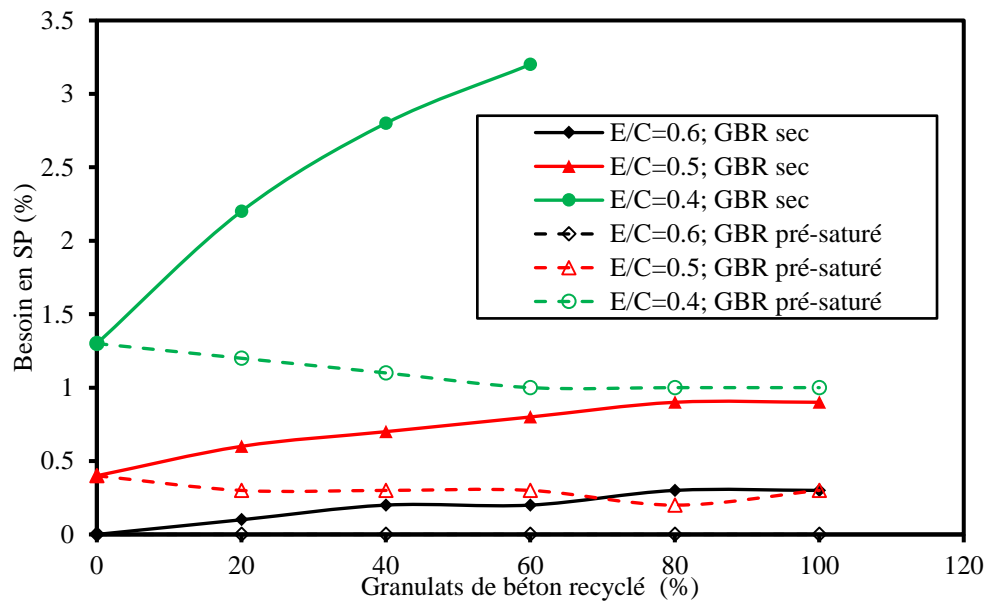


Figure 4.5 : Besoin en superplastifiant pour les bétons utilisés en fonction de la substitution des GGO par les GBR.

4.3.2. Effet des GBR sur les propriétés rhéologiques

Après avoir fixé le dosage du superplastifiant pour chaque béton pour obtenir la même ouvrabilité, plusieurs mélanges ont été préparés pour étudier les paramètres

rhéologiques selon le rapport E/C, la dose de superplastifiant et le pourcentage des GBR (pré-saturé et séchées). Pour chaque béton étudié, les paramètres rhéologiques ont été déterminés par la modélisation du mélange de béton recyclé comme un fluide Binghamien. La corrélation acceptable trouvée confirme l'hypothèse selon laquelle le béton recyclé frais a un comportement d'un fluide Binghamien tel que rapporté par Faleschini *et al.* [52].

Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 illustrent l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité en fonction du pourcentage des GBR pour les trois rapports E/C. Les valeurs des paramètres rhéologiques augmentent avec l'augmentation du taux de substitution des GBR. Cette augmentation est plus importante pour le béton sans pré-saturation. Pour un rapport E/C de 0,6, la pré-saturation n'a aucun effet sur le seuil de cisaillement ou sur la viscosité plastique jusqu'à un taux de substitution de 50%. Au-delà de ce taux la pré-saturation provoque une forte diminution des paramètres rhéologiques. Cette diminution a été observée au-delà d'un taux de substitution de 20%, pour un rapport E/C égal à 0,5. Pour un rapport E/C de 0,4, la substitution des GBR par les GGO provoque une forte demande de superplastifiant qui dépasse la valeur limite prescrite dans les recommandations. Cela rend la mesure des paramètres rhéologiques impraticable. En faisant une pré-saturation des GBR, les paramètres rhéologiques deviennent mesurables et le dosage de superplastifiant devient acceptable. Pour les GBR pré-saturés, la figure 4.6 montre que le seuil de cisaillement augmente de façon monotone avec le pourcentage des GBR tandis que la viscosité reste pratiquement constante.

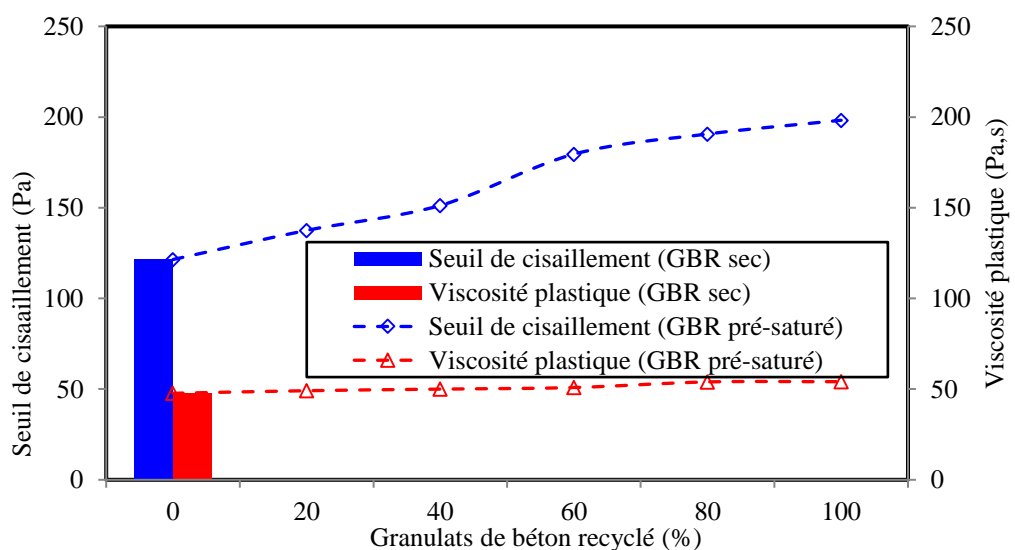


Figure 4.6 : Effet du taux de remplacement des GBR sur les paramètres rhéologiques du béton (E/C=0.4).

Pour un rapport E/C de 0,5 et 0,6 la valeur du seuil de cisaillement du béton composé principalement avec des GBR est deux fois plus élevée que celle du béton ordinaire. Alors que l'augmentation de la viscosité atteint 4 à 1,5 fois par rapport celle du béton ordinaire pour le même rapport E/C respectivement. Lorsque les GBR sont pré-saturés avant l'utilisation dans le béton, les valeurs des paramètres rhéologiques sont considérablement diminuées. Entre un béton ordinaire et un béton fabriqué essentiellement avec des GBR, les valeurs du seuil de cisaillement enregistrent une augmentation de 63%, 80% et 40% respectivement pour un rapport E/C de 0,4, 0,5 et 0,6. La viscosité est significativement diminuée de 13%, 25% et 77% pour les mêmes rapports E/C.

En général, les GBR sont constitués de granulats naturels avec environ 30% du mortier attaché. Ce mortier attaché donne au GBR une surface rugueuse avec de nombreux pores et de micro-fissures, ce qui justifie les principales caractéristiques des GBR; la grande porosité, l'absorption d'eau beaucoup plus élevée, la densité plus faible, la grande angularité et la forme irrégulière [105]. Les résultats de Cartuxo et *al.* [105] constatent que le béton recyclé nécessite 16% d'eau de gâchage supplémentaire pour obtenir la même ouvrabilité. Cela est dû à la forme des granulats recyclés qui augmente le frottement interne et la consistance du mélange. En outre, la capacité d'absorption d'eau des GBR conduit à une demande accrue d'eau pour couvrir tous les grains de ciment. Le dosage en superplastifiant augmente lors de l'utilisation des GBR, ce qui peut être justifié par l'augmentation de la surface spécifique des GBR dans le mélange pour un même dosage en superplastifiant, compte tenu du fait que les GBR sont plus longs et plus anguleux que les GGO tel que rapporté par Pereira et *al.* [106]. Il a été conclu que les GBR augmentent la porosité totale du béton et donc réduisent le volume d'eau de gâchage. Cela réduirait la quantité d'eau en excès pour former des films d'eau de revêtement des particules solides et conduit ainsi à une chute dans les paramètres rhéologiques tel que rapporté par plusieurs chercheurs [96].

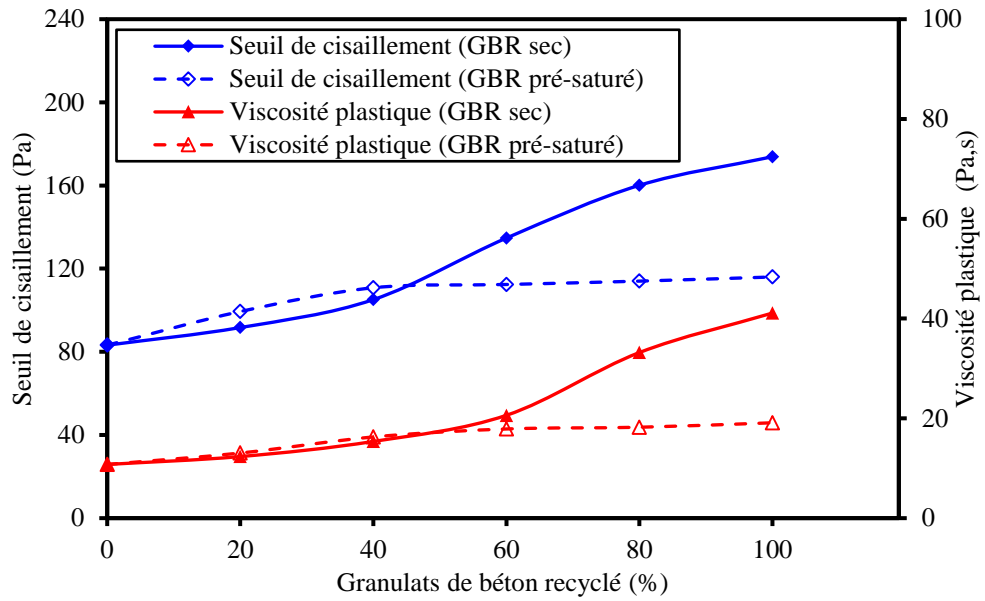


Figure 4.7 : Effet du taux de remplacement des GBR sur les paramètres rhéologiques du béton ($E/C=0.5$).

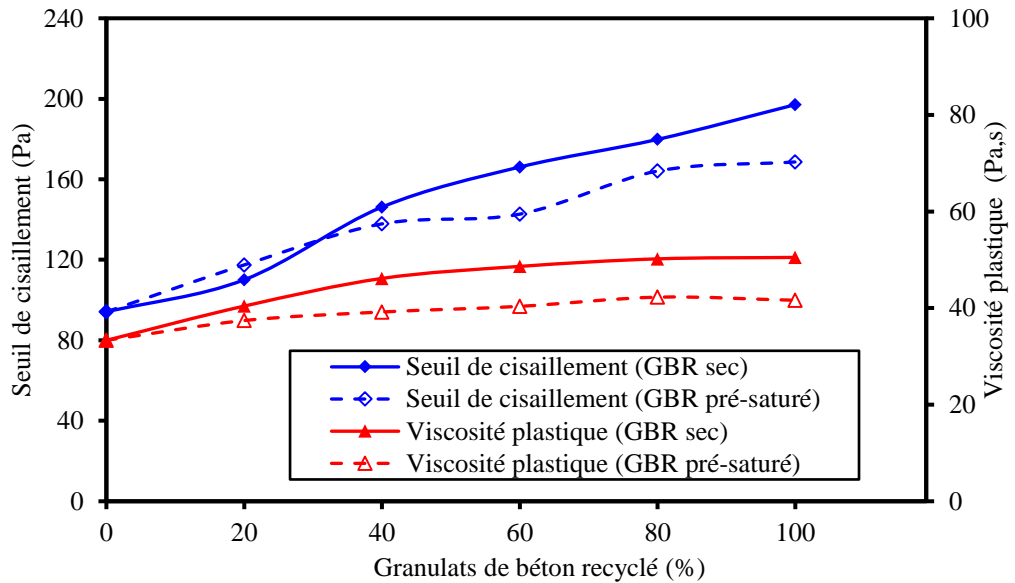


Figure 4.8 : Effet du taux de remplacement des GBR sur les paramètres rhéologiques du béton ($E/C=0.6$).

4.3.3. Effet des GBR sur la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des bétons obtenus représentent la moyenne de trois valeurs pour chaque essai. La résistance à la compression du béton

contenant des GBR évolue avec le temps de la même manière que le béton ordinaire, comme indique les figures 4.9, 4.10 et 4.11. Les résultats de la résistance à la compression obtenus indiquent un effet très positif des granulats recyclés. Cet effet est très lié au rapport E/C et en particulier au dosage en superplastifiant utilisé pour atteindre la même ouvrabilité. L'utilisation de superplastifiant augmente l'ouvrabilité pour le même rapport E/C et augmente la résistance à la compression en diminuant le rapport E/C si l'ouvrabilité est maintenue constante. Lorsque le dosage en superplastifiant est supérieur à la valeur de saturation, une perte significative de la résistance est observée. Pour un rapport E/C égal à 0,4, la figure 4.9 illustre une diminution de résistance à la compression du béton contenant un taux élevé de GBR. Si le taux de substitution des GGO par les GBR dépasse les 60%, le mélange ne peut pas être ouvrable et le dosage en superplastifiant devient inefficace.

Le remplacement des GGO par les GBR provoque un changement de la résistance mécanique surtout à long terme. Pour un rapport E/C de 0,5 et un taux de substitution de 60% des GGO par les GBR, la résistance à la compression augmente d'environ 8,3 MPa, comme le montre la figure 4.10. Par contre, pour un rapport E/C de 0,6, cette augmentation est seulement de 4,5 MPa pour le même taux de substitution. Pour un rapport E/C de 0,4, l'usage excessif de superplastifiant a considérablement réduit la résistance où l'effet positif de granulats recyclés est compensé par l'effet négatif du surdosage de superplastifiant. Cette diminution provoque un retard de l'hydratation et en particulier pour la résistance à la compression à 3 et 7 jours. On peut en conclure que l'utilisation des GBR exige un dosage adéquat de superplastifiant en conformité avec une gamme adéquate de rapport E/C.

Lorsque l'eau de gâchage est réduite, les granulats recyclés génèrent un effet négatif caractérisé par une diminution de la résistance à la compression due à un manque d'eau piégée dans les pores des granulats et qui empêche l'hydratation du ciment. Lorsque le rapport E/C augmente, le mélange contient suffisamment d'eau pour lubrifier tous les grains et l'eau absorbée par les granulats recyclés est compensée par un dosage approprié de superplastifiant. Ensuite, la présence des GBR améliore l'adhérence entre la pâte de ciment et de la surface des agrégats qui conduit à une résistance à la compression plus

élevée par rapport à celles du béton ordinaire, ces résultats sont représentés sur les figures. 4.10 et 4.11 qui correspondent respectivement aux rapports E/C de 0,5 et 0,6.

Cette augmentation de la résistance à la compression est due à la texture de surface plus rugueuse des GBR que celle des granulats ordinaires. Cela provoque une augmentation du frottement entre la pâte et la surface des granulats qui crée une zone de transition solide et améliore la résistance mécanique. Kou et Poon [73] ont conclu que l'eau absorbée entraînée par les GBR peut contribuer à la formation et la croissance des CSH supplémentaires dans les pores capillaires. Son raffinement, son effet filler, et sa transformation des pores capillaires grossiers en plus petits peuvent conduire à l'amélioration de la résistance à la compression observée. L'utilisation excessive de superplastifiant suspend les grains de ciment et retarde ainsi l'hydratation. À un âge précoce, la matrice de ciment ne marque aucune résistance mécanique pour un dosage en superplastifiant supérieur à 3,2%.

Pour surmonter les effets négatifs de la grande absorption d'eau des granulats recyclés et d'éliminer le surdosage du superplastifiant, la technique de la pré-saturation des GBR avant leur utilisation est recommandée par certains chercheurs [18, 21, 101]. Les résultats présentés sur les figures 4.9, 4.10 et 4.11 montrent une comparaison des résultats de la résistance à la compression entre les bétons contenant des substitutions de GBR pré-saturés et le béton contenant seulement des GBR séchés. Les GBR pré-saturés entraînent une augmentation du rapport E/C effectif qui conduit à une légère baisse de résistance à la compression, en particulier à long terme. Pour le béton avec 60% des GBR, la pré-saturation conduit à une baisse de résistance de 1% et 13% respectivement pour des rapports E/C de 0,6 et 0,5. Ce résultat est conforme aux résultats de Yildirim et *al.* [86] dans lesquels la diminution de la résistance à la compression était de 4% à 14%. Lorsque le rapport E/C diminue à 0,4, une amélioration de 73% de la résistance à la compression est observée. Cette amélioration est due à la réduction du dosage en superplastifiant de 3,2 à 1%, ce qui augmente l'efficacité de ce produit et permet d'éliminer ces effets négatifs. On peut en conclure que lors de l'utilisation des GBR avec un faible rapport E/C, il est préférable d'utiliser des GBR pré-saturés pour maintenir le dosage en superplastifiant adéquat.

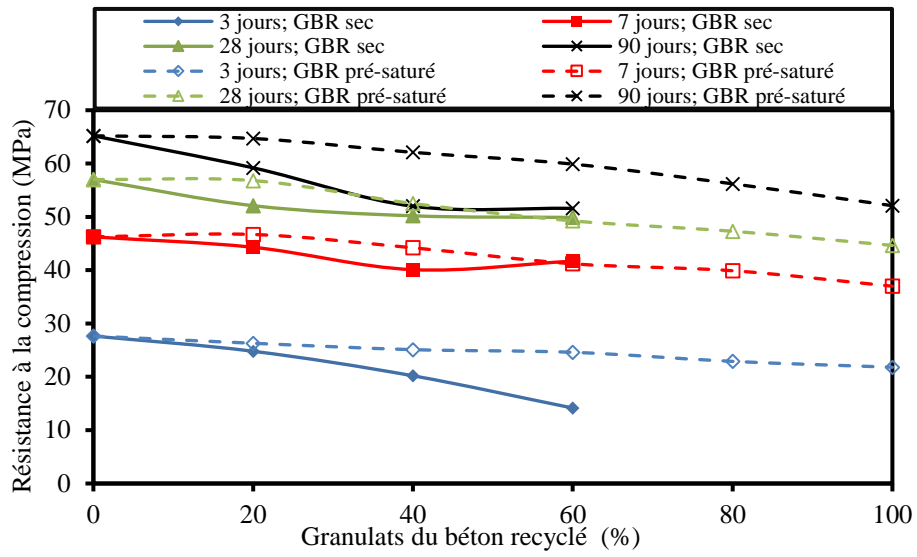


Figure 4.9 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des GBR ($E/C=0.4$).

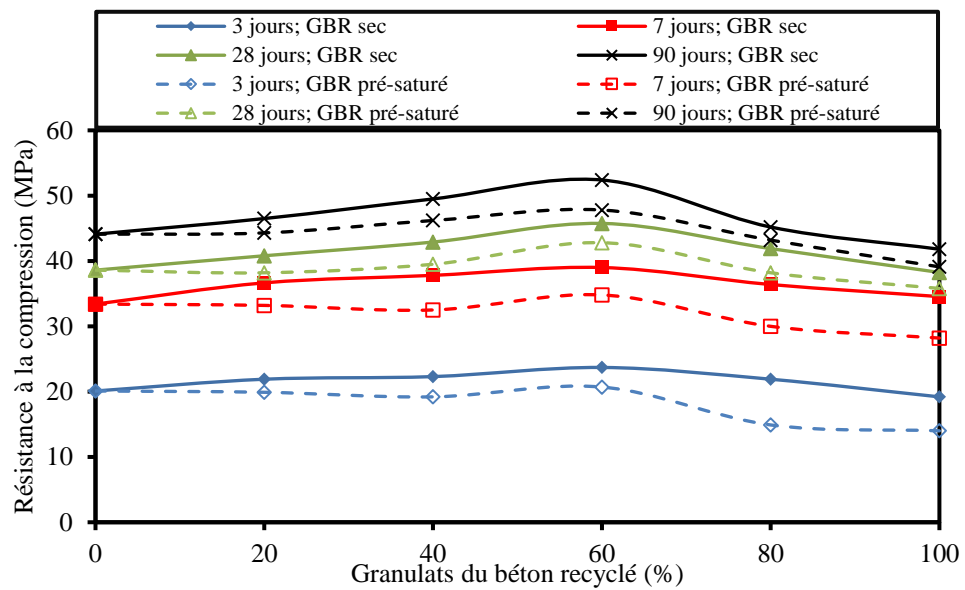


Figure 4.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des GBR ($E/C=0.5$).

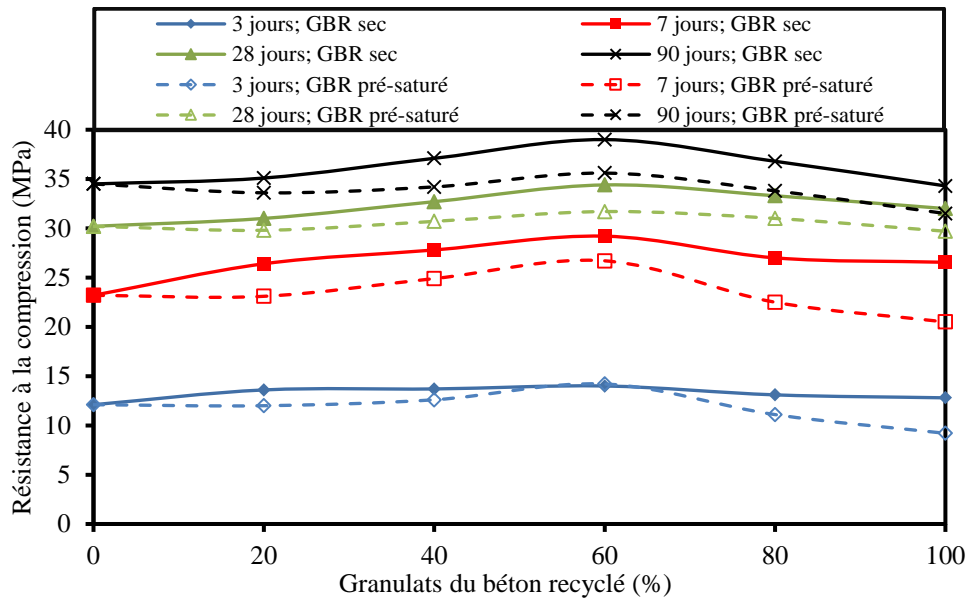


Figure 4.11 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des GBR ($E/C=0.6$).

4.3.4. Effet des GBR sur la résistance à la traction

Les résistances à la traction obtenues confirment celles de la compression et témoignent d'un effet positif des granulats recyclés. Cet effet est très marquant avec l'augmentation du rapport E/C et surtout au voisinage de 60% du taux de substitution. Lorsque l'eau de gâchage est réduit, les granulats recyclés engendrent un effet négatif caractérisé par une baisse de résistance causée par un manque d'eau piégée à l'intérieur des pores des granulats et qui freine l'hydratation du ciment. Lorsque le rapport E/C augmente, l'eau est abondante et la présence des granulats recyclés améliore l'adhérence entre la pâte de ciment et la surface des granulats. Cette amélioration atteint sa valeur maximale de 22% au voisinage de 60% de substitution au jeune âge et qui descend à 4% à long terme.

L'utilisation des superplastifiants est un moyen efficace pour compenser la perte de résistance des GBR avec l'augmentation des taux de substitution. Ces mélanges peuvent présenter moins d'efficacité pour des mélanges contenant des taux élevés des GBR non-saturés, qui absorbent une partie de l'eau de gâchage. Pour équilibrer cela, il est essentiel que les GBR soient utilisés dans un état presque ou totalement saturé pour assurer que les superplastifiants ne soient pas absorbés et qu'ils puissent développer leur effet positif [104].

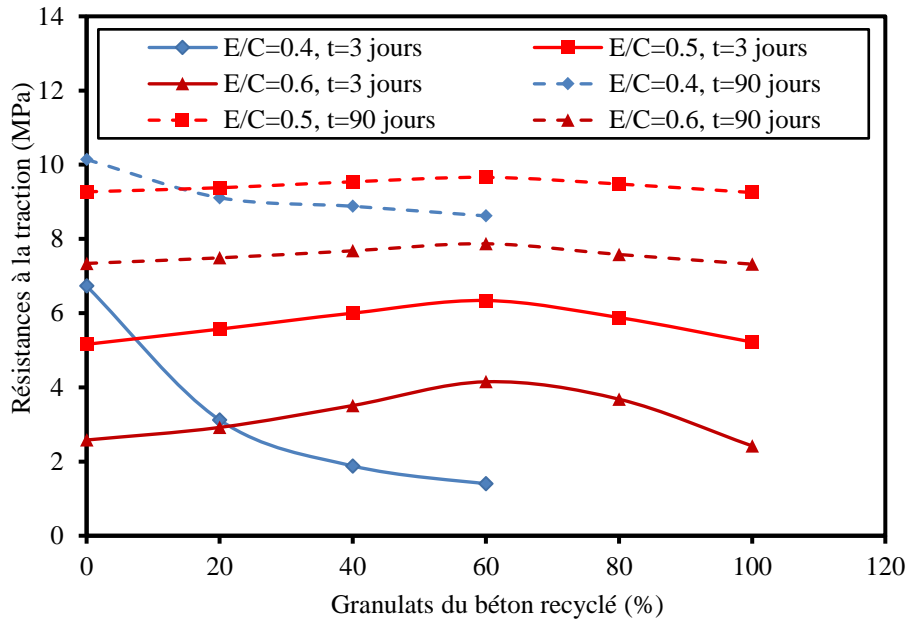


Figure 4.12 : Résistances à la traction des bétons à base de GBR sec pour différents rapports E/C et différents âges.

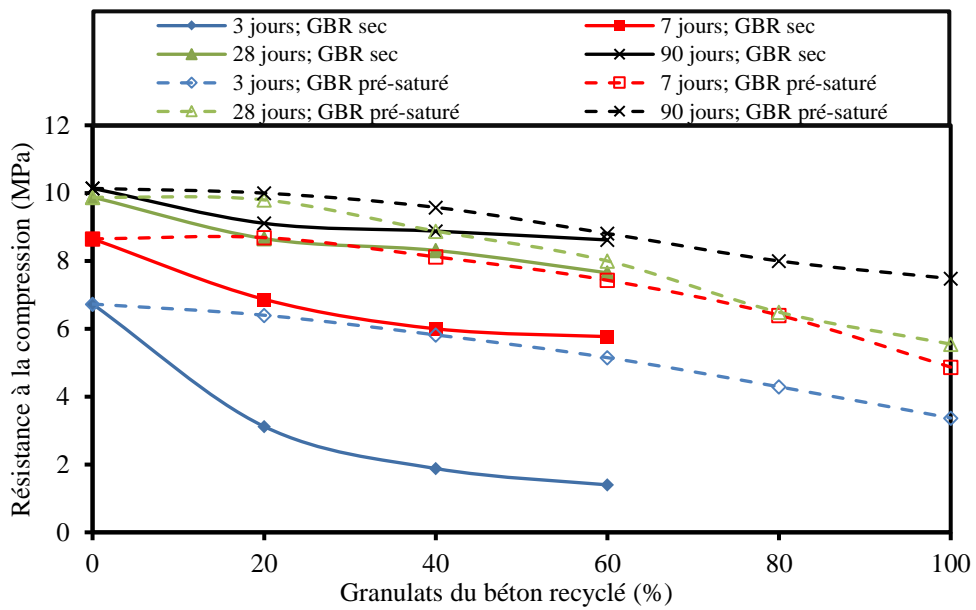


Figure 4.13 : Variation de la résistance à traction en fonction du taux de substitution des GBR (E/C=0.4).

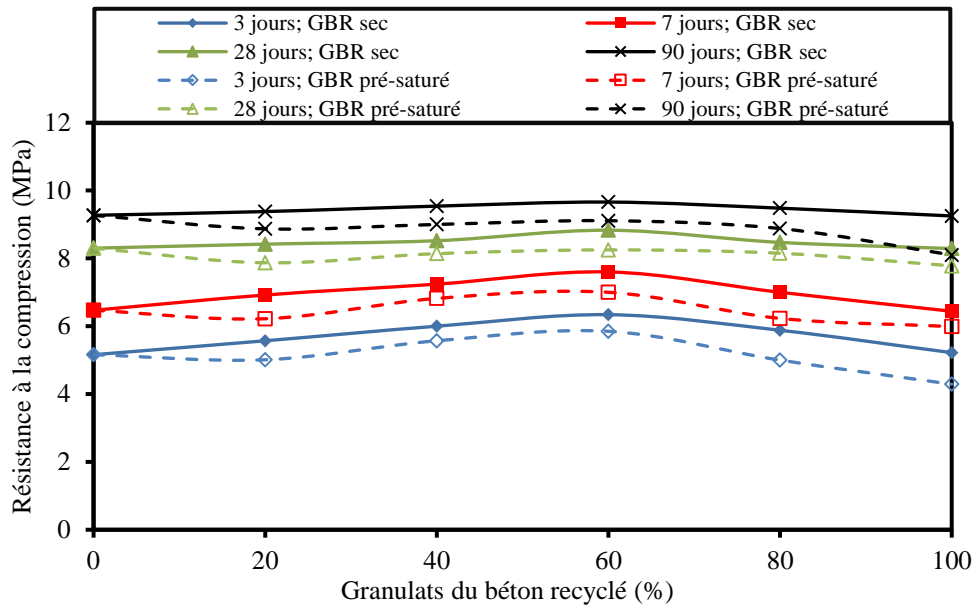


Figure 4.14 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des GBR ($E/C=0.5$).

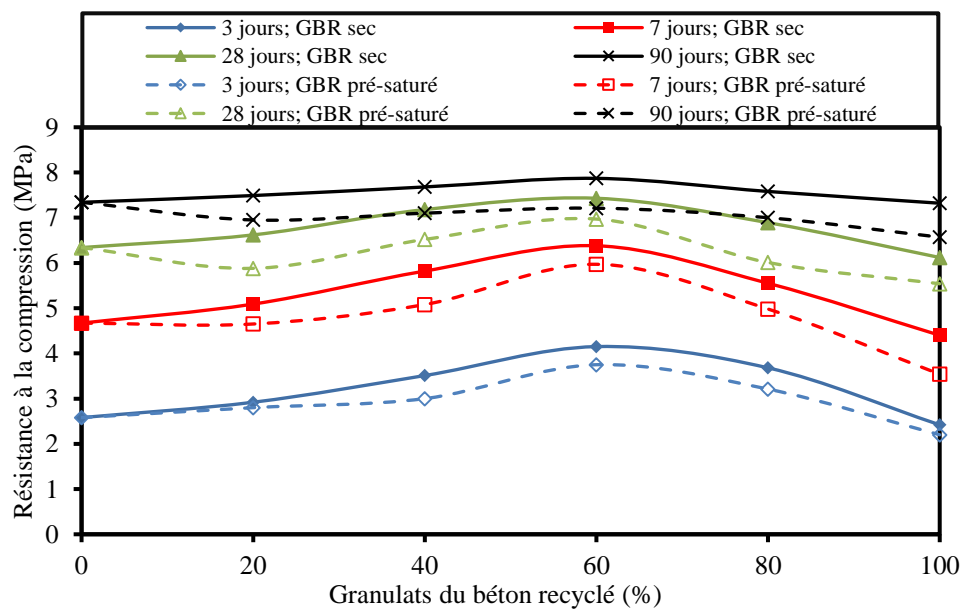


Figure 4.15 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des GBR ($E/C=0.6$).

3.3.4. Effet des GBR sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young est normalement représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte/déformation. Par la linéarisation des valeurs obtenues pour les faibles contraintes, les figures 4.16 et 4.17 illustrent deux exemples de détermination qui montrent des coefficients de corrélation des pentes obtenues supérieurs à 0,99.

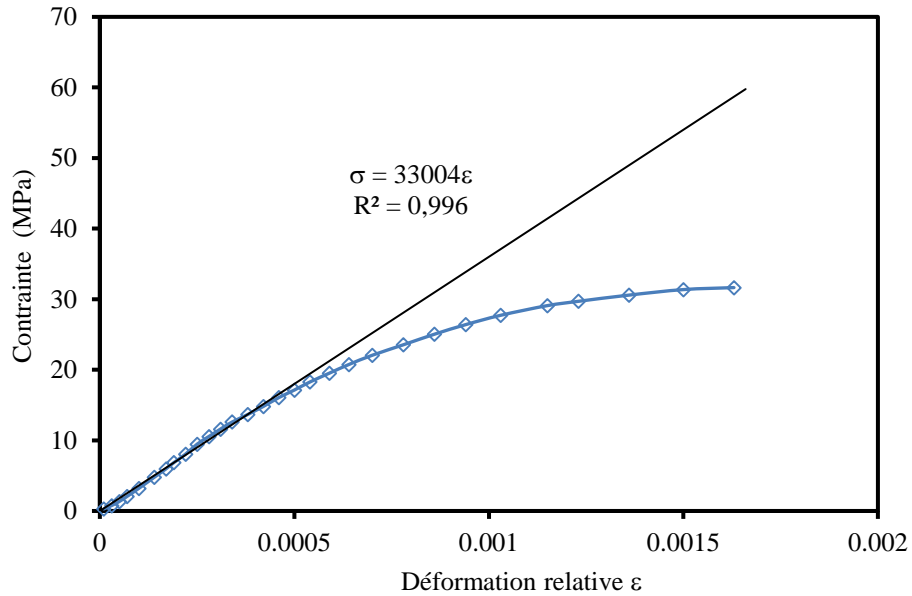


Figure 4.16 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation. (100% GGO ; $E/C=0.5$)

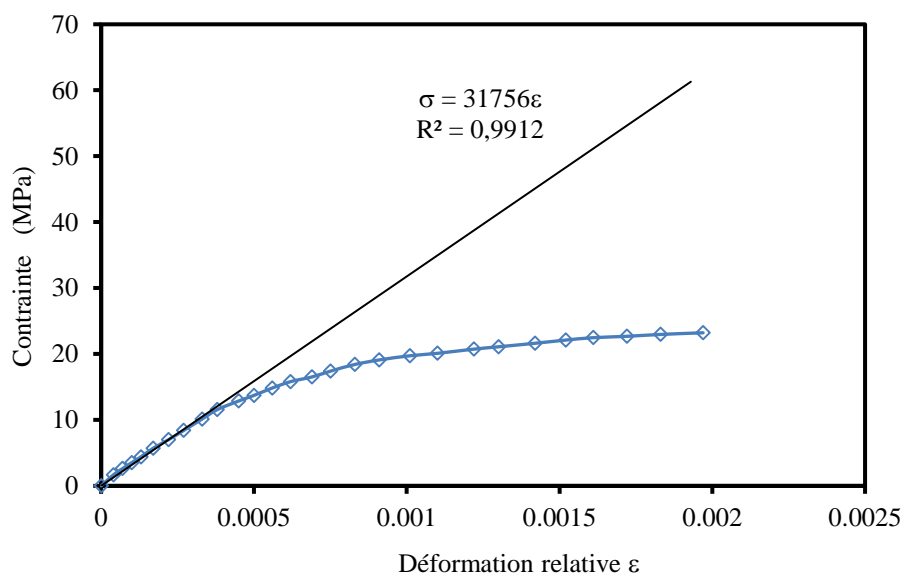


Figure 4.17 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation (20% GBR sec ; $E/C=0.5$).

Les résultats obtenus des modules d'élasticité, pour les différents bétons confectionnés, sont présentés sur la figure 4.18 pour trois rapports E/C et les taux de substitution. Chaque valeur présente la moyenne des modules d'élasticité obtenus pour deux échantillons identiques.

Le module d'élasticité des mélanges ayant un rapport E/C de 0,60 reste presque constant jusqu'à un taux de remplacement de 40%, au delà de ce taux une nette diminution est observée où le module d'élasticité perd jusqu'à 16% de sa valeur lorsque les gros granulats sont totalement substitués par des granulats recyclés. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Etxeberria et *al.* [2], où le module d'élasticité des bétons contenant jusqu'à 50% de GBR est similaire à celui du béton ordinaire, alors que pour un béton complètement recyclé le module d'élasticité diminue de 11%.

Pour des rapports E/C de 0.5 et 0.4 le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du taux de granulats recyclés dans le béton. Pour un béton contenant 60% de granulats recyclés, la figure 4.18 montre une diminution de 9 et 16% respectivement pour des bétons formulés avec des rapports E/C de 0.5 et 0.4. Ces résultats concordent avec ceux trouvés dans la littérature où pour des taux de substitution élevés, des chutes du module d'élasticité de 28% [80] et de 35% [6; 12] ont été observées.

Pour une faible présence de granulats recyclés, la diminution du module d'élasticité du béton reste faible et confirme les résultats trouvés dans la littérature. Pour un rapport E/C de 0.5, le mélange ayant 20% de GBR sec présente une baisse du module d'élasticité de 4% par rapport au béton ordinaire. Cette baisse est de 6% lorsque le béton est malaxé avec un rapport E/C de 0.4. Ces résultats sont très similaires à ceux présentés par Corinaldesi et Moriconi [35]. Ces derniers ont observé une baisse du module d'élasticité de 15% pour un mélange contenant 30% de granulats recyclés.

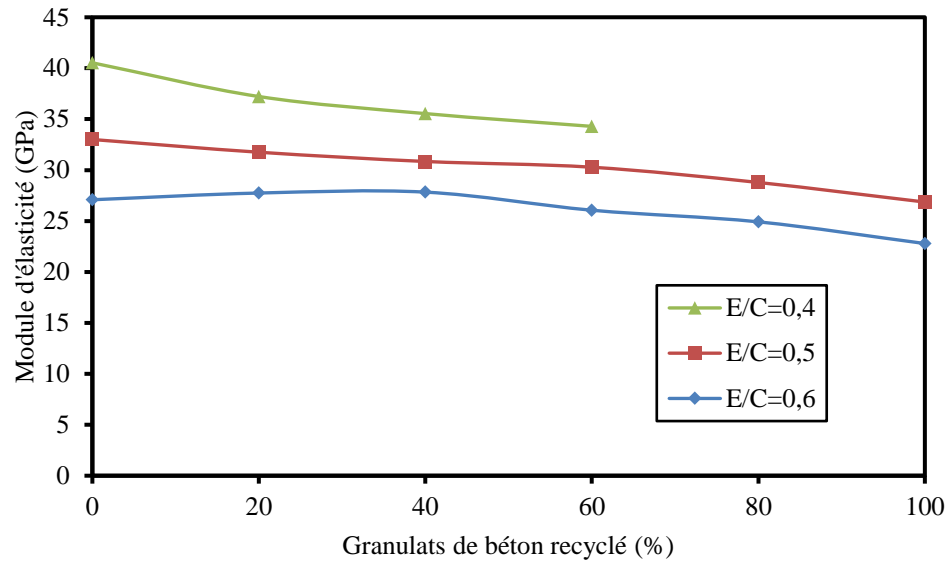


Figure 4.18 : Variation du module d'élasticité en fonction du taux de remplacement des GBR secs.

4.3.5. Effet des GBR sur la perte en poids

Sur des éprouvettes à base de granulats recyclés, on a relevé la variation de leurs poids durant 140 jours au cours du séchage. Les résultats présentés sur la figure 4.19 montrent un effet accélérant de la présence de ces granulats sur la perte en poids. La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés possède le même effet que le rapport E/C. Un béton contenant 60% de granulats recyclés et un rapport E/C de 0.4 achève la même perte de poids qu'un béton ordinaire avec un rapport E/C de 0.5. Le granulat recyclé caractérisé par sa grande porosité crée un lieu de caverne qui favorise la migration de l'eau de la pâte de ciment vers ces refuges. Ces résultats confirment ceux trouvés par Chakradhara Rao *et al.* [12] et Kou et Poon [69], où ils ont constaté que le volume de pore augmente en fonction du taux de substitution des granulats.

Cette grande perte en poids des bétons à base de granulats recyclés est aussi due à la faible densité des GBR. Chakradhara Rao *et al.* [12] ont trouvé que la densité du béton diminue en fonction du taux de remplacement, cette baisse de densité est due en grande partie à la densité plus faible et à la plus grande porosité des granulats recyclés. Selon Fathifazl *et al.* [1], cette baisse de masse volumique serait due à la plus grande teneur en mortier total (mortier résiduel + nouveau mortier) dans le béton avec des granulats recyclés que dans le béton avec des granulats ordinaires.

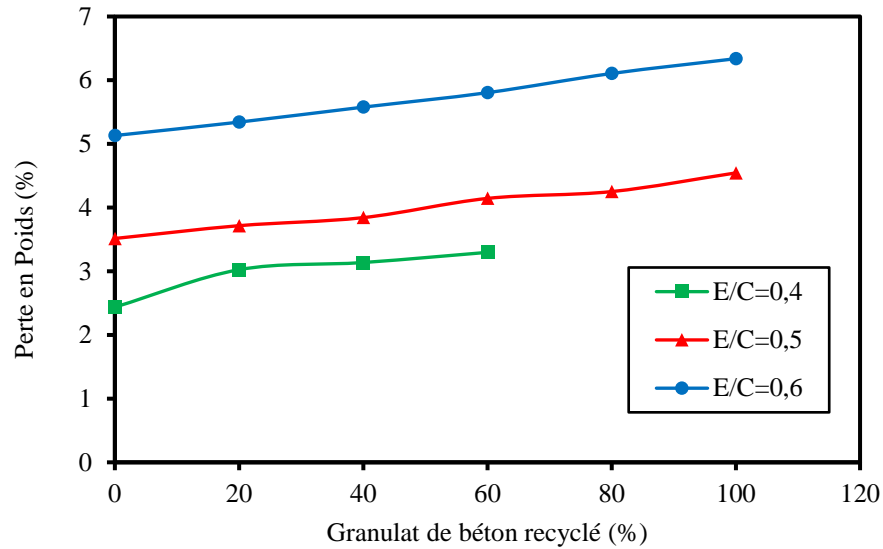


Figure 4.19 : Pertes en poids des éprouvettes en fonction de la teneur en granulats recyclés ($t=140$ jours).

4.3.6. Effet des GBR sur le retrait de séchage

Dans le cas des bétons recyclés, les problèmes de retrait sont encore plus à craindre, compte tenu de la grande absorption des GBR lorsqu'ils sont utilisés à l'état sec. Les mesures de retrait sont effectuées, sur des éprouvettes prismatiques conservées au laboratoire, à l'aide d'un dilatomètre d'une précision de $1\mu\text{m}$. Les résultats illustrés sur la figure 4.20 regroupent les valeurs atteintes après 140 jours d'exposition. Pour des rapports E/C faibles ($E/C=0.4$), la présence des granulats recyclés n'a pas d'effet significatif sur la valeur du retrait final. Par contre, le retrait des bétons aux granulats recyclés est plus important avec des rapports E/C élevés ($E/C=0.6$) et d'une façon proportionnel au taux de substitution.

Il est évident que les granulats recyclés jouent un rôle fondamental sur la cinétique et la valeur ultime du retrait total. La porosité importante favorise la dessiccation et laisse échapper l'eau des interstices de la pâte tandis que la forme irrégulière des grains entrave la déformabilité et freine cette déformation. Cette combinaison des effets opposés donne une évolution non monotone au retrait qui reste très liée au rapport E/C.

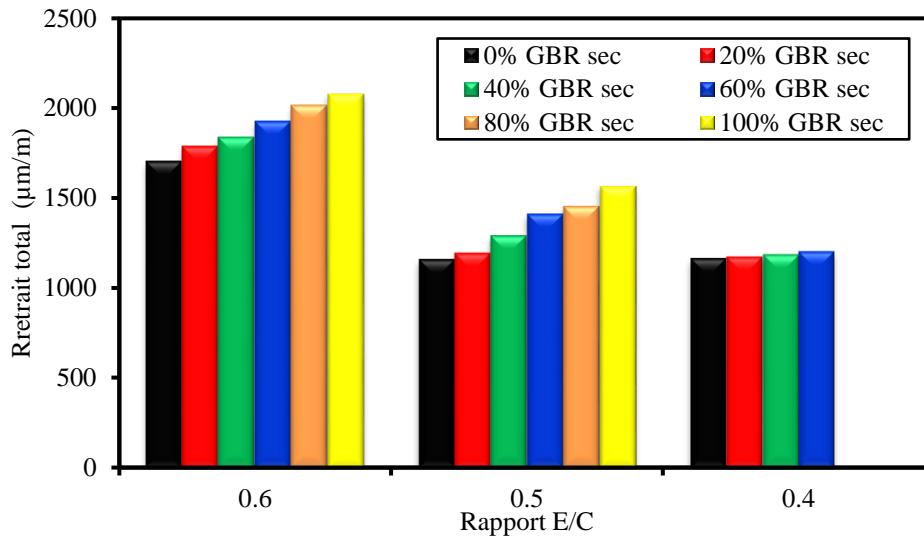


Figure 4.20 : Variation du retrait final ($t=140$ jours) en fonction du rapport E/C.

D'après les figures 3.21 à 4.23, on remarque en général que le retrait à l'air libre des bétons recyclés est nettement plus important que celui du béton de granulats ordinaires surtout pour des rapports E/C élevés.

Pour un rapport E/C de 0.4 le retrait de séchage se stabilise au jeune âge (jusqu'à 7 jours) et devient comparable à celui du béton témoin; au-delà, il est plus important et peut atteindre une augmentation de 15% à 28 jours (figure 4.21). Cette augmentation marque une diminution jusqu'à atteindre 03% à 140 jours. Cela est peut être dû à l'absorption des GBR ainsi qu'au faible rapport E/C qui réduisent l'eau dans le mélange et compense l'effet négatif des GBR en ce qui concerne la faible déformabilité par rapport aux granulats ordinaires [67].

Les figures 4.22 et 4.23 montrent que le retrait du béton à base de gros granulats d'ancien béton concassé pour un E/C de 0.6 et de 0.5 est plus élevé de 22% et 31% respectivement que celui du béton témoin à 28 jours; au-delà, l'augmentation reste constante jusqu'à 140 jours. Le retrait de séchage augmente avec le taux de remplacement des granulats ordinaires par des granulats recyclés. Le retrait augmente de manière significative pour un taux de remplacement supérieur à 40%. Ce résultat est conforme à celui trouvé par Malesev et *al.* [24]. Pour ce groupe de béton, le retrait élevé est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier de l'ancien béton qui recouvre ces granulats [66]. De plus, le vieux mortier attaché aux granulats recyclés continue à subir un retrait dans le temps [107].

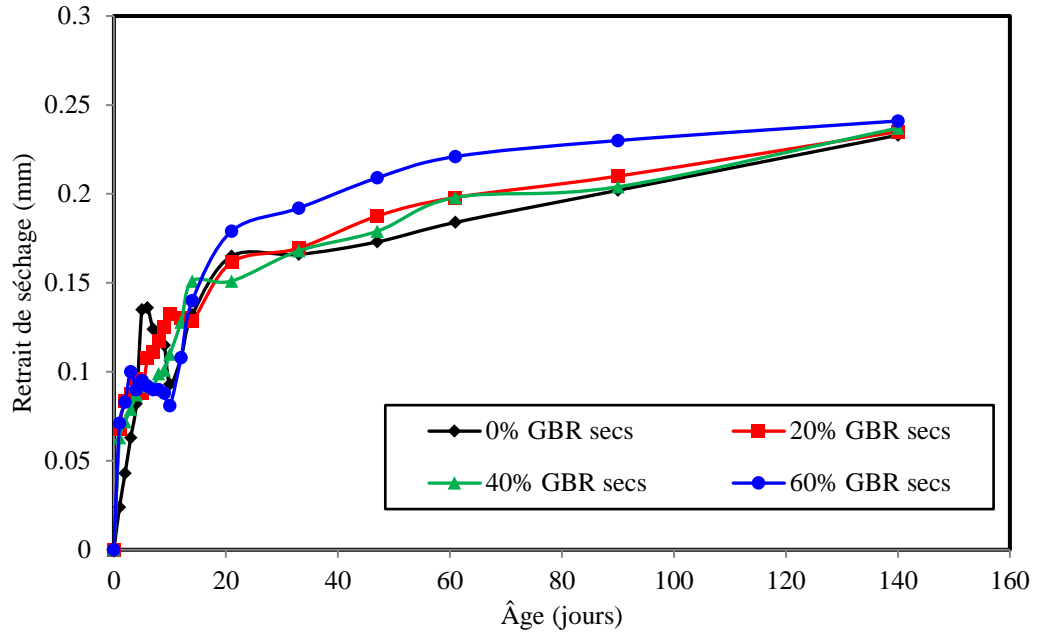


Figure 4.21 : Evolution du retrait du séchage avec le temps ($E/C=0.4$).

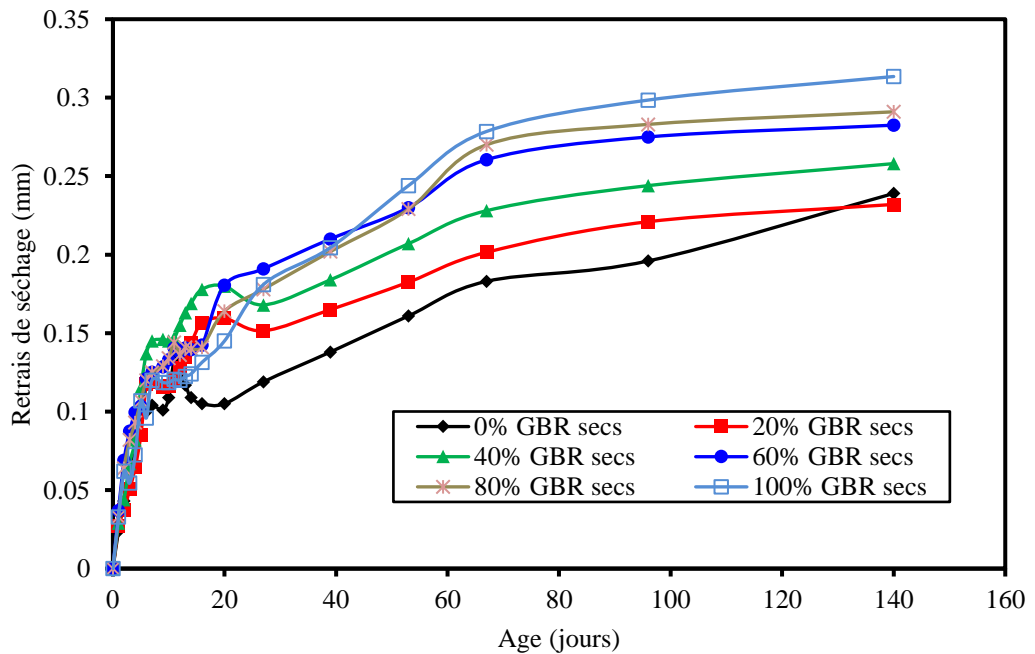


Figure 4.22 : Evolution du retrait du séchage avec le temps ($E/C=0.5$).

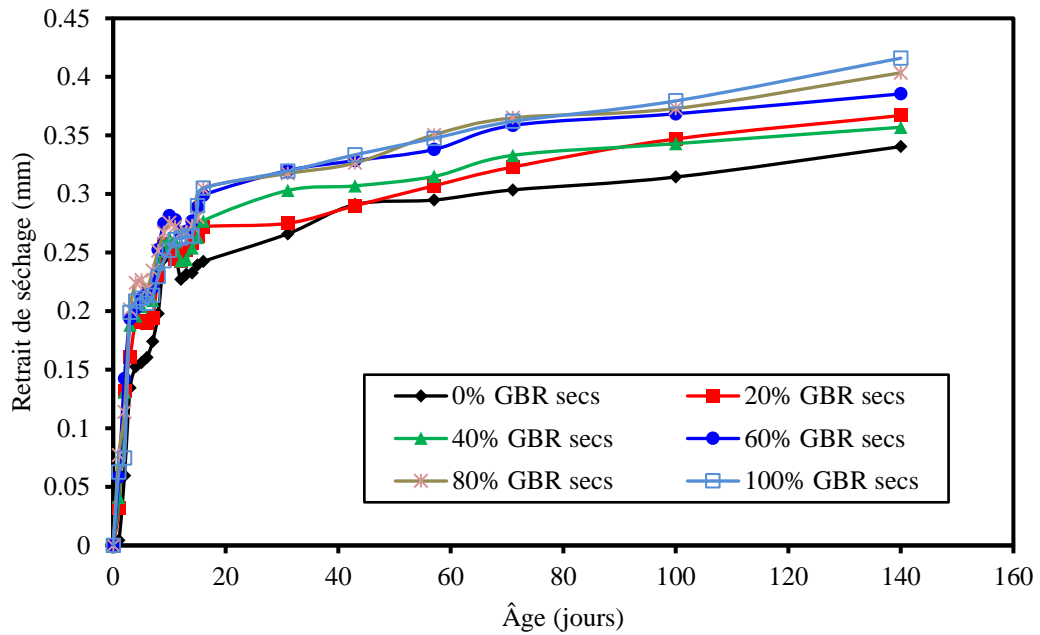


Figure 4.23 : Evolution du retrait du séchage avec le temps ($E/C=0.6$).

4.4. Modélisation des paramètres rhéologiques

D'après les résultats expérimentaux rapportés ci-dessus, il est noté que l'effet des granulats de béton recyclé, le dosage en superplastifiant et le rapport E/C sont très importants. Par ailleurs, l'eau supplémentaire utilisée pour pré-saturer les GBR modifie le rapport E/C effectif qui a un effet fondamental sur les propriétés rhéologiques du béton. Alors, il est intéressant d'exprimer une relation donnant les paramètres rhéologiques du béton en fonction de la composition du mélange. Sur cette base, il a été constaté que les paramètres rhéologiques peuvent être formulés avec l'équation suivante:

$$X = A(1 + k_1 R_A) \left(1 + k_2 S_p + k_3 \frac{w}{c} + k_4 \frac{\Delta w}{c} \right) \quad (4.1)$$

Où A est un paramètre dépendant des matériaux utilisés pour le béton de référence. R_A représente le taux de substitution de granulats recyclés, S_p est le dosage en superplastifiant, E/C est le rapport eau sur ciment, $\Delta w/c$ est le rapport eau pré-saturée sur ciment. k_1 , k_2 , k_3 , k_4 sont des coefficients trouvés par une analyse de régression linéaire à partir des résultats expérimentaux. Le coefficient k_1 exprime l'effet des granulats recyclés sur la variation des paramètres rhéologiques où sa valeur positive reflète son effet négatif. Les coefficients k_2 , k_3 et k_4 expriment respectivement les effets du superplastifiant, de l'eau de gâchage et de

l'eau de la pré-saturation où leurs valeurs négatives reflètent leur efficacité. Le tableau 4.1 récapitule les valeurs de ces coefficients trouvés pour chaque paramètre rhéologique du béton. Les figures 4.24 et 4.25 montrent une comparaison entre les valeurs expérimentales et celles trouvées par l'équation 4.1, dans laquelle les coefficients de corrélation sont 0,88 et 0,96 pour la viscosité plastique et le seuil de cisaillement respectivement. Cette nouvelle relation fournit un moyen très simple pour estimer les paramètres rhéologiques du béton contenant des granulats recyclés utilisés dans l'état sec ou pré-saturé. Le coefficient de corrélation élevé confirme la convenance du choix de cette relation.

Tableau 4.1 : Coefficients de l'équation (4.1) trouvés pour les paramètres rhéologique par la corrélation des résultats expérimentaux

Coefficients (Equation. 4.1)	Seuil de cisaillement (τ)	Viscosité plastique (μ)
Effet du béton de référence; A	254	100
Effet des granulats recyclés ; k_1	1.3	0.72
Effet du superplastifiant ; k_2	-0.09	-0.009
Effet du rapport E/C ; k_3	-1.13	-1.36
Effet du rapport Eau de pré-saturation sur ciment ; k_4	-1.2	-0.94
Coefficient de corrélation; R^2	0.962	0.887

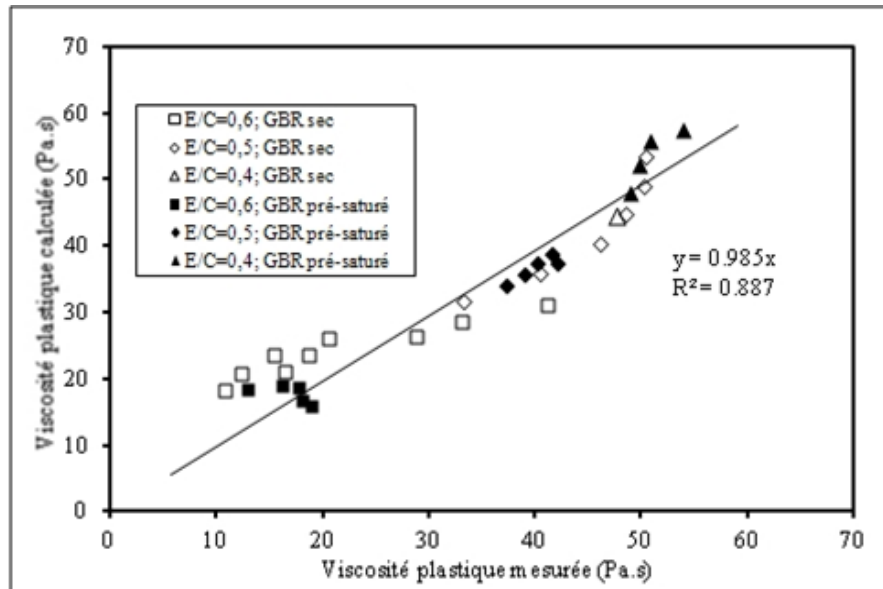


Figure 4.24 : Relation entre les valeurs de la viscosité plastique calculée et la viscosité plastique mesurée.

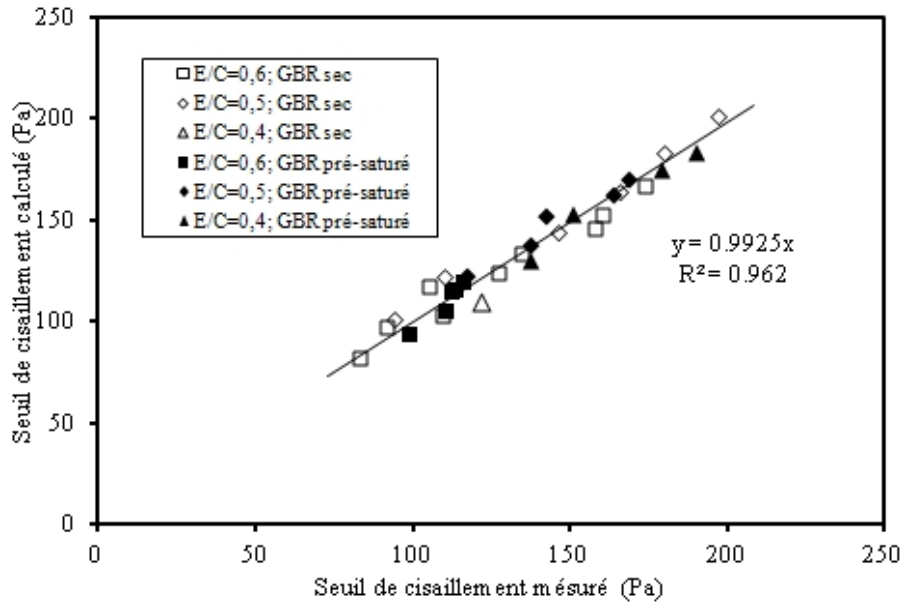


Figure 4.25 : Relation entre les valeurs du seuil de cisaillement calculé et du seuil de cisaillement mesuré.

4.5. Modélisation de la résistance à la compression

La résistance à la compression est une propriété dont son équivalence doit être toujours prise en considération. A cet effet, le modèle de Feret est utilisé pour prédire la résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés. Ce modèle est exprimé par la fonction suivante :

$$f_{cm} = \frac{K_f}{\left[1 + d_c (1+y) \frac{E}{c}\right]^2} \quad (4.2)$$

où E/C est le rapport eau sur ciment, d_c est la densité du ciment ($d_c = 3,1$), y est un coefficient dépendant de la consistance du béton ($y = 0,1$) pour une consistance normale [108] et K_f est un coefficient dépendant du squelette granulaire et de la classe de ciment.

Lorsque le béton est fabriqué à partir des granulats recyclés, et contient une quantité de superplastifiant afin de maintenir une ouvrabilité appropriée pour le béton, le coefficient K_f doit être corrigé par l'introduction d'une fonction linéaire pour le superplastifiant et une fonction parabolique exprimant l'effet des granulats recyclés. Equation 4.2 prend la forme suivante:

$$f_{cm} = \frac{K_f (1+k_1 S_p + k_2 R_A + k_3 R_A^2)}{[1+d_c (1+y)\left(\frac{E}{c} + \frac{\Delta E}{c}\right)]^2} \quad (4.3)$$

Où $\Delta E/C$ est l'eau de pré-saturation des granulats recyclés, S_p est le dosage en superplastifiant, R_A est le taux de substitution des GBR. Une analyse par la méthode des moindres carrés est menée pour trouver la meilleure corrélation de l'équation 4.3 avec les résultats obtenus. Les coefficients de l'équation 4.3 obtenus sont représentés dans le tableau 4.2. Les résultats montrent une bonne corrélation de l'équation 4.3 avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,9. La figure 4.26 illustre ces résultats lorsque le superplastifiant et la substitution des granulats recyclés sont pris en compte dans le modèle de Feret ajusté.

Tableau 4.2 : Coefficients de l'équation (4.3) trouvés pour la résistance à la compression par la corrélation des résultats expérimentaux

Coefficients (Equation. 4.3)	Valeurs des coefficients trouvés
L'effet du béton de référence; K_f	340
L'effet du superplastifiant ; k_1	-0.03
L'effet des granulats recyclés ; k_2	-0.2
L'effet des granulats recyclés ; k_3	0.15
L'effet du rapport Eau de pré-saturation sur ciment ; k_4	0.4
Coefficient de corrélation; R^2	0.923

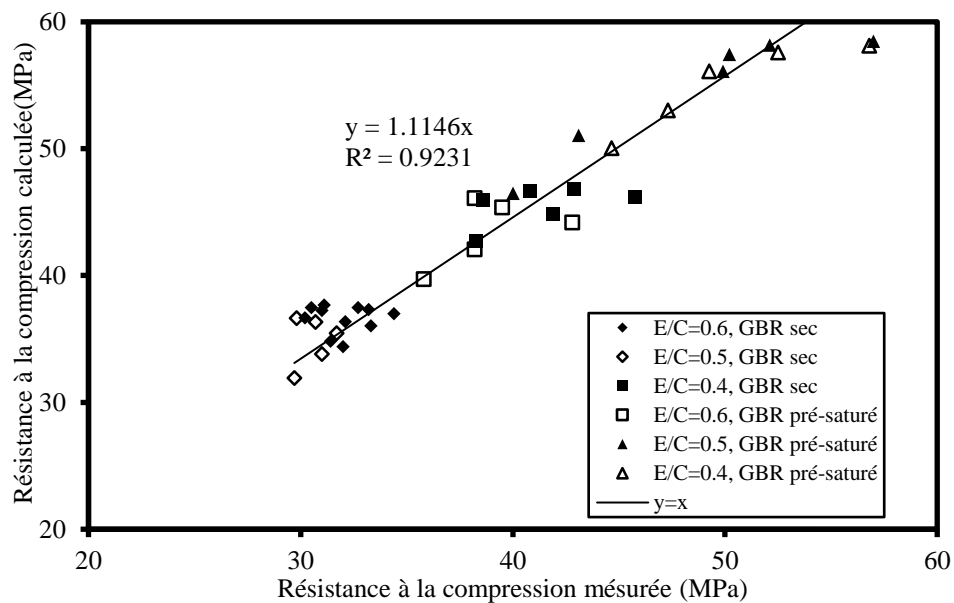


Figure 4.26 : Relation entre les valeurs de la résistance à la compression calculée et la résistance à la compression mesurée à 28 jours.

4.6. Modélisation du module d'élasticité

Le module d'élasticité est la contrainte mécanique qui engendre un allongement relatif unitaire d'un matériau. Il représente la pente initiale de la courbe contrainte-déformation. En pratique, il est possible de conclure le module d'élasticité d'après la résistance à la compression du béton à un âge donné. Plusieurs codes de calcul de béton armé proposent des formules empiriques simples pour estimer ce module à partir de la résistance à la compression à savoir :

a) Eurocode 2 [109] :

$$E_{cm} = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (\text{MPa}) \quad (4.4)$$

b) Ravindrarajah et al. [110] : a proposé une relation pour un béton contenant du sable et des gros granulats recyclés.

$$E_{cm} = 3.02 (f_{cm})^{0.5} + 10.67 \quad (\text{GPa}) \quad (4.5)$$

a) BAEL 99 [111] :

$$E_{cm} = 11000 (f_{cm})^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (4.6)$$

a) CEB-FIB [112]:

$$E_{cm} = 6.6\sqrt{f_{cm}} \quad (\text{GPa}) \quad (4.7)$$

Avec f_{cm} est la résistance à la compression du béton en MPa à un âge donné

La figure 4.27 illustre la variation du module d'élasticité prédit par les différents codes et les résultats expérimentaux obtenus. Il est bien clair que les différents modèles corrént mal les résultats expérimentaux malgré que ces derniers restent dans le domaine de prédiction. Les résultats donnés par le CEB et le BPEL montrent une importante surestimation qui témoigne de leur dépassement et leur substitution par l'Eurocode 2 [109] qui donne des valeurs proches aux résultats expérimentaux. On doit signaler que seule la formule proposée par Ravindrarajah [110] donne des valeurs convenables pour un béton avec granulats recyclés.

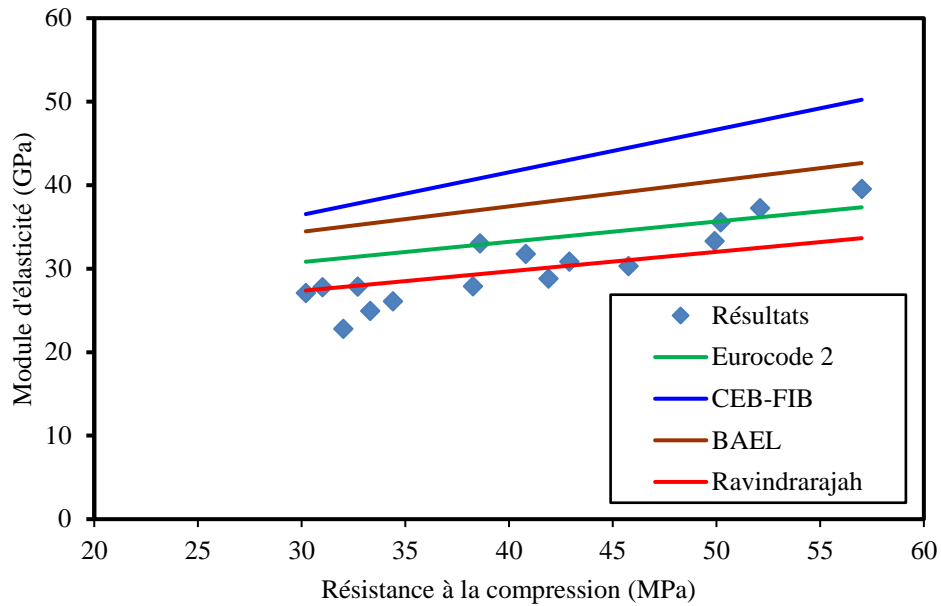


Figure 4.27 : Comparaison de la variation du module d'élasticité prédit par des différents codes et les résultats expérimentaux obtenus.

Lorsque le béton est fabriqué à partir des granulats recyclés, l'équation 4.4 de l'Eurocode 2 nécessite une correction par l'introduction d'une fonction polynomiale tenant compte de l'effet de la substitution des granulats et dont la formule finale est donnée comme suit :

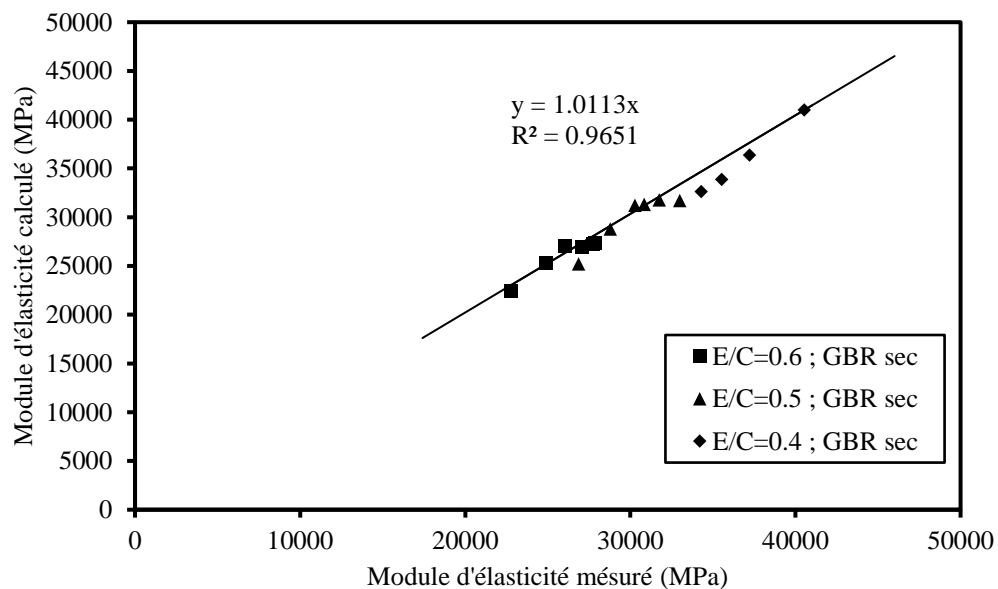
$$E_{cm} = a_0 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{n_0} (1 + aR_A + bR_A^2) \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{(1+a'R_A+b'R_A^2)} \quad (4.8)$$

Avec R_A est le pourcentage de substitution des GGO par les GBR. Les coefficients a_0 , n_0 , a , b , a' et b' représentent l'effet du béton de référence et l'effet du taux de substitution des granulats par des granulats recyclés. Une analyse par la méthode des moindres carrés est utilisée pour trouver la meilleure corrélation de l'équation 4.8 avec les résultats obtenus. Les coefficients de l'équation 4.8 obtenus sont représentés dans le tableau 4.3.

L'équation 4.8 ajuste le modèle classique donnée par l'Eurocode 2 en introduisant l'effet de la substitution des granulats recyclés. Sur la figure 4.28, les résultats du nouveau modèle sont présentés en comparaison avec les résultats expérimentaux où le coefficient de corrélation est de 0.961 ce qui justifie ce choix.

Tableau 4.3 : Coefficients de l'équation (4.8) trouvés pour le module d'élasticité par la corrélation des résultats expérimentaux

Coefficients (Equation. 4.8)	Valeurs des coefficients trouvés
Effet du béton de référence; a_0	1300
Effet du béton de référence; n_0	0.66
Effet des granulats recyclés ; a	0.008
Effet des granulats recyclés ; b	-0.0001
Effet des granulats recyclés ; a'	-0.01
Effet des granulats recyclés ; b'	0.0001
Coefficient de corrélation; R^2	0.9651

**Figure 4.28 :** Relation entre les valeurs du module d'élasticité calculé et le module d'élasticité mesuré à 28 jours.

4.7. Modélisation de la résistance à la traction

La résistance à la traction du béton est généralement déterminée par trois différentes méthodes d'essai : la résistance à la traction directe, la résistance à la rupture par fendage ou la résistance à la flexion.

La figure 4.29 montre la relation entre la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression obtenue à partir des résultats expérimentaux. Elle montre aussi

la relation obtenue par l'utilisation de la formule de l'Eurocode 2 [109] qui est mentionnée comme suite :

$$f_{tm} = 0.3 f_{cm}^{2/3} \tag{4.9}$$

Où f_{tm} est la résistance à la traction directe. La mesure de la résistance à la traction est obtenue à l'aide de la flexion par trois points, alors l'équation (4.9) est divisée par 0.6

Sur la base des résultats expérimentaux obtenue, une expression empirique a été obtenue :

$$f_{tm} = \frac{2}{3} f_{cm}^{2/3} \tag{4.10}$$

La résistance à la traction varie proportionnellement avec la résistance à la compression. La formule de l'Eurocode 2 pour la résistance à la traction à différents âges n'est pas capable de prédire très précisément les valeurs réelles de résistance à la traction des bétons utilisés dans cette étude.

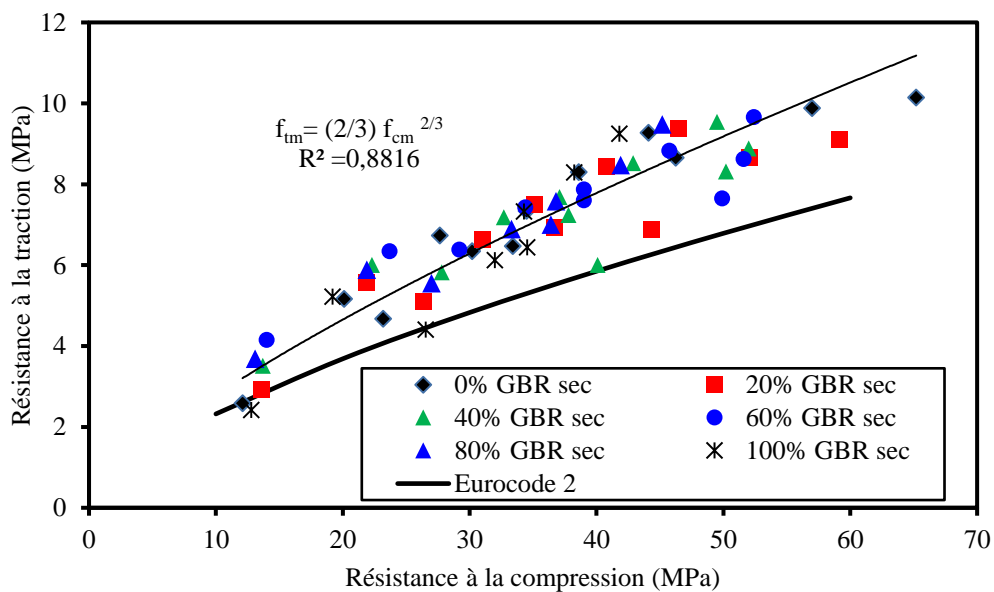


Figure 4.29 : Corrélation entre la résistance à la compression et la traction.

4.8. Modélisation du retrait

Pour évaluer le retrait de dessiccation mesuré des différents bétons formulés à base de granulats recyclés, on a essayé de trouver des corrélations simples de ce phénomène avec la perte en poids au cours des mêmes conditions de séchage. Les résultats présentés sur la figure 4.30 montrent une relation linéaire du retrait final et la perte en poids mesurées après 140 jours. La variation des résultats pour les trois rapports E/C donne des valeurs linéairement proportionnelles surtout pour des bétons ayant E/C élevé. Pour les bétons avec de faibles valeur de E/C ($E/C=0.4$), cette relation perd de sa validité et le retrait enregistré est beaucoup plus stable avec la perte en poids. Ceci concorde avec la théorie de ce phénomène qui stipule que la quantité d'eau de gâchage joue un rôle primordial dans l'évolution du retrait, son évaporation est la cause principale de la déformation du retrait enregistré. En général, la relation trouvée est encourageante et estime le retrait final avec une précision très élevée correspondant à un coefficient de corrélation proche de $R^2=0.95$.

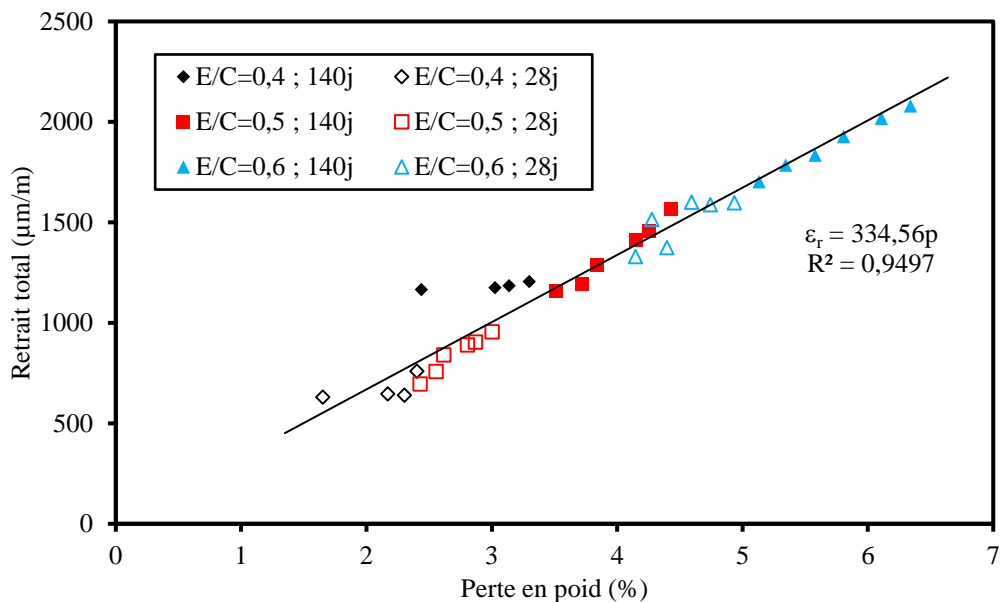


Figure 4.30 : Corrélation entre le retrait total et la perte en poids à 140 et 28 jours.

4.7. Conclusion

Cette étude a permis de concrétiser l'effet de la substitution des granulats de béton recyclé (secs et pré-saturés) sur les propriétés du béton à l'état frais (ouvrabilité et rhéologie), à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité et sur le retrait de séchage). Ainsi que l'influence du superplastifiant sur ces paramètres. Les résultats trouvés montrent que la présence des granulats recyclés dans la formulation du béton entraîne une baisse d'ouvrabilité et un besoin en superplastifiant accru à cause de leur forte absorption d'eau et l'état de leurs surfaces. Par contre, cet effet a des conséquences positives sur les propriétés mécaniques pour des faibles taux de substitution. La pré-saturation préalable des granulats recyclés est une solution prometteuse afin de lutter contre les effets indésirable de ses granulats et de les rendre opérationnels sur les chantiers de la construction.

Conclusions et Recommandations

Conclusions générales

Les présents travaux de recherche ont permis d'étudier les propriétés du béton frais et durci à base de granulats recyclés pré-saturés et sec. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Les granulats recyclés ont une masse volumique plus faible et une absorption d'eau beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels. La vitesse d'absorption relative du granulats recyclés est plus grande que celle du granulats naturel. Cette propriété est donc importante à considérer lors de la préparation des bétons utilisant des granulats recyclés.
- La résistance à l'abrasion des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels.
- Pour le béton sans superplastifiant contenant 60% des GBR sec, avec un rapport E/C de 0,6, l'ouvrabilité est 2,5 fois inférieure à celle du béton de référence. De même, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent respectivement de 90% et 170%. Lorsque les GBR pré-saturés sont utilisés, l'ouvrabilité reste sensiblement inchangée, et l'augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique est réduite respectivement à seulement 35% et 60%.
- Pour des bétons de même consistance, le dosage en superplastifiant augmente avec la diminution du rapport E/C et du taux de substitution par les GBR secs. Cette augmentation est plus importante lorsque le rapport E/C atteint 0,4 et le pourcentage des GBR dépasse 60%. Lorsque les GBR sont préalablement saturés, le dosage en superplastifiant est par conséquent réduit pour le béton à faible rapport E/C et devient inutile pour le béton avec le rapport E/C de 0,6.
- L'augmentation de la substitution des GBR sec augmente les valeurs des paramètres rhéologiques. Pour des GBR pré-saturés, les paramètres rhéologiques du béton deviennent moins affectés et l'exigence de superplastifiant est réduite. Pour des rapports E/C de 0,4, 0,5 et 0,6, la pré-saturation des granulats provoque une grande baisse des valeurs des paramètres rhéologiques au-delà du taux de substitution de 0%, 20% et 50% respectivement. La pré-saturation des GBR rend les paramètres rhéologiques mesurables et conduit à un dosage en superplastifiant acceptable, même pour un faible rapport E/C.

- A des rapports E/C élevés, les résultats avec la substitution de 60% en GBR sec montrent des dosages en superplastifiant acceptables et une augmentation de 13% dans la résistance à la compression du béton à 90 jours. Alors que pour des faibles rapports E/C, l'effet négatif du dosage excessif en superplastifiant réduit la résistance à la compression d'environ 21%.
- Il est possible de minimiser ou de prévenir l'impact négatif des granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais du béton en ajoutant une phase de pré-saturation des granulats avant le malaxage.
- La pré-saturation des granulats du béton recyclé provoque une augmentation du rapport E/C effectif ce qui conduit à une légère baisse de la résistance à la compression, en particulier au jeune âge. Pour un béton contenant au moins 60% des GBR pré-saturés, une baisse de la résistance à la compression de 1% et 13% est observée respectivement pour des rapports E/C de 0,6 et 0,5. Pour un rapport E/C de 0,4, une augmentation de 73% de la résistance à la compression est obtenue, alors que le dosage en superplastifiant est réduit. On peut en conclure que lors de l'utilisation des GBR avec des faibles rapports E/C, il est préférable d'utiliser des GBR pré-saturés pour garder un dosage en superplastifiant adéquat.
- Dans le cas des bétons recyclés, les problèmes de retrait sont encore plus à craindre, compte tenu de la grande absorption des GBR lorsqu'ils sont utilisés à l'état sec. Pour des rapports E/C faibles ($E/C=0.4$), la présence des granulats recyclés diminue considérablement le retrait observé. Par contre, le retrait des bétons aux granulats recyclés est plus important avec des rapports E/C élevés ($E/C=0.6$) et d'une façon proportionnel au taux de substitution.
- Le module d'élasticité des mélanges ayant un rapport E/C de 0,60 reste presque constant jusqu'à un taux de remplacement de 40%, au delà de ce taux une nette diminution est observée. Pour des rapports E/C de 0.5 et 0.4, le module d'élasticité diminue linéairement quand le taux de remplacement augmente.
- Des relations mathématiques sont proposées pour exprimer la variation de la résistance à la compression, le module d'élasticité et les paramètres rhéologiques en fonction de la composition du béton. Ces relations incluent le taux de substitution des GBR, le dosage en superplastifiant, le rapport E/C et l'eau utilisée pour la pré-saturation. Les coefficients de corrélation sont proches de l'unité qui valide la fiabilité des relations proposées.

- Pour les plus hauts taux de remplacement, les granulats recyclés ont généralement un impact négatif sur les résistances mécaniques et les propriétés liées à la durabilité des bétons.

Ce domaine de recherche reste très vaste et nécessite une recherche approfondie afin de mieux cerner les apports techniques des granulats recyclés sur la qualité du béton.

A la fin de ce travail, on peut citer

quelques recommandations pour les futures recherches :

- Il est nécessaire de bien maîtriser les propriétés des matériaux recyclés utilisés dans le but de contrôler l'impact sur les propriétés du béton. Les débris de démolition étant un matériau très variable et difficile à contrôler, il peut être nécessaire de développer de nouveaux systèmes de contrôle qualité pour ces matériaux. Une meilleure maîtrise des essais mesurant la teneur en mortier résiduel peut servir à mettre en place un contrôle qualité des granulats recyclés en fonction de leur teneur en mortier résiduel. Cette teneur en mortier résiduel ayant une corrélation directe avec la qualité du granulat recyclé d'où il est possible d'évaluer rapidement la qualité de ceux-ci.
- Les axes de recherches à approfondir qui ressortent de cette étude s'orientent d'une part, vers la compréhension de la rhéologie des bétons de granulats recyclés et d'autre part, vers l'établissement d'une relation entre la porosité particulière de ces bétons durcis et les propriétés physiques et mécaniques.
- Etudier l'effet du mode la préparation des granulats recyclés et son impact sur la qualité du béton. De même, la recherche de la classe granulaire la plus efficace à être utilisée dans la confection du béton est un axe de recherche très prometteur dans ce domaine.
- Rechercher d'autres ressources de recyclage qui peuvent trouver un refuge dans la confection des bétons. La pratique montrera lesquels seront aptes à se faire accepter et à s'imposer. Pour ce faire, ils devront entre autres présenter un prix acceptable, tout en répondant aux exigences de performances techniques, esthétiques et de durabilité.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009; 21(10): 601-611.
2. M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 2007; 37:735-742.
3. Tam V.W.Y., Gao X.F. and Tam C.M., Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement Concrete Research*, 2005;35(6):1195-1203.
4. Buck, A. D., Recycled concrete as a source of aggregate, *ACI Journal*, 1977; 74(5):212-219.
5. Study on waste generated and treated in Europe, UEPG, 2005. www.uepg.eu
6. EN 206-1 (2004), Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, AFNOR.
7. Rao, A., Jha, K. N. et Misra, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007; 50(1):71-81.
8. Vivian W.Y. Tam, Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 2008; 52: 821-828.
9. Chen H-J, Yen T, Chen K-H (2003) Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33(1):125-132.
10. Manuel G. Beltrán, Francisco Agrela, Auxi Barbudo, Jesús Ayuso, Antonio Ramírez, Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, 2014 ;72: 231-238.
11. Alan Richardson, , Kathryn Coventry , Jennifer Bacon, Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 2011 ; 19(2-3): 272-277.
12. Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures* 2011; 44(1): 205-20.
13. B. Gonzalez-Fonteboa, F. Martinez-Abella, Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties, Building Environment*, 2008; 43:429-437.
14. Yang J, Du Q, Bao Y, Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(4):1935-1945.

15. De Juan MS, Gutiérrez PA, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(2):872-877.
16. A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 2009; 23:829-836.
17. Poon CS, Shui ZH, Lam L, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 2004 ;18(6):461-468
18. 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(1):31-36
19. Santos J, Branco FA, de Brito J, Compressive strength, modulus of elasticity and drying shrinkage of concrete with coarse recycled concrete. XXXIAHS World Congress on Housing 2002, Coimbra, Portugal, pp 1685-1691.
20. Gomez-Soberon JMV, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cement and Concrete Research*, 2002; 32(8):1301-1311.
21. Ferreira L, de Brito J, Barra M., Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *magazine of concrete research*, 2012;63(8):617-627.
22. L. Butler, J.S. West, S.L. Tighe, The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 2011 ;41:1037-1049.
23. Salomon M. Levy, Paulo Helene, Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research*, 2004; 34:1975-1980.
24. Malesev M, Radonjanin V, Marinkovic S, Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* 2010; 2(5):1204-1225.
25. Tam, V. W. Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 2008; 22(3): 364-369.
26. Neville AM, *Properties of concrete*, 3rd edn. Pitman Books Limited, London
Oliveira MB, Vázquez E (1996). The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Manage (Oxf)*, 1981; 16(1-3):113-117.
27. ASTM C-33, Standard Specification for Concrete Aggregates.

28. Jonathan Andal, Medhat Shehata, Philip Zacarias, Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality, *Construction and Building Materials*, 2016 ; 125 :842-855.
29. Hansen, T. C. and Narud, H., Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *concrete international*, 1983; 5(1):79-83.
30. Gonzalez-Fonteboa B, Martinez-Abella F, Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials*, 2007; 21(4):887-893.
31. López-Gayarre F, Serna P, Domingo-Cabo A, Serrano-López MA, López-Colina C Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management (Oxf)*, 2009 29(12):3022-3028.
32. N. Fonseca, J. de Brito, L. Evangelista., The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste, *Cement and Concrete Composites*, 2011; 33:637-643.
33. Gomes M, de Brito J, Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Material Structure*, 2009; 42(5):663-675.
34. 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(3):1287-1291.
35. Corinaldesi V, Moriconi G, Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(8):2869-2876.
36. Katz A, Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 2003; 33(5):703-711.
37. Ravindrarajah RS, Tam TC, Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of concrete research*, 1985; 37(130):29-38.
38. Abbas, A., Fathifazl, G., Burkan Isgor, O., Razaqpur, A. G., Fournier, B. et Foo, S. Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, 2008; 5(1): 1-12.
39. Akbarnezhad A, Ong KCG, Zhang MH, Tam CT, Foo TWJ, Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(8):3469-3479.
40. Abbas, G. Fathifazl, B. Fournier, O.B. Isgor, R. Zavadil, A.G. Razaqpur, S. Foo, Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *material characterization*, 2009; 60:716-728.
41. Barra M, Study of the Durability of Recycled Aggregates Concrete Applied to Structural Purposes (in Spanish). PhD thesis, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, Spain. (1996)

42. Nealen A and Schenk S, The Influence of Recycled Aggregate Core Moisture on Freshly Mixed and Hardened Concrete Properties. (1998). See <http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon13nealenschenk.htm> for further details.
43. Lima J, Proposition of Guidelines for Production and Standardization of Construction and Demolition Waste and of its Application in Mortars and Concrete (in Portuguese). Masters dissertation in Architecture and Urbanism, School of Engineering of Sao Carlos of the University of Sao Paulo, Sao Carlos. 1999: 246p.
44. Sagoe-Crentsil, K., Brown, T. et Taylor, A. H., Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 2001; 31(5), p. 707-712.
45. Rahal, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 2007 42(1), 407-415.
46. Kou, S., Poon, C. et Etxeberria, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2011; 33(2):286-291.
47. Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-Lopez, M. et Lopez-Colina, C. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, 2009; 29(12): 3022-3028.
48. Yang, K., Chung, H. et Ashour, A. F. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 2008; 105(3): 289-296.
49. Otsuki, N., Miyazato, S. et Yodsudjai, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003; 15(5): 443-451.
50. Gai-Fei Peng, Yan-Zhu Huang, Hai-Sheng Wang, Jiu-Feng Zhang et Qi-Bing Liu. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete at Low and High Water/Binder Ratios. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2013, 6 pages.
51. M. Barra de Oliveira and E. Vazquez, The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste Management*, 1996;16(3) :113-117.
52. Flora Faleschini, Cristian Jiménez, Marilda Barra, Diego Aponte, Enric Vázquez, Carlo Pellegrino, Rheology of fresh concretes with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 2014;73:407-416.
53. Fathifazl, G., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Abbas, A., Fournier, B. et Foo, S. Shear strength of reinforced recycled concrete beams with stirrups. *Magazine of Concrete Research*, 2010; 62 (10): 685-699.
54. D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, D. Pedro, Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers aggregates – Influence of the use of superplasticizers, *Construction and Building Materials*, 2013;44:101-109.

55. Zaharieva R, Buyle-Bodin F, Skoczylas F, Wirquin E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2003; 25(2): 223-232.
56. Powers TC, Wiler EM. A device for studying the workability of concrete. *Proc of the ASTM 41*. Philadelphia, US: American Society for Testing and Materials; 1941: 1003-1015.
57. Tattersall GH, Banfill PFG. *The rheology of fresh concrete*. Pitman advanced publishing program; 1983, Great Britain, 356p.
58. Wallevik OH. *The rheology of fresh concrete and its application on concrete with and without silica fume*. The Norwegian Institute of Technology, Dr. Ing. Thesis no. 1990:45, Trondheim, Norway; 1990, 185p.
59. Knaac AM, Kurama YC. Rheological and mechanical behavior of concrete mixtures with recycled concrete aggregates. *Structures congress*. Chicago (US): American Society of Civil Engineers; 2012: 2257-2267.
60. Ferraris CF. Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report. NISTIR 5869. Gaithersburg, US, 1996, 34p.
61. Hu C, de Larrard F. The rheology of fresh high-performance concrete. *cement and concrete research*, 1996; 26(2):283-294.
62. Ferraris CF, de Larrard F. Fresh concrete rheology: recent developments. *Materials science of concrete VI*. In: Sidney Mindess, Jan Skalny, editors. 735 Ceramic Place, Westerville, OH 43081: The American Ceramic Society, 2001: 215–341.
63. Reiner M. *Deformation and flow: An Elementary Introduction to Theoretical Rheology*. H.K. Lewis & Co. Limited, Great Britain; 1949, 346p.
64. Heirman G, Hendrickx R, Vandewalle L, Van Gemert D, Feys D, De Schutter G, et al. Integration approach of the Couette inverse problem of powder type selfcompacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer. Part II. Influence of mineral additions and chemical admixtures on the shear thickening flow behaviour. *cement and concrete research*, 2009; 39:171-181.
65. Mehta, P. K. et Monterio, P. J. M. *Concrete (structure, properties and materials)*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1986. 450p.
66. S. Kenai et F. Debieb, Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés, *Materials Structures*, 2011; 44:815-824
67. Tam, V. W. Y. et Tam, C. M., Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, 2007; 42(10): 3592-3602.
68. Topcu, I. B. et Sengel, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 2004 34(8): 1307-1312.

69. Kou, S. et Poon, C. S. Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 2006; 21(4):130-136.
70. Liam Butler, Jeffrey S. West, Susan L. Tighe, Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Construction and Building Materials*, 2013; 47 :1292-1301.
71. Zhen Hua Duan, Chi Sun Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials and Design*, 2014; 58: 19-29.
72. Paula Folino, Hernán Xargay, Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression, *Construction and Building Materials*, 2014; 56 :21-31.
73. Shi-cong Kou, Chi-sun Poon, Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 2015; 77:501-508.
74. Erhan Güneyisi, Mehmet Gesoğlu, Qays Kareem, Süleyman İpek, Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete, *Materials Structures*, 2016;49(1):521-536.
75. Martinez-Lage, I., Martinez-Abella, F., Vazquez-Herrero, C. et Perez-Ordóñez, J. L. Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 2012; 37:171-176.
76. Sandrine Braymand, Pierre François, Françoise Feugeas and Christophe Fond, Rheological Properties of Recycled Aggregate Concrete Using Superplasticizers, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2015;9:591-597.
77. L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 2007; 29: 397-401.
78. Tabsh, S. W. et Abdelfatah, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(2): 1163-1167.
79. Sri M. Lalaiarasu and K. Subramanian, Properties of recycled aggregate concrete with silica fume, *Journal of applied sciences*, 2006; 6(14): 2956-2958.
80. S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, *journal of materials and civil engineering*, 2007; 19: 709-717.
81. Abd Elhakam, A., Mohamed, A. E. et Awad, E. (2012). 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.

82. L. Berredjem, N. Arabi « les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : formulation et caractérisation d'un béton a base de ces recycles », SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009 : 255-262.
83. Won-Chang Choi, Hyun-Do Yun, Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading, *Engineering Structures*, 2012 ; 41 : 285-293
84. Baofan, C. Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete. *Journal of Wuhan University of Technology. Materials Science Edition* 2013; 28(1): 104-109.
85. Domingo-Cabo, A. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2009; 23:2545-2553.
86. Salih Taner Yildirim, Christian Meyer, Simon Herfellner, 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.
87. ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
88. Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. et Hisada, M. Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(5): 2426-2431.
89. R.V. Silva, R. Neves, J. de Brito, R.K. Dhir. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete, *Cement & Concrete Composites*, 2015; 62:22-32.
90. JianZhuang, X., Bin, L. et ChuanZeng, Z. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2012 ; 55 (9) :2609-2616.
91. XP P 18-303, Normalisation française: Eau de gâchage pour béton, Août 1999, 16p
92. G. DREUX et J. FESTA (1995), "Nouveau guide de béton et de ses constituants". Edition EYROLLES. 7^{ème} Edition 1995.
93. EN 12350-2, Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement - Avril 2012.
94. EN 12390-2, Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance - Avril 2012.
95. Hamza S., Kadri EH., Ngo TT., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., " A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation", *Applied Rheology*, 2014;24(2) 22594: 7 p.
96. Adjoudj M., Ezziane K., Kadri El Hadj., Ngo TT., Kaci A., "Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition

- with polycarboxylate superplasticizer", *Construction and Building Materials*, 2014; 70: 549-559.
97. Dennis Burns, Marc Jolin, Frédéric Gagnon, Frédéric Chapdelaine, *Etat des connaissances dans le béton projeté par voie humide*, Département de génie civil Université Laval Québec, Canada, 2007 : 11p.
 98. Koehler E., Fowler D., Ferraris C., Amziane S., "New portable rheometer for fresh self-consolidating concrete", *ACI Materials Journal*, 2006; 233:97-116.
 99. Lanos C., Estellé P., "Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2009 ; 13(4) :457-471.
 100. Sagoe, K. and Brown, T., *Durability and performance characteristics of recycled aggregate concrete*, in proceeding of the 9th International Conference on Durability of Materials and Components, Rotterdam (Netherlands), 2002, 7p.
 101. Julia García-González, Desirée Rodríguez-Robles, Andrés Juan-Valdés, Julia M. Morán-del Pozo and M. Ignacio Guerra-Romero, *Pre-saturation technique of the recycled aggregates: solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture*, *Materials*, 2014;7(9): 6224-6236.
 102. Barbudo A, de Brito J, Evangelista L, Bravo M, Agrela F., *Influence of water reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete*, *Journal of Cleaner Production* , 2013;59:93-98.
 103. De Brito J, Saikia N., *Recycled aggregate in concrete In: Use of industrial, construction and demolition waste*, London, Springer 2013:445p.
 104. R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir. *Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete*, *Construction and Building Materials*, 2015; 83:108-118.
 105. F. Cartuxo, J. de Brito, L. Evangelista, J.R. Jiménez, E.F. Ledesma, *Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates: Influence of the superplasticizer*, *Construction and Building Materials*, 2015; 89: 36-47.
 106. P. Pereira, L. Evangelista, J. de Brito, *The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates*, *Construction and Building Materials*, 2012;28:722-729.
 107. Guo, Y. et Wang, X. *Experimental study on forecasting mathematical model of drying shrinkage of recycled aggregate concrete*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012:14 p.
 108. Baron J., Olivier J.P., *Les bétons: bases et données pour leurs formulations*, Eyrolles, Frances, 1997 : 522p.
 109. Eurocode 2, *calcul des structures en béton*, NF EN 1992-1-1, Octobre 2005.
 110. R. Sri Ravindrarajah, Y.H. Loo, C.T. Tam, *Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete*, *Magazine of Concrete Research* Dec. 1987;39(141): 214-220.

111. Règles BAEL 91 révisées 99, règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, février 2000 : 168 p.
112. CEB Bulletins, Comité Euro-International du Béton et la0 fédération Internationale de la Précontrainte, Paris, 1978.-