

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire Matériaux de Génie Civil & Environnement (LMGCE)

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Comportement Des Bétons À Base De Granulats Recyclés

Réalisé par

KRIBES Zine-Eddine & ZABAT Walid Chawki

Sous la direction de

M. Abderrahim BALI & Mme Messaouda CHERRAK

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2020

Composition du jury

Président	M. A. LARIBI	MC-B	ENP
Promoteur	M. A. BALI	Professeur	ENP
Promotrice	Mme M. CHERRAK	MC-B	ENP
Examinatrice	Mme N. BAUCHE	MA-A	ENP
Examineur	M. R. BOUTEMEUR	MA-A	ENP

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement (LMGCE)

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Comportement Des Bétons À Base De Granulats Recyclés

Réalisé par

KRIBES Zine-Eddine & ZABAT Walid Chawki

Sous la direction de

M. Abderrahim BALI & Mme Messaouda CHERRAK

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2020

Composition du jury

Président	M. A. LARIBI	MC-B	ENP
Promoteur	M. A. BALI	Professeur	ENP
Promotrice	Mme M. CHERRAK	MC-B	ENP
Examinatrice	Mme N. BAUCHE	MA-A	ENP
Examineur	M. R. BOUTEMEUR	MA-A	ENP

ENP 2020

ملخص

إن إعادة تدوير الركام من نفايات البناء والهدم فيها فوائد متعددة لكل من البيئة والاقتصاد، مما يجعلها موضوعاً قيماً للدراسة. يهدف هذا العمل إلى دراسة إمكانية إدماج الركام المعاد تدويره في إنشاء خرسانة جديدة ودراسة سلوكها وخصائصها.

تمثلت المرحلة الأولى من هذا المشروع في إنتاج الركام المعاد تدويره عن طريق سحق عينات خرسانية قديمة من مختبر المدرسة ، وتمثلت المرحلة الثانية في توصيف الركام الناتج ، حيث وُجد أن الركام المنتج لديه كثافة أقل وامتصاص عالي للماء بسبب عجينة الملاط الملتصقة ، وتمثلت المرحلة الثالثة والأخيرة في صنع خرسانة أُعدت عن طريق استبدال 100 % من حجم الركام الطبيعي الخشن بركام خشن معاد تدويره، كما تم صنع خرسانة تقليدية كعينة مراقبة ، وتم إجراء اختبارات على المزيجين وتم الحصول على النتائج التالية : انخفاض قابلية التشغيل للخرسانة المعاد تدويرها الطازجة بسبب ارتفاع امتصاص الماء للركام المعاد تدويره ، انخفاض بنسبة 10.4% و 26.6% في مقاومة الانضغاط وفي مقاومة الشد على التوالي للخرسانة المعاد تدويرها، ونفاذية للماء ومسامية أعلى.

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره؛ الخرسانة؛ عجينة الملاط؛ مقاومة الانضغاط؛ مقاومة الشد؛ نفاذية.

Abstract

Recycling aggregates from construction and demolition waste can have multiple benefits to both the environment and the economy, which make it a valuable subject of study. The objective of this work is to examine the possibility of incorporating these recycled aggregates in a formulation of a new concrete and to study its behaviour.

The first step is to collect the old aggregates by crushing old concrete specimens stocked in the civil engineering laboratory. The second step consists of characterizing the recycled aggregates. It should be noted that these collected aggregates have a lower density and high water absorption due to the attached old mortar still on them (called also contaminated aggregates). The third and last stage is dedicated to making concrete based on coarse recycled aggregates. The rate of substitution of conventional natural coarse aggregates is 100% by volume. On the other hand, an ordinary concrete has been also made to be considered as a control specimen. Tests on both mixes were conducted and the following results were obtained and consisted of a lower workability of the fresh recycled concrete due to the recycled aggregates; a high water absorption; a reduction in the compressive strength and the tensile strength of the recycled aggregate concrete by 10.4% and de 26.6% respectively, and a higher water permeability and porosity.

Keywords: Recycled aggregates; concrete; compressive strength; tensile strength; permeability.

Résumé

Le recyclage des granulats des déchets de construction et de démolition peut avoir de multiples avantages à la fois pour l'environnement et pour l'économie. C'est ce qui fait de ce sujet une étude d'un grand intérêt. L'objectif de ce travail est d'examiner la possibilité d'incorporer ces granulats recyclés dans la formulation d'un nouveau béton et d'étudier son comportement.

La première phase consiste à récupérer des granulats à recycler en concassant des anciennes éprouvettes et poutres en béton conçues laboratoire du Département génie civil de l'école. La deuxième étape est dédiée à la caractérisation des granulats récupérés. Il a été constaté que les nouveaux granulats à recycler ont une densité plus faible et une absorption d'eau élevée en raison de la présence d'une partie de l'ancien mortier à leur surface (appelés également granulats contaminés). La troisième et dernière phase a consisté à confectionner un béton incorporant 100% en volume de granulats recyclés. Par ailleurs, un béton ordinaire avec des granulats naturels a été réalisé pour servir de témoin. Des essais sur les deux mélanges ont été effectués et les résultats suivants ont été obtenus: une ouvrabilité inférieure du béton frais élaboré due à la forte absorption d'eau des granulats recyclés ; une réduction respective de 10,4% et de 26,6% de la résistance à la compression et de la résistance à la traction par fendage du béton de granulats recyclés; une perméabilité à l'eau et une porosité plus élevées.

Mots-clés : Granulats recyclés ; béton ; pâte de mortier; résistance à la compression ; résistance à la traction ; perméabilité.

Remerciements

Nous voulons d'abord remercier nos encadrants M. Bali et Mme. Cherrak, nous sommes honorés qu'ils aient accepté de nous diriger et de nous guider.

Nous remercions également M. Laribi qui a accepté la présidence de ce jury du PFE, ainsi que Mme. Baouche et M. Boutemour d'avoir accepté d'examiner notre mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Nous voulons aussi exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui nous ont aidés à finaliser ce projet,, en particulier à M. Ahmed Gharnat, un homme très passionné qui nous a beaucoup aidés lors de nos essais au laboratoire, à M. Skander pour le temps qu'il nous a accordé et ses déplacements de Médéa à notre école pour nous apporter son expertise, à Mme Sakhri et Mlle Elguerguari pour les efforts qu'elles ont déployés pour nous permettre de poursuivre de continuer notre travail malgré la pandémie mondiale.

Un grand merci à nos camarades M. Righi et Mlle Ladaycia, avec qui, nous avons partagé le laboratoire et nous nous sommesentraidés pour réaliser ce travail.

Un grand merci aussi à nos camarades M. Bouta et M. Farez qui ont montré de l'intérêt pour notre travail et qui nous ont aidé dans les premières étapes de notre travail.

Finalement, Nous remercions tout le corps enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique

Dédicace

Je rends grâce à ALLAH, et dédie particulièrement ce modeste travail

À ma chère mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que tu as consenti pour mon instruction et mon bien être. Quoi que je fasse ou que je dise, je ne pourrais jamais assez te remercier. Je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance et j'espère que ta bénédiction m'accompagnera toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de tes vœux tant formulés et le fruit de tes innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le très haut, t'accorder santé, bonheur et longue vie et te garder à mes côtés éternellement.

À la mémoire de mon père dans cet évènement marquant. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, Il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils. Que dieu le garde dans son vaste paradis.

À ma sœur et mon frère, ils m'ont épaulé en tout temps. Je ne saurais oublier leur soutien indéfectible.

A mon soutien moral et source de joie et de bonheur BENOTMANE Lina pour l'encouragement et l'aide qu'elle m'a toujours accordée.

À ceux et celles qui m'ont soutenu tout au long de mon cursus, mes amis (STAMBOULI Abderrahman, FAREZ Younes, BIBECH Kenza, MEDJDOUB Tarek, BENALI Cherif, MECHRIE Chakib, REZGUI Khaled, Maddi Anis, ANNABI Adel, SAIAH Mohamed, BOUGERRA Mohamed, YALA Djamel, BENBELAICHE Mehdi, SARI Yacine, NEDJIMI Yanis, TAZAOUI Hani).

Et spécialement à, Mme SAKHRI Samia, Mlle Elguerguari Sihem et M. Gharnata Ahmed, qui ont contribué à rendre ce projet possible, je vous dis merci.

À mon binôme Zabat Walid chawki, et à toute sa famille, au nom de l'amitié qui nous réunit, et au nom de nos souvenir inoubliables.

À tous mes profs de l'ENP qui m'ont soutenu.

À toute ma promotion 2019-2020

Par KRIBES Zine-Eddine

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَلِلَّهِ رُبُّ الْعَالَمِينَ

أَهْدِي هَذَا الْعَمَلُ الْمَتَوَاضِعَ لِلْأُمِّيِّ، الَّتِي طَالَمَا كَانَتْ لِي سِنْدًا

وَلِلَّهِ الَّذِي طَالَمَا أَسْتَعِينُ بِطَمَوحِهِ

وَلِكُلِّ أَفْرَادِ عَائِلَتِي وَأَصْدِقَائِي

زَعْبَابُ وَوَلِيدُ شَوْقِي

Table Des Matières

Liste Des Tableaux

Liste Des Figures

Liste des Abréviations

Introduction Générale.....	18
Chapitre 1 Granulats Recyclés.....	21
1.1 Introduction.....	22
1.2 Méthodes et techniques de démolition.....	23
1.2.1 Techniques de démolition	23
1.2.1.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main.....	23
1.2.1.2 Technique de démolition à l'aide d'outils portés.....	24
1.2.1.3 Démolition par dynamitage.....	25
1.2.1.4 Autres procédés de démolition.....	26
1.3 Elaboration et traitement des granulats.....	26
1.3.1 Les principales étapes de traitement.....	27
1.3.1.1 Le concassage.....	28
1.3.1.2 Le criblage	30
1.3.1.3 Le lavage.....	30
1.3.1.3 Le stockage	30
1.3.2 Les méthodes de séparation des impuretés	30
1.4 Caractéristiques des granulats.....	31
1.4.1 Evaluation du mortier adhérent	32
1.4.2 Propriétés physique des GBR.....	34
1.4.2.1 Forme de particule et texture de surface	34
1.4.2.2 Densité et Porosité.....	34
1.4.2.3 Absorption d'eau.....	36
1.4.3 Propriétés mécaniques des GBR.....	39
1.4.3.1 Résistance à l'abrasion.....	39

1.5 Conclusion	40
Chapitre 2 Béton De Granulats Recyclés.....	42
2.1 Introduction.....	43
2.2 Fabrication du béton recyclé.....	43
2.2.1 Pré-saturation des GBR	44
2.2.2 Malaxage.....	45
2.3 Microstructure du béton recyclé.....	46
2.4 Propriétés du béton recyclé frais.....	47
2.4.1 La maniabilité.....	48
2.4.1.1 Influence du taux de pré saturation.....	48
2.4.1.2 L'Influence de la procédure de broyage des granulats recyclés.....	49
2.4.1.3 Influence du rapport E/C et du superplastifiant.....	51
2.4.2 Masse volumique.....	52
2.4.3 Teneur en air	53
2.4.4 Le ressuage.....	54
2.5 Propriétés du béton recyclé durci.....	54
2.5.1 Propriétés mécaniques du béton recycle durci.....	54
2.5.1.1 Résistance à la compression	54
2.5.1.2 Résistance à la traction.....	56
2.5.1.3 Module d'élasticité.....	57
2.5.2 Propriétés physiques du béton recyclé durci.....	58
2.5.2.1 Gonflement	58
2.5.2.2 Fluage.....	59
2.5.2.3 Porosité.....	60
2.6 La Durabilité	60
2.6.1 Retrait de séchage.....	61
2.6.2 Perméabilité.....	62
2.6.2.1 Perméabilité à l'eau	62
2.6.2.2 Perméabilité à l'air.....	64
2.6.3 Résistance aux cycles de gel/dégel.....	65

2.7 Conclusion	66
Chapitre 3 Procédure Expérimentales.....	67
3.1 Introduction.....	68
3.2 Objectifs du projet.....	68
3.3 Méthodologie	69
3.3.1 Phase 1 : Obtention des granulats recyclés	69
3.2.2 Phase 2 : Conditionnement et caractérisation des granulats recyclés.....	70
3.2.3 Phase 3 : Essais sur le béton.....	71
3.4 Matériaux utilisés	72
3.4.1 Ciment Portland.....	72
3.4.2 Les granulats (naturels et recyclés)	72
3.4.2.1 Granulométrie.....	73
3.4.2.2 Le Coefficient d'Aplatissement (A) :.....	74
3.4.2.3 Essai Los-Angeles.....	75
3.4.2.4 Masses volumiques.....	76
3.4.2.5 Taux d'absorption d'eau :.....	76
3.4.2.6 Propreté des sables.....	77
3.4.3 Eau de gâchage.....	78
3.5 Matériels et équipements utilisés.....	78
3.5.1 Malaxeur.....	78
3.5.2 Les moules	78
3.6 Confection et cure des éprouvettes.....	79
3.7 Formulation et procédure de malaxage du béton	80
3.7.1 Formulation du béton:.....	80
3.7.1.1 Béton témoin	80
3.7.1.2 Béton recyclé (BGR).....	84
3.7.2 Malaxage du béton	84
3.8 Essais sur Béton.....	85
3.8.1 Essai d'ouvrabilité	85
3.8.2 Essai de compression.....	86
3.8.3 Essai de traction par fendage.....	87
3.8.4 Essai de perméabilité à l'eau	88
3.8.5 Essai de porosité.....	89
3.8.6 Essai d'absorption capillaire	90

Chapitre 4	Résultats Et Interprétation.....	91
4.1	Introduction.....	92
4.2	Granulats	92
4.2.1	Analyse granulométrique.....	92
4.2.2	Formes des grains et coefficient d'aplatissement.....	94
4.2.3	Masses volumiques.....	95
4.2.4	Taux d'absorption d'eau.....	97
4.2.5	L'essai Los Angeles.....	98
4.3	Béton frais	99
4.3.1	Ouvrabilité et densité.....	99
4.4	Béton Durci.....	100
4.4.1	Résistance à la compression.....	100
4.4.2	Résistance à la traction par fendage.....	102
4.4.3	Perméabilité à l'eau.....	104
4.4.4	Porosité et absorption d'eau par immersion.....	105
4.4.5	Absorption capillaire.....	106
	Conclusion Générale Et Perspectives.....	108
	Conclusion générale.....	109
	Perspectives.....	110
	Bibliographie	112
	Annexes	119
	Annexe A.....	
	Annexe A.1	120
	Annexe A.2.....	121
	Annexe A.3	122
	Annexe A.4	123
	Annexe A.5	124
	Annexe B.....	125
	Annexe B.1	125
	Annexe B.2	126
	Annexe C.....	127
	Annexe C.1	127
	Annexe C.2	128
	Annexe C.3	129
	Annexe C.4	130

Annexe D.....	131
Annexe D1	131

Liste Des Tableaux

Tableau 1 - 1 : Porosité de GBR et de GN [9].....	36
Tableau 1 - 2 : Le coefficient d'absorption d'eau des GBR selon différentes études.....	37
Tableau 2 - 1 : Performance d'affaissement du béton contenant des GBR pré-saturés ainsi que la capacité d'absorption d'eau.....	49
Tableau 2 - 2 : Affaissement du béton avec des rapport E/C et pourcentage de SP différentes.[40]	51
Tableau 2 - 3 : La masse volumique de divers mélanges de béton contenant des GN et des GBR, ainsi que la masse volumique des granulats	52
Tableau 2 - 4 : Teneur en air du mélange de béton contenant des granulats recyclés pré-saturés	53
Tableau 2 - 5 : Réduction du module d'élasticité du béton avec 100% GBR.....	58
Tableau 3 - 1 : Identification des granulats naturels et recyclés utilisés	73
Tableau 3 - 2 : Eprouvettes utilisées pour la réalisation des essais sur les différents bétons ..	80
Tableau 3 - 3 : Valeur de K.....	83
Tableau 3 - 4 : volumes absolus des matières solides en litres /1000.....	83
Tableau 3 - 5 : Composition d'1 m3 de BGN.....	84
Tableau 3 - 6 : Composition d'1 m3 de BGR.....	84
Tableau 3 - 7 : Procédure de malaxage du béton.....	84
Tableau 3 - 8 : Classes d'affaissement.....	85
Tableau 3 - 9 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [73]	89
Tableau 4 - 1 : Les caractéristiques granulométrique	93
Tableau 4 - 2 : Présentation des caractéristiques granulométrique.....	94
Tableau 4 - 3 : Coefficient d'aplatissement (A) des granulats utilisés	95
Tableau 4 - 4 : Masses volumiques mesurées des bétons réalisés	100
Tableau 4 - 5 : Résistance à la compression des bétons réalisés	100
Tableau 4 - 6 : Valeurs de la résistance à la compression équivalentes pour des éprouvettes cylindriques	102
Tableau 4 - 7 : Résistance en traction des bétons réalisés.....	102
Tableau 4 - 8 : Absorption d'eau et Porosité des bétons réalisés.....	105

Liste Des Figures

Figure 1.1 : Outils manuels (a) Marteau piqueur (b) Perceuse et (c) Marteau de forgeron [3].	24
Figure 1.2 : Outils portés par un engin mécanique a) Démolition par l'excavateur [3] b) Démolition par la boule de démolition [3].....	25
Figure 1.3 : Démolition par dynamitage [3].....	25
Figure 1.4 : Démolition par jet d'eau [3].....	26
Figure 1.5 : Schémas de fonctionnement d'une centrale de recyclage/concassage [5].....	27
Figure 1.6 : Concasseur à mâchoires [7].....	28
Figure 1.7 : Concasseur à impact (ou à percussion) [7].....	29
Figure 1.8 : Concasseur, à cône [7].....	29
Figure 1.9 : Analyse du scanner 3D de granulats[11].....	32
Figure 1.10 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et la taille des GBR[13].	33
Figure 1.11 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et la densité à l'état saturés d'eau surfaces sèche [13].....	35
Figure 1.12 : Conditions d'humidité des granulats [14].....	37
Figure 1.13 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et le coefficient d'absorption d'eau [13]	38
Figure 1.14 ; Absorption d'eau par les GBR par rapport à l'augmentation du temps d'immersion [22].....	38
Figure 1.15 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et le coefficient LA [13].....	40
Figure 2.1 : Les procédures de mélange du béton normal (NMA) et en deux étapes (TSMA) adoptées par Tam et al. (2008) [1].....	45
Figure 2.2 : Auréole de transition (AT) dans un béton de GBR(a) et un béton de GN(b) [32]	47
Figure 2.3 : Schématisation de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	48
Figure 2.4 : Représentation des résultats d'affaissement obtenus du test [39].....	50
Figure 2.5 : Relation entre le rapport granulats ciment et résistance à la compression du BGR [1].....	56
Figure 2.6 : Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression du BGR[1].....	56
Figure 2.7 : Relation entre la porosité ouverte et la résistance à la traction [41].....	57
Figure 2.8 : Coefficient de fluage du béton avec remplacement du GN grossier par du GBR grossier [46].....	59
Figure 2.9 : Organigramme des différentes causes de détérioration du béton.....	60
Figure 2.10 : Retrait de séchage du béton courant et du BGR (CC) en fonction du temps[50]	61

Figure 2.11 : Profondeur de pénétration de l'eau en fonction du rapport E/C après 28 jours [51]	63
Figure 2.12 : Pénétration maximale de l'eau sous pression en fonction de la résistance à la compression du BGR [51]	64
Figure 3.1 : Programme expérimental.....	69
Figure 3.2 : Démolition et élaboration des granulats recyclés.....	70
Figure 3.3 : Mesure de coefficient d'aplatissement	71
Figure 3.4 : Essai de traction par fendage.....	72
Figure 3.5 : Les GBR 15-25 après fragmentation	75
Figure 3.6 : Les GBR immergés dans l'eau pendant 24h.....	77
Figure 3.7 : Malaxeur à axe rotatif vertical.....	78
Figure 3.8 : Cure des éprouvettes	79
Figure 3.9 : Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E[69].....	81
Figure 3.10 : Courbe granulométrique.....	82
Figure 3.11 : l'essai d'affaissement	86
Figure 3.12 : Ruptures correctes d'éprouvettes cubiques [64]	86
Figure 3.13 : Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cubiques [64].....	87
Figure 3.14 : Dispositif d'Essai de perméabilité à l'eau	88
Figure 3.15 : L'Essai de de porosité	89
Figure 3.16 : Essai d'absorption capillaire.....	90
Figure 4.1 : Courbes granulométriques des granulats (8/15) naturels (GN) et de bétons recyclés (GBR)	92
Figure 4.2 : Courbes granulométriques des granulats (15/25) naturels (GN) et recyclés (GBR)	93
Figure 4.3 : Exemple d'une particule de GBR 15-25	94
Figure 4.4 : Masses volumiques absolues des granulats utilisées.....	96
Figure 4.5 : Masses volumiques en vrac des granulats utilisées	96
Figure 4.6 : Taux d'absorption d'eau des granulats utilisés.....	97
Figure 4.7 : Coefficients Los-Angeles des granulats utilisés.....	98
Figure 4.8 : Affaissement des bétons réalisés.....	99
Figure 4.9 : Résistance à la compression des bétons réalisés.....	101
Figure 4.10 : Résistance à la traction par fendage des bétons réalisés	103
Figure 4.11 : Pénétration d'eau des bétons réalisés	104
Figure 4.12 : Porosité des bétons réalisés	105
Figure 4.13 : Absorption d'eau par capillarité en fonction du temps des différents bétons réalisés.....	106

Liste des Abréviations

Lettres latines

A	Coefficient d'Aplatissement
Ab	Taux d'absorption d'eau
Abs	Absorption d'eau par immersion
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Auréole de transition
BAEL	Béton armé états limites
BGN	Béton Granulats Normales
BGR	Béton Granulats Recyclés
BPE	Béton Prêt à l'Emploi
Cc	Coefficient de courbure
CPJ-CEM 32.5	Ciment Portland composé
Cu	Coefficient d'uniformité
D ou Dmax	Dimension supérieure d'une classe granulaire, exprimée en millimètres (mm)
d	Dimension inférieure d'une classe granulaire, exprimée en millimètres (mm)
DIN	L'Institut allemand de normalisation
di/Di	Classe granulaire, exprimée en millimètres (mm)
Eeff	Dosage en eau efficace, exprimée en kilogramme par mètre cube (kg/m ³)
EHE	Le code Espagnol du béton structurel
Es	Equivalant de sable
EN	Norme Européenne définitive
E/c	Rapport entre la masse d'eau et la masse de ciment
F	Charge de rupture, exprimée en N
fc28	Résistance à la compression à 28 jours, exprimée en MPa (N/mm ²)
Fcj	Résistance à la compression à jour j, exprimée en MPa (N/mm ²)
G	Gravier
GBR	Granulats bétons recyclés
GN	Granulats naturels
H	La hauteur de l'éprouvette, exprimée en millimètres (mm)
J ou jrs	jour
K	Terme correcteur qui dépend du dosage en ciment et la forme des granulats
Kp	Terme correcteur de l'efficacité
Ks	Terme correcteur du module de finesse du sable
LA	Coefficient Los Angeles

Mf	Module de finesse des sables
NBN	Bureau de normalisation Belge
NF	Norme Française
NF P	Norme Française applicable au bâtiment et génie civil
Rc	Résistance à la compression, exprimée en MPa (N/mm ²)
Rt	Résistance à la traction, exprimée en MPa (N/mm ²)
S	Sable
SEMA	Sand Enveloped Mixing Approach
SP	Superplastifiant
SSS	Saturé Surface Sèche
TSMA	Two stage mixing approach
UE	Union européenne
2d	2 dimension
3d	3 dimension

Lettres grecques

γ	Coefficient de compacité
ρ_{abs}	Masse volumique absolu, exprimée en kilogramme par mètre cube (kg/m ³)
ρ_{app}	Masse volumique apparent, exprimée en kilogramme par mètre cube (kg/m ³)
$\rho_{réal}$	Masse volumique real, exprimée en kilogramme par metre cube (kg/m ³)
\emptyset	Diamètre, exprimée en millimètre (mm)

Introduction Générale

Après l'eau, le béton est le matériau le plus consommé dans le monde, avec trois tonnes par an utilisées pour chaque personne sur terre.

Les constructions dans le monde continueront à consommer des millions de tonnes de béton et à produire simultanément des millions de tonnes de déchets de démolition.

La demande pour ce matériau a explosé et comme environ 75% de son volume sont des granulats, les carrières sont épuisées, les nouvelles ressources se trouvent de plus en plus loin des villes, ce qui entraîne des coûts de transport supplémentaires et génère plus d'émissions de CO₂.

Pour répondre à cette situation, de nouvelles investigations sont nécessaires sur les sources d'approvisionnement et sur le béton lui-même. Il serait utile de s'orienter vers une économie circulaire qui consiste à ne rien jeter et réduire le besoin de produire de nouveaux matériaux en valorisant en toute logique les déchets de démolition et les réutiliser dans la construction.

En termes d'économie et d'environnement, l'utilisation de granulats recyclés est devenue une option indispensable. Leur utilisation offre l'avantage de pouvoir rapprocher le processus de production des granulats en boucle fermée : un produit extrait → un produit utilisé → un produit recyclé → un produit réutilisé.

L'incorporation des granulats recyclés dans le béton hydraulique se fait toujours à échelle réduite, en raison de leur hétérogénéité et leur absorption d'eau élevée conduisant à des difficultés de contrôle des propriétés du béton frais et par conséquent, influençant négativement la résistance, ainsi que la durabilité. Par ailleurs, on recommande certes l'utilisation des granulats recyclés dans le béton mais il n'existe toujours pas de normes fixant leur emploi.

Dans ce contexte, notre travail a pour objectif principal de contribuer à la valorisation des granulats recyclés et d'étudier le comportement des bétons élaborés.

Les études menées dans le cadre de ce projet sont basées sur des granulats recyclés récupérés en laboratoire à partir d'anciennes éprouvettes et poutres produites par les promotions d'étudiants précédentes

Pour atteindre cet objectif, notre projet de fin d'étude est subdivisé en deux parties. La première est composée des deux premiers chapitres et fait l'objet d'une recherche bibliographique ; le premier chapitre présente une étude sur les granulats recyclés, le

Introduction Générale

second, traite des bétons de granulats recyclés. La deuxième partie concerne l'approche expérimentale utilisée et présentée dans les deux derniers chapitres. Ainsi, le troisième chapitre décrit le programme expérimental, la méthodologie, les matériaux utilisés et les essais effectués. Dans le quatrième chapitre, les résultats obtenus et leurs interprétations sont présentés. Ainsi, les granulats naturels et recyclés sont caractérisés et comparés. Par ailleurs, les propriétés du béton recyclé à l'état frais et durci ainsi que sa durabilité sont analysées et comparées aux propriétés d'un béton ordinaire, et enfin on termine par une conclusion générale.

.

Chapitre 1

Granulats Recyclés

1.1 Introduction

Le béton est le produit final d'un mélange composé principalement de trois composants, le ciment, l'eau et les granulats.

Les granulats occupent plus de 75% du volume du mélange de béton et, par conséquent, la caractérisation des propriétés d'un nouveau matériau à utiliser comme granulats doit être évaluée correctement.

Les propriétés des granulats sont d'une importance considérable car elles peuvent affecter la maniabilité, la résistance, la durabilité et les performances structurelles du béton

En raison des démolitions à grande échelle, une énorme quantité de débris est générée partout dans le monde, ce qui provoque de graves problèmes environnementales, y compris un problème d'élimination. Récemment, il a été signalé qu'environ 850 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition étaient produites dans l'UE par an[1].

L'utilisation de déchets de construction et de démolition comme granulat dans la préparation de nouveaux bétons à un immense potentiel et fait l'objet des études depuis longtemps. L'utilisation de granulats recyclés comme granulats peut réduire l'utilisation des granulats naturels et le problème de leur extraction.

Certains pays ont ratifié certaines lois gouvernementales et réglementations spécifiques. Grâce à ces initiatives, le niveau de recyclage de ce matériau dans certains pays a atteint environ 90% de la quantité totale générée[1].

Il est fondamental de comprendre les différences entre le béton de granulats naturels et le béton de granulat recyclé, et c'est la prémisse de base pour approfondir l'étude du comportement des matériaux et des structures du béton de granulat recyclé

1.2 Méthodes et techniques de démolition

L'idée de recyclage des matériaux de démolition n'est pas nouvelle mais elle était envisagée depuis la Seconde Guerre mondiale grâce à la disponibilité des bâtiments détruits par les bombardements étaient réemployés pour la reconstruction des différents édifices pour réfugier les sans-abri.

Le béton est le matériau plus utilisé dans les constructions en Algérie donc il est très important d'avoir une politique qui traite le recyclage des bétons.

En Algérie les exigences pour les techniques de démolition avec un traitement efficace pour optimiser le taux de recyclage manquent

Le Nombre de centres de recyclage de béton est faible il existe une seule sur la wilaya d'Alger. Il se trouve à Mahelma, Zeralda. Sous le nom EPIC-GECETAL mais les granulas recyclé sont utilisés sur une échelle réduite pour les bétons à bordures de trottoir et les chausse

1.2.1 Techniques de démolition

Plusieurs facteurs influencent le choix de la technique ou la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition: la surface de travail disponible, le volume de démolition, les règlements locaux ou nationaux, l'emplacement du chantier de démolition, le délai de démolition.

Il est nécessaire d'appliquer les techniques décrites ci-dessous par des entreprises qualifiées pour respecter les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le quartier[2].

1.2.1.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main

Il s'agit d'une technique de démolition manuelle. Elle est effectuée par des ouvriers, en utilisant des outils manuels portables comme les maillets pioches et marteaux qui peuvent être électrique pneumatiques ou hydrauliques.

L'inconvénient est qu'elle est couteuse et prend beaucoup de temps mais elle a un avantage qui est le bon tri.



Figure 1.1 : Outils manuels (a) Marteau piqueur (b) Perceuse et (c) Marteau de forgeron [3].

1.2.1.2 Technique de démolition à l'aide d'outils portés

Par rapport à la technique précédente ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. La plupart des outils sont portés par un engin mécanique.

L'outil n'est pas choisi par hasard mais par des critères tels que taille de l'élément à démolir, les matériaux de la structure, plus d'autres spécifications qui seront nécessaires. Mais le coût d'utilisation est très élevé.

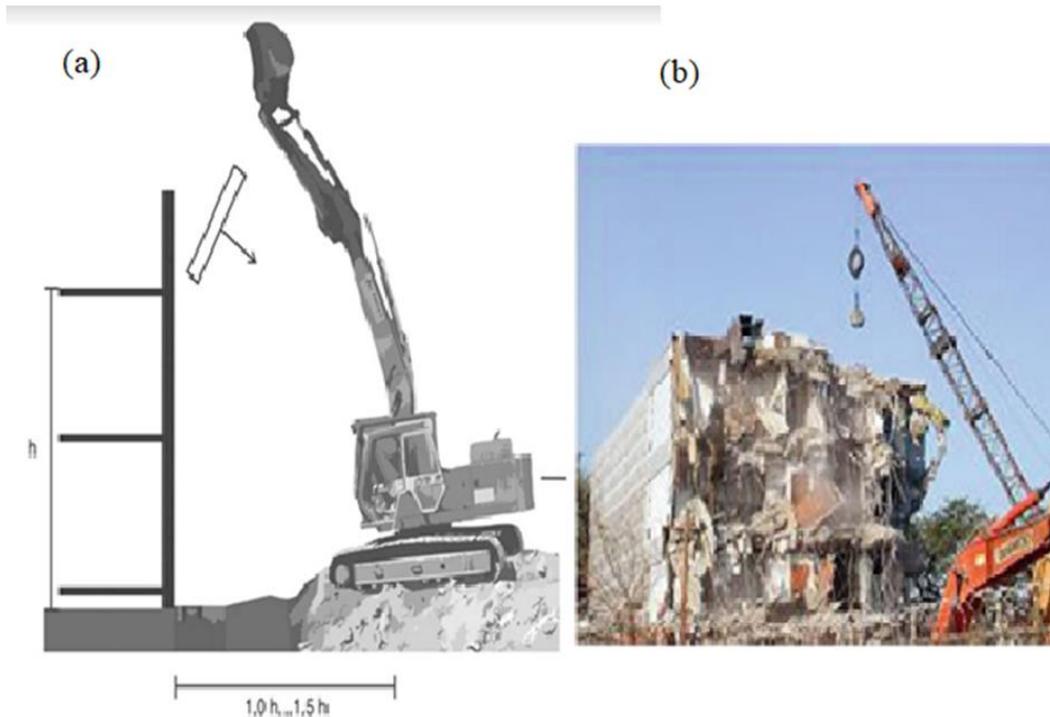


Figure 1.2 : Outils portés par un engin mécanique a) Démolition par l'excavateur [3] b) Démolition par la boule de démolition [3]

1.2.1.3 Démolition par dynamitage

Le dynamitage est un procédé de démolition efficace mais c'est une tâche compliquée avec un calcul laborieux d'autre part c'est un procédé rapide, dans cette méthode c'est le tri qui sera long et difficile.



Figure 1.3 : Démolition par dynamitage [3]

1.2.1.4 Autres procédés de démolition

D'autres techniques de démolition peuvent impliquer des procédés plus anciens comme le perçage, le forage ou l'abattage par câbles, mais aussi plus récents comme les méthodes thermiques où les matériaux sont fusionnés pour être séparés les uns des autres, ou encore des procédés électriques ou chimiques.



Figure 1.4 : Démolition par jet d'eau [3]

1.3 Elaboration et traitement des granulats

La production de granulats à partir de béton recyclé est presque la même pour les granulats issue d'une carrière, nous ajoutons juste de nouveaux paramètres par rapport au procédé ordinaire.

Lorsque les granulats recyclés sont issus de produits de démolition une particularité apparaît: la présence de différents types d'impuretés indésirables: minérales: comme le gypse, le verre, les chlorures, les briques ou bien organiques: comme le papier, le bois, les plastiques, etc. Cette présence d'impuretés introduit une hétérogénéité importante dans les granulats recyclés et pose des problèmes liés à l'échantillonnage et à la représentativité des résultats lors de leur caractérisation, mais aussi des problèmes liés à la durabilité des bétons incorporant ces granulats[4].

1.3.1 Les principales étapes de traitement

Les étapes de traitement peuvent être : le prétraitement, le concassage primaire, séparation magnétique, le criblage, le concassage secondaire ou broyage et le criblage secondaire.

Le schéma de fonctionnement d'une installation type est présent dans la figure 1.5.

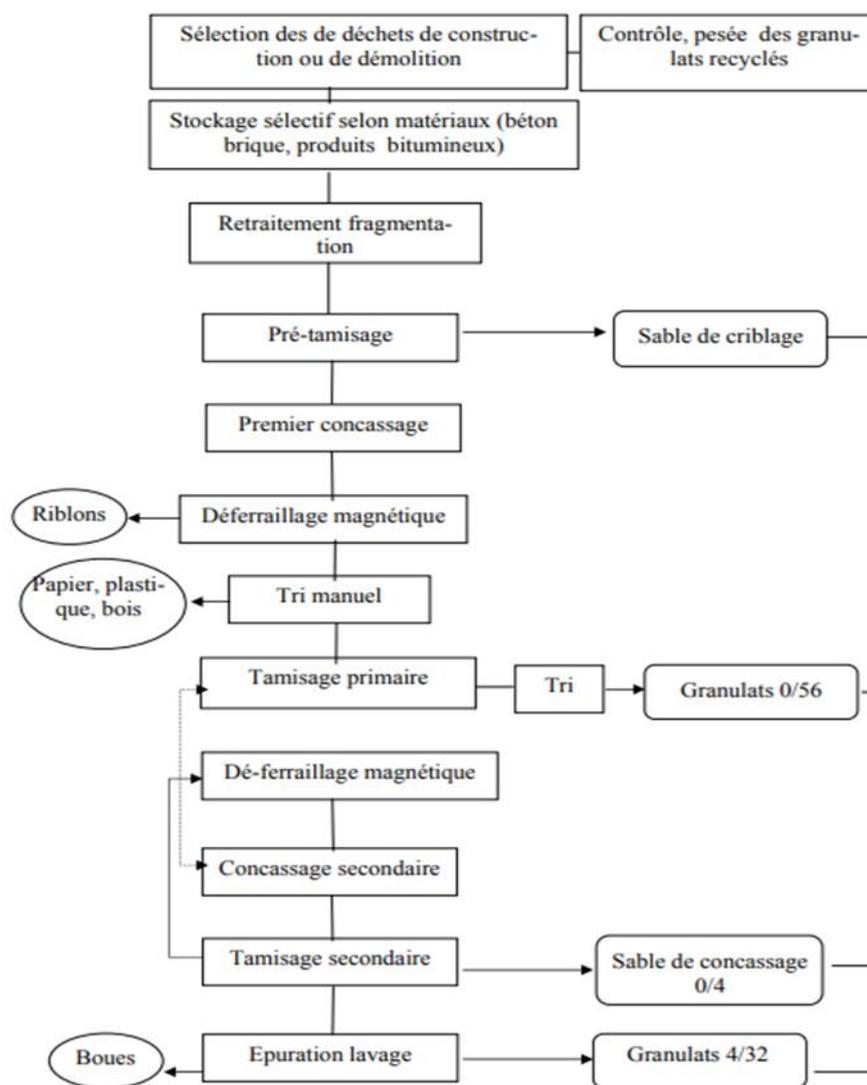


Figure 1.5 : Schémas de fonctionnement d'une centrale de recyclage/concassage [5]

1.3.1.1 Le concassage

Le concassage permet de réduire, de façon successive, la taille des éléments, la fabrication des granulats à partir de bloc de taille compris entre 1m et 0.7 m

Il existe plusieurs types de concasseurs :

Les concasseurs à mâchoires donnent une granulométrie plus grossière, rendant ainsi la réduction de la granulométrie insuffisante, ce qui nécessitera un deuxième concassage. Par contre, Kasai Y [6], affirme que ce sont ces concasseurs qui assurent la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment.

Les concasseurs à impacts (ou à percussion) permettent une bonne réduction de la granularité lors du premier concassage et séparent très bien les armatures du béton; cependant, ils subissent une usure très importante et les dimensions des matériaux à concasser sont limitées. Ces deux premiers types de concasseurs génèrent à peu près la même quantité de particules fines (particules $< 80 \mu\text{m}$).

Le troisième type de concasseur, à cône, est beaucoup moins utilisé, mais il est très utile comme concasseur secondaire avec des granulats entrant de taille maximale de 200 millimètres.

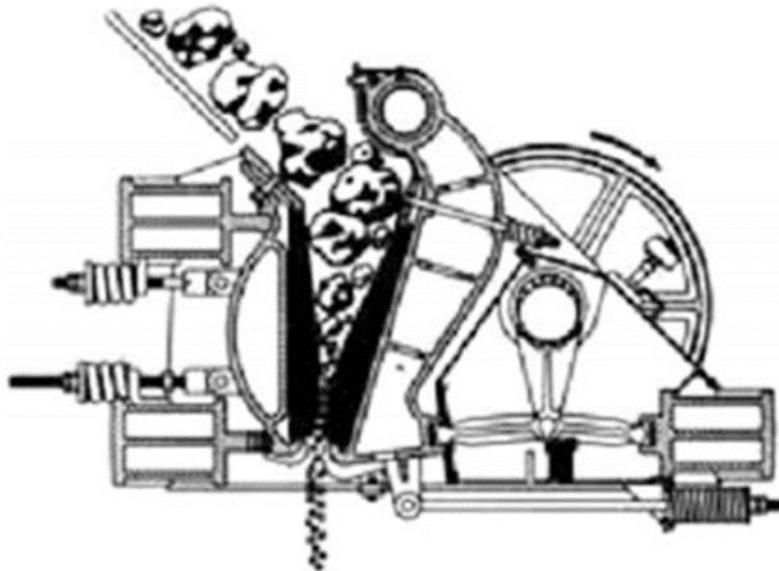


Figure 1.6 : Concasseur à mâchoires [7]

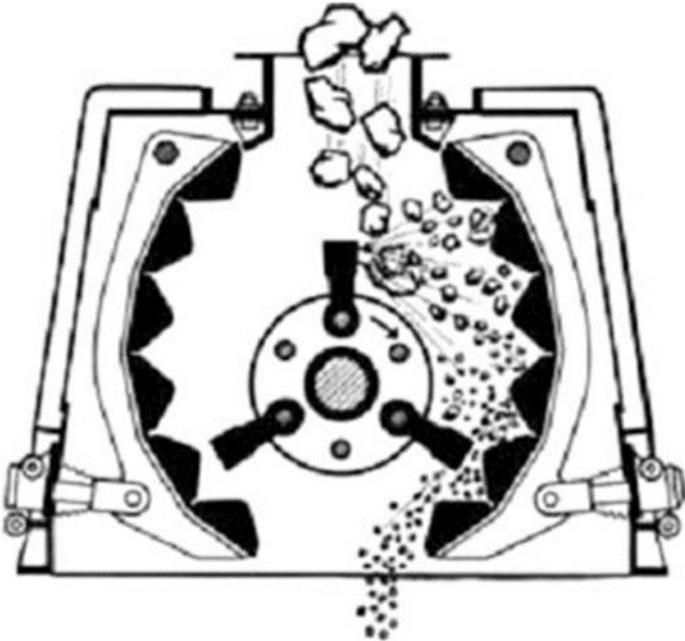


Figure 1.7 : Concasseur à impact (ou à percussion) [7]

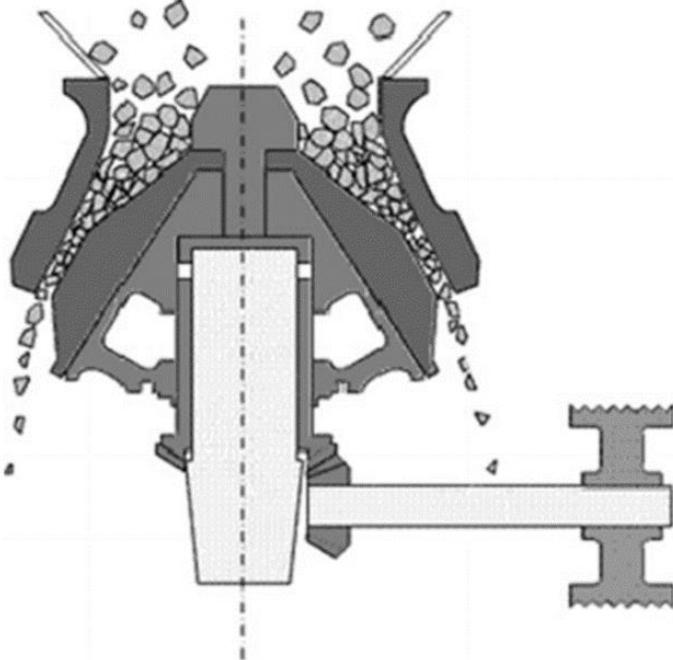


Figure 1.8 : Concasseur, à cône [7]

1.3.1.2 Le criblage

Les opérations de criblage ou de tamisage permettent de sélectionner les grains, le crible ne laisse passer que des éléments inférieurs à une certaine taille dans ses mailles. Une succession de criblages permettra de trier les grains et obtenir des granulats de toutes tailles possibles.

1.3.1.3 Le lavage

La présence de boues d'argiles ou de poussières mélangées aux matériaux ou enrobant les grains empêche leur adhérence avec les liants, ce qui interdit leur utilisation. Afin de les rendre propres, il faut les laver ou les dépoussiérer, les opérations de criblage et de lavage sont souvent réalisées conjointement, une rampe de jets d'eau étant disposée au-dessus du crible.

1.3.1.3 Le stockage

La conservation des granulats recyclés après traitement se fait dans des aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos, selon des critères bien précis qui dépendent de la provenance des granulats, de la forme des grains, de la nature des opérations de traitement et de la granulométrie. Hansen[8], conseille de stocker les différents types de granulats séparément l'un de l'autre.

1.3.2 Les méthodes de séparation des impuretés

En cours de production, on procède au déferrailage magnétique, au retrait des impuretés légères et au retrait des autres impuretés comme le verre les morceaux d'isolants et les fils électriques

On doit aussi contrôler la teneur en sulfates, en procédant par élimination à l'entrée et à différents stades de la fabrication, des éléments constitués de plâtre. Ces éléments sont généralement assez friables et le premier criblage vibrant permet de les réduire en grande partie sous forme de fines qui sont facilement éliminées par criblage

La séparation du bois peut se faire par un crible spécial placé entre le concasseur primaire et le premier crible. Tous les matériaux légers peuvent être aspirés dans un

système placé à l'extrémité du premier crible, tandis que les matériaux pierreux, plus lourds passent en travers une séparation par décantation ou les granulats traversent dans l'eau une distance ou les matériaux légers flottent tandis que les matériaux pierreux plus tard tombent au fond. Enfin, une séparation par lavage ou une courroie transporteuse sur laquelle est maintenu un niveau d'eau dans le sens opposé à son avancement. Les matériaux légers flottent et sont éjectés par le flux d'eau tandis que les matériaux plus lourds continuent le circuit.

1.4 Caractéristiques des granulats

Les granulats de béton recyclé sont composés de granulats naturels et de pâte de ciment durci adhérente. Ils peuvent également contenir des impuretés telles que le plastique, les métaux, le gypse, le sol, le bois ..., provenant d'autres déchets de construction et de démolition.

De plus, en raison de la composition particulière des granulats de béton recyclé, qui possèdent des propriétés considérablement différentes de celles des granulats naturels. En particulier, la pâte de ciment durci adhérente confère aux granulats de béton recyclé une porosité plus grande, une absorption d'eau plus élevée et une densité de particules plus faible que les granulats naturels.

La taille des particules des granulats recyclés varie en fonction du processus de production. Plusieurs chercheurs ont observé qu'il y avait une certaine relation entre la taille des particules des granulats recyclés et la quantité de mortier qui s'y rattache.

En outre, les granulats de béton recyclé contiennent également plus de microfissures causées par le processus de concassage, et plus d'auréoles de transition qui sont les auréoles de transition d'origine entre l'ancien mortier de ciment et le granulats vierge dans les granulats de béton recyclé.

Ces différences dans les caractéristiques des granulats de béton recyclé et des granulats naturels ont été largement considérées comme la principale cause conduisant à des propriétés mécaniques et de durabilité inférieures du nouveau béton.

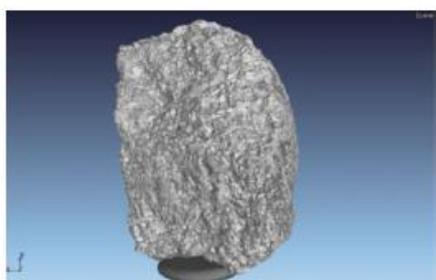
Les propriétés des granulats recyclés sont améliorées par différents types de traitements, le traitement a pour but la réduction de la pâte de ciment durci adhérente présente à la surface du granulats, on peut énumérer : traitement mécanique (nettoyage par ultrasons, broyage à boulets), traitement chimique (pré-trempeage des granulats

recyclés en milieu acide) et traitement thermique (chauffage des granulats par micro-ondes, etc.)

Néanmoins, selon l'expérience mondiale, afin de faciliter l'application et la comparaison, il est suggéré que les méthodes d'essai des propriétés des granulats de béton recyclé soient identiques à celles des granulats de béton naturel[9].

1.4.1 Evaluation du mortier adhérent

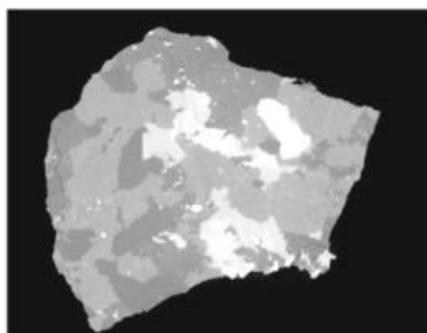
Le mortier adhérent est responsable des changements dans les propriétés des granulats de béton recyclé, tels que l'absorption d'eau et la densité des particules [10]. Ces propriétés sont pertinentes pour influencer les performances mécaniques du béton fabriqué à partir de granulats de béton recyclé. La quantité de contenu de mortier attaché présente sur les granulats de béton recyclé dépend de plusieurs facteurs tels que les procédures de traitement, le mélange de béton d'origine et la taille des particules.



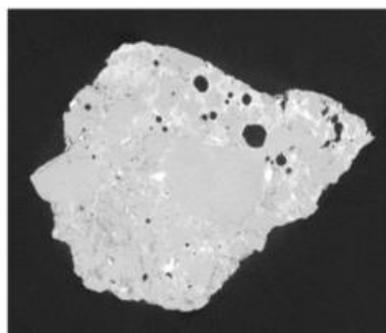
Granulat naturel (GN) en 3D



Granulat de béton recyclé (GBR) en 3D



Coupe transversale de la structure interne de GN



Coupe transversale de la structure interne de GBR

Figure 1.9 : Analyse du scanner 3D de granulats[11]

Les images du scanner 3D montrent la différence de texture de surface ainsi que la structure interne. De plus, les variations de densité interne sont montrées avec les différences de couleur dans la section transversale 2D, où les taches plus sombres représentent une densité élevée et les taches plus claires représentent des structures de faible densité

Il faut aussi distinguer entre les granulats grossiers et fins, les granulats fins ou sable recyclés sont obtenus à partir de déchets de béton par broyage mécanique, avec une granulométrie inférieure à 4,75 mm, et les granulats grossiers ou gravillons recyclés sont les granulats dont la granulométrie est supérieure à 4,75 mm. À l'heure actuelle, plusieurs pays ont des recommandations pour l'utilisation des gros granulats recyclés dans les bétons structuraux, mais les granulats fins recyclés sont jetés car ils peuvent entraîner des modifications importantes dans les propriétés du béton frais et durci [12]

Plusieurs chercheurs ont observé qu'il existait une certaine relation entre la taille des particules des GBR et la teneur en mortier adhérent [13]

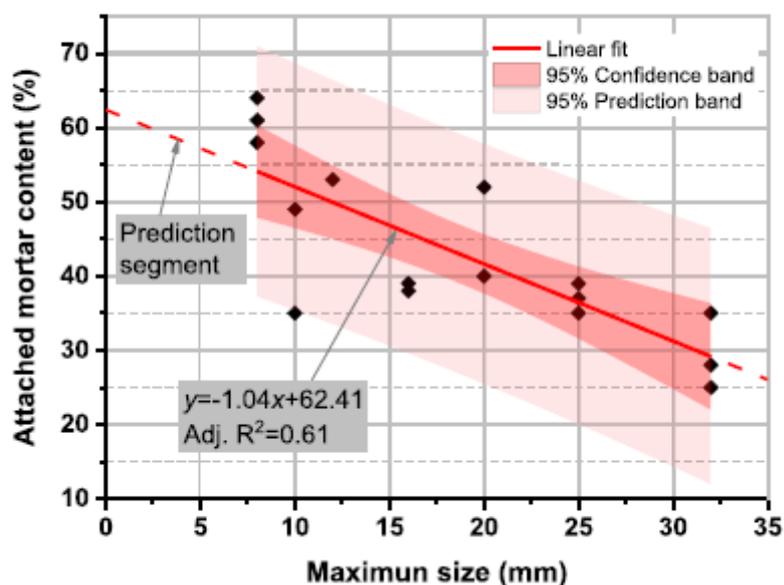


Figure 1.10 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et la taille des GBR [13].

D'après la figure 1.10, il est évident que la teneur en mortier adhérent augmente avec la diminution de la taille des granulats.

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour mesurer la teneur en mortier adhérent, elles sont basées soit sur des méthodes thermomécaniques, chimiques ou géométriques,

Une méthode couramment utilisée pour déterminer la teneur en mortier adhérent est le traitement avec une solution d'acide chlorhydrique ou d'acide nitrique. Cette méthode se concentre sur la dissolution acide de la pâte de ciment comme moyen de séparer le granulats d'origine de l'ancien mortier adhérent. Mais cette méthode ne peut pas être utilisée sur les GBR contenant du calcaire d'origine car l'acide attaque également les granulats

1.4.2 Propriétés physique des GBR

1.4.2.1 Forme de particule et texture de surface

La forme et la texture des granulats grossiers affectent également les propriétés du béton.

Généralement, le gravier naturel a une forme arrondie et une texture de surface lisse. Les granulats recyclés peuvent contenir une proportion considérable de particules plates ou allongées qui affectent négativement de nombreuses propriétés du béton.

Plus la proportion de particules allongées et plates est élevée, plus la tendance d'eau à s'accumuler à côté de la surface des granulats sera grande, affaiblissant ainsi l'auréole de transition. Ce phénomène est appelé saignement[14].

Les granulats recyclés sont plus anguleux et la texture de surface est poreuse et rugueuse en raison de l'existence d'anciens mortiers[15].

Cette caractéristique des granulats de béton recyclé réduira l'ouvrabilité du béton de granulats recyclés.

1.4.2.2 Densité et Porosité

Les granulats naturels sont poreux, les valeurs de porosité peuvent atteindre 2% pour les roches ignées intrusives, environ 5% pour les roches sédimentaires denses et entre 10% et 40% pour les grès et les calcaires très poreux. Pour la conception d'un mélange de béton, il est souhaitable de connaître l'espace occupé par les particules de granulats,

y compris les pores existant à l'intérieur des particules. Par conséquent, détermination de la densité apparente, qui est définie comme la densité du matériau, y compris les pores internes. La densité apparente de nombreuses roches couramment utilisées se situe entre 2,6 et 2,7 [14].

Pour la conception du mélange de béton, en plus de la densité spécifique apparente, la valeur de la densité apparente est nécessaire, elle est définie comme la masse des fragments de granulats qui rempliraient un volume unitaire. La masse volumique apparente approximative des GN couramment utilisés dans le béton commun varie de 1300 à 1750 kg/m³ [14].

La densité apparente des GBR est inférieure à celle des GN, cela est dû à l'existence de pâte de ciment poreuse et moins dense dans les GBR[16]. En raison de leur origine et de leur taille, les GBR peuvent avoir des densités différentes selon la quantité de mortier collé[14][10].

La densité apparente des GBR est également inférieure à celle des GN. Elle se situe généralement entre 1 150 et 1 400 kg / m³ [17].

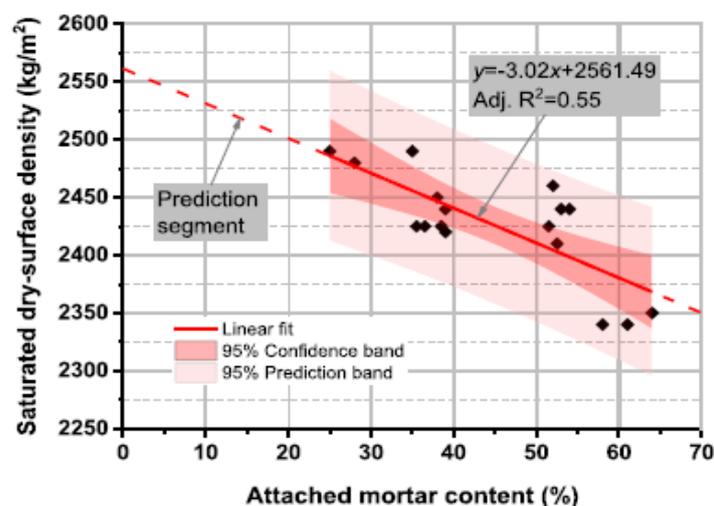


Figure 1.11 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et la densité à l'état saturés d'eau surfaces sèche [13]

Le graphique montre que la densité à l'état saturés d'eau surfaces sèche de GBR diminue avec l'augmentation de la teneur en mortier adhérent.

La porosité est définie comme la fraction volumique des vides sur le volume total de GBR et, par conséquent, la valeur est entre 0 et 1.

La porosité du GBR peut être environ 20 fois plus élevée que celle du GN, et cela est principalement dû à la teneur en mortier adhérent élevée.

Tableau 1 - 1 : Porosité de GBR et de GN [9]

Granulats	GN	GBR
Porosité (%)	1.1	23.3
	/	8.89
	/	9.77

La porosité élevée peut entraîner une concentration de contraintes sous charge et entraîner la déclinaison de la résistance à la compression du béton de granulats recyclés.

Jusqu'à présent, il n'y a pas de norme particulière pour la mesure de la densité de particules de GBR[18]. Par conséquent, les normes utilisées pour les GN telles que NF EN 1097-6 (2014), ASTM C127 (2015) (pour les gravillons) et ASTM C128 (2015) (pour les sables) sont également utilisées pour la caractérisation des GBR.

1.4.2.3 Absorption d'eau

L'absorption d'eau correspond au rapport entre la masse d'eau absorbée par un échantillon de granulat après immersion dans l'eau et sa masse sèche.

Généralement, les GBR ont une absorption d'eau plus élevée que les GN à cause de leur teneur en pâte de ciment durci.

Il a été constaté que l'absorption d'eau des GBR était 2,3 à 4,6 fois plus élevée que celle de GN, quelle que soit la résistance du béton d'origine[12].

Pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau les granulats sont d'abord immergés pendant 24 h dans l'eau, puis le coefficient Ab_{24} est déterminé à partir de la teneur en eau à l'état Saturé Surface Sèche (SSS). L'état SSS pour les gravillons est atteint directement en séchant les particules à l'aide de chiffons secs jusqu'à ce qu'aucune eau ne soit visible à leur surface. L'état SSS des sables est atteint en séchant progressivement l'échantillon sous un flux d'air chaud et il est repéré à l'aide d'un essai d'affaissement en admettant que lorsque la surface des grains devient sèche, la cohésion liée aux forces capillaires disparaît[18].

Les Divers Conditions d'humidité des granulats sont illustrées dans la figure 1.12

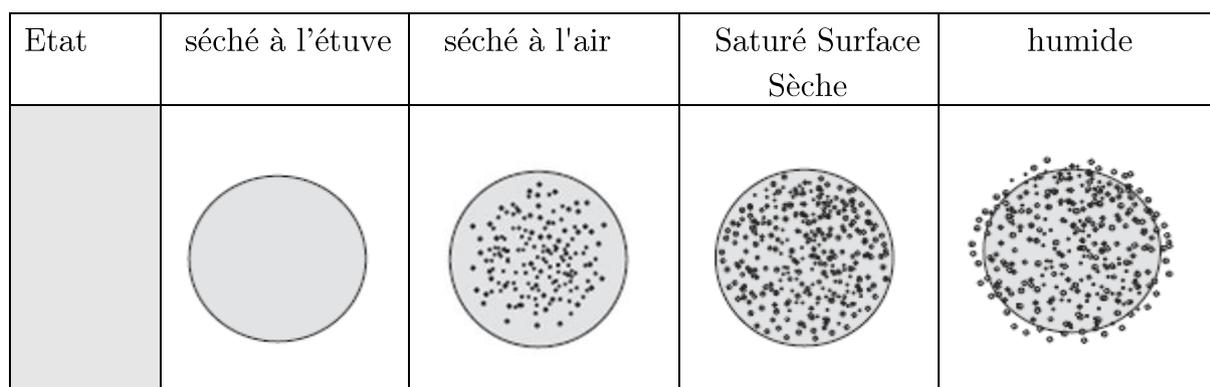


Figure 1.12 : Conditions d'humidité des granulats [14]

Le Tableau suivant résume quelques résultats des différentes études sur le coefficient d'absorption d'eau des GBR

Tableau 1 - 2 : Le coefficient d'absorption d'eau des GBR selon différentes études.

	Coefficient d'absorption d'eau (%)				Normes utilisées
	GN		GBR		
	Fins	Gros	Fins	Gros	
Hadjieva-Zaharieva[19]	1.8	0.4	12.5	5.8	NF P 18-554 et 555
Hansen[20]	-	0.8 à 3.7	9.8	4 à 8.7	ASTM C127 et 128
Tavakoli et al[21].	-	-	8.4	4.48	ASTM C127 et 128

On peut voir clairement que le coefficient d'absorption d'eau des GBR fins (sables) est plus élevé que pour les GBR gros (gravillons), on peut constater aussi que le coefficient d'absorption d'eau pour les GBR est beaucoup plus important que pour les GN.

La corrélation entre la teneur en mortier adhérent et l'absorption d'eau des GBR est illustrée dans la figure 1.13.

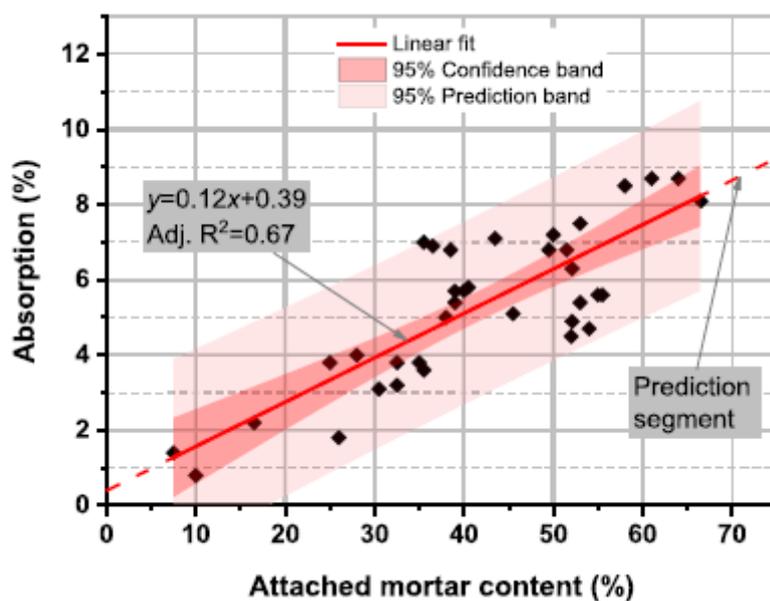


Figure 1.13 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et le coefficient d'absorption d'eau [13]

La taille des granulats a un effet significatif sur le coefficient d'absorption d'eau, les GBR fins ont une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les GBR grossiers en raison de quantités relativement plus élevées de mortier adhérent.

La figure 1.14 est un graphique de la capacité d'absorption d'eau des GBR en fonction du temps.

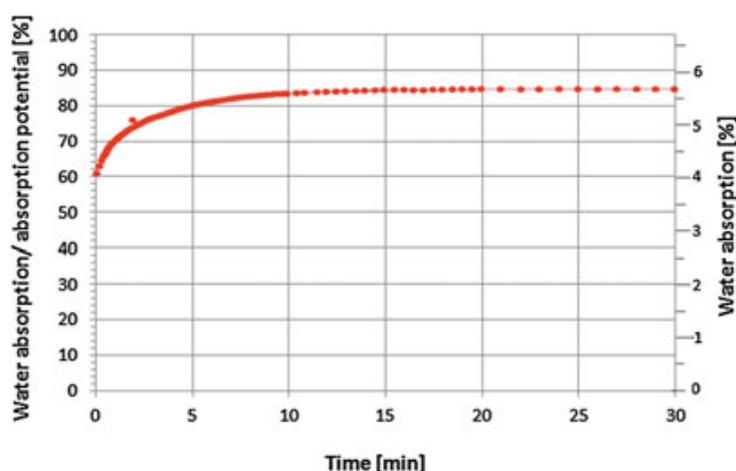


Figure 1.14 ; Absorption d'eau par les GBR par rapport à l'augmentation du temps d'immersion [22]

La figure 1.14 est un graphique de la capacité d'absorption d'eau des GBR en fonction du temps. La figure montre que l'absorption d'eau des GBR est rapide et se passe pendant la période initiale d'immersion, avec environ 80% de son potentiel d'absorption après seulement 5 min d'immersion.

Cette mesure peut aider à prédire le comportement des GBR pendant le malaxage du béton et donc aider à déterminer la quantité d'eau supplémentaire à introduire dans le mélange pour compenser l'absorption supplémentaire des GBR, le coefficient d'absorption d'eau permet de déterminer la quantité d'eau efficace (E_{eff}) dans le béton, l'eau efficace est l'eau présente dans la pâte de ciment fraîche, à l'exclusion de celle absorbée par les granulats.

L'absorption d'eau rapide et plus élevée des GBR par rapport à celle des GN implique une ouvrabilité inférieure pour le même rapport E/C du béton contenant des GN et donc l'ajout d'additifs est recommandé pour compenser la perte d'ouvrabilité du béton préparé[11].

Mais l'absorption d'eau élevée des GBR affectera négativement la résistance du béton au gel-dégel. Par conséquent, certains codes interdisent l'utilisation des GBR avec un taux d'absorption d'eau supérieur à 7–10% dans le béton de structure[23].

Le pré-trempe des GBR avant la préparation du béton peut limiter l'aspiration de l'eau de gâchage[24]. Cependant, la saturation complète des GBR peut augmenter le phénomène de saignement[25] et affecter les performances mécaniques du béton résultant. Un taux d'humidité de 80% de la capacité totale d'absorption des GBR est recommandé par des chercheurs[26] pour une meilleure performance du béton.

1.4.3 Propriétés mécaniques des GBR

1.4.3.1 Résistance à l'abrasion

La valeur d'abrasion des granulats est définie comme le pourcentage de perte de poids par abrasion, de sorte qu'une valeur élevée indique une faible résistance à l'abrasion, le test de Los Angeles est le plus couramment utilisé dans le monde, Selon la norme ASTM C-33, la valeur d'abrasion de Los Angeles devrait être inférieure à 50% pour les granulats utilisés dans le béton

En général, les GBR ont une valeur d'abrasion inférieure à celle des GN en raison de la présence de mortier adhérent

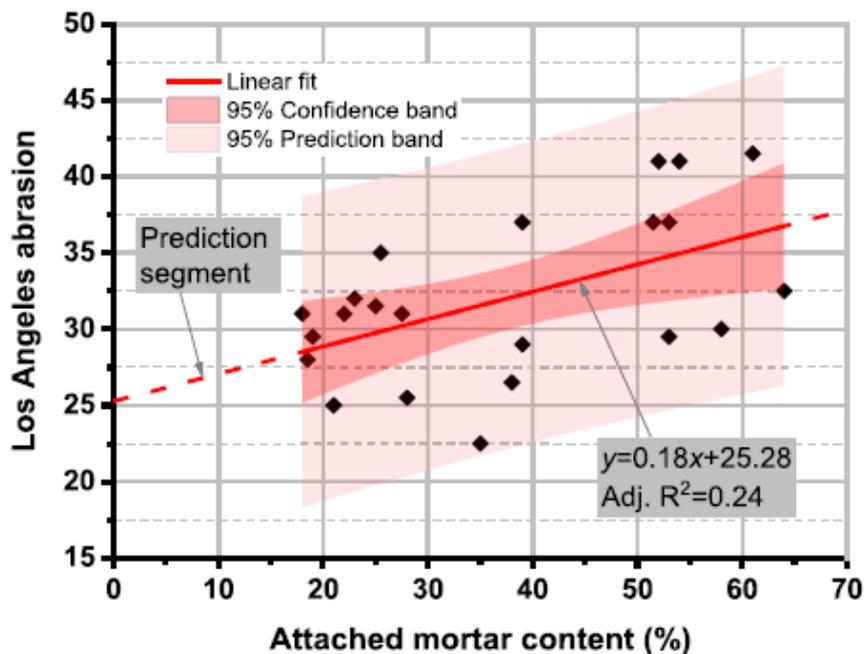


Figure 1.15 : Relation entre la teneur en mortier adhérent et le coefficient LA [13]

La figure 1.15 illustre la relation entre la teneur en mortier adhérent et le coefficient LA, plus la teneur en mortier d'adhéré est élevée, plus le coefficient LA est important.

Selon Hansen and Narud [12], la taille des particules des GBR pourrait avoir un certain effet sur la valeur d'abrasion à Los Angeles, une valeur de 22,4% et 41,4% pour le même type de GBR a été trouvée avec des plages de taille de 16-32 mm et 4-8 mm, respectivement.

1.5 Conclusion

De ce que nous avons présenté dans ce chapitre sur les granulats recyclés, nous pouvons conclure que la qualité des GBR est inférieure à celle des GN, ce qui restreint son utilisation dans diverses applications de construction, et cela est principalement à cause de la pâte de ciment adhérente qui a abouti à une porosité plus élevée et une densité plus faible et qui, on peut dire, a affecté toutes les autres propriétés des granulats.

Nous pouvons dire que presque toutes les propriétés des GBR dépendent de leur teneur en mortier.

Comme le mortier adhérent dans les GBR est poreux par nature, il peut absorber de grandes quantités d'eau. Ainsi, la porosité et la capacité d'absorption d'eau des GBR sont très élevées par rapport à celles des GN.

Les GBR ont une valeur d'abrasion LA supérieure à celle des GN, Cependant, cette valeur pour la majorité des GBR rapportés dans la littérature répond aux diverses exigences des normes pour le béton.

Cependant, le but des études sur le béton recyclé est de trouver un moyen d'adapter la conception du mélange du béton pour utiliser ces granulats et la compréhension des propriétés des GBR est une grande partie de cet effort.

Plusieurs méthodes sont proposées pour déterminer la teneur en mortier adhérent dans les GBR et plusieurs techniques d'enrichissement peuvent également être appliquées pour diminuer la teneur en mortier dans les GBR, la pâte de ciment adhérente ajoute un autre niveau de complexité aux granulats et donc le béton recyclé, dans les chapitres suivants, nous verrons comment ces nouvelles propriétés affectent le nouveau béton.

Chapitre 2

Béton De Granulats Recyclés

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, les propriétés du béton frais et durci contenant des GBR ainsi que la durabilité sont discutées à partir des données existantes de la littérature. Comme les propriétés des GBR sont différentes de celles des GN leurs utilisation dans le béton modifie considérablement ces diverses propriétés.

Les propriétés du béton recyclé frais et durci dépendent de la résistance du béton d'origine des granulats recyclés, du rapport E/C, de la taille des granulats recyclés, de leur quantité et leur état d'humidité.

De nombreux chercheurs ont étudié l'influence de différentes propriétés des granulats recyclés avec différentes proportions de granulats naturels sur les propriétés du béton de GBR frais et durci, et leurs résultats sont présentés ci-dessous.

2.2 Fabrication du béton recyclé

Il existe plusieurs obstacles liés à l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) dans le Béton Prêt à l'Emploi (BPE), parmi lesquelles le besoin de silos supplémentaires. Leur implantation est souvent impossible pour les centrales situées en milieu urbain, là où les GBR sont principalement disponibles.

Un autre problème délicat est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la rhéologie du béton frais. Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des GBR génère des difficultés pour un dosage précis de l'eau efficace de la formule. De plus, l'eau absorbée entre la fin du malaxage et le coulage peut modifier la consistance du béton pendant le transport[18].

En particulier, pour la fabrication, les exigences sont les suivantes :

- Le parc de stockage de GBR doit être équipé de séparations pour éviter le mélange avec les autres granulats, et il doit être bien entretenu et régulièrement nettoyé.
- La centrale doit disposer de plusieurs silos à granulats.
- La centrale doit avoir des équipements d'aspersion pour stabiliser l'humidité de surface des GBR avant utilisation.

2.2.1 Pré-saturation des GBR

La capacité d'absorption d'eau rapide et plus élevée des granulats GBR par rapport à celle des granulats naturels GN implique un degré d'ouvrabilité inférieur pour le même rapport E/C du béton contenant des granulats GBR que celui produit avec des granulats naturels GN[1]. En pratique, il est difficile de mesurer en temps réel la teneur en eau des GBR, alors que l'eau qu'ils apportent au mélange est souvent très conséquente.

Le pré-trempe des GBR avant la préparation du béton peut empêcher l'aspiration de l'eau de mélange (Zaharieva et al)[24]. Cependant, la saturation complète des granulats GBR peut augmenter le ressuage lors de la préparation du mélange de béton (Poon et al.)[25] et affecter les performances mécaniques du béton résultant en raison de la formation d'une auréole de transition (AT) faible entre les granulats recyclés saturés et la nouvelle pâte de ciment.

Etxeberria et al.[26] ont recommandé une teneur d'eau de 80% de la capacité totale d'absorption des granulats GBR pour une meilleure performance du béton contenant des granulats GBR. De Oliveira et Vazquez (1996)[27] ont rapporté que les performances mécaniques du béton préparé par granulats GBR pré-saturés puis 30 minutes séchés à l'air sont meilleures que les performances du béton contenant des granulats GBR secs au étuve ainsi que saturés en surface saturés. Le taux d'humidité de GBR séché à l'air était d'environ 90% par rapport aux GBR sec de surface saturé

Dans certaines recherches, une quantité supplémentaire d'eau correspondant à l'eau absorbée par les GBR est ajoutée au mélange de béton, Ferreira et al. (2011)[17] décrivent cette méthode comme une méthode de compensation de l'eau de mélange. La quantité d'eau ajoutée dépend de la teneur en eau initiale et de l'absorption des GBR pendant la période de mélange. L'absorption d'eau et l'évolution de l'absorption avec le temps doivent également être connues afin de prédire le rapport (E/C) après la période de mélange. Cela devrait garantir que l'eau ajoutée correspond bien à la quantité d'eau absorbée par les GBR.

Cependant, De Oliveira et Vázquez (1996)[27] notent que l'absorption d'eau des GBR peut ne pas correspondre à l'absorption d'eau libre déterminée en laboratoire, car les pores des granulats sont remplis de pâte de ciment pendant le mélange, ce qui peut entraîner un excès de de l'eau dans le mélange, et donc une augmentation indésirable du rapport E/C.

2.2.2 Malaxage

Tam et al. (2008)[28] ont suivi une approche de mélange en deux étapes pour compenser la capacité d'absorption d'eau plus élevée des GBR. Le diagramme schématique de cette procédure ainsi que l'approche de mélange de béton normal adoptée dans leur étude est présenté à la figure 2.1.

Selon les auteurs, l'utilisation de la moitié de l'eau requise pour le mélange conduit à la formation d'une fine couche de coulis cimentaire à la surface des GBR, qui pénètre dans le vieux mortier de ciment poreux et remplit les anciennes fissures et vides.

Une auréole de transition (AT) plus forte est ainsi développée en développant efficacement certains produits chimiques améliorant la résistance, à savoir L'ettringite, la portlandite et le silicate de calcium hydraté.

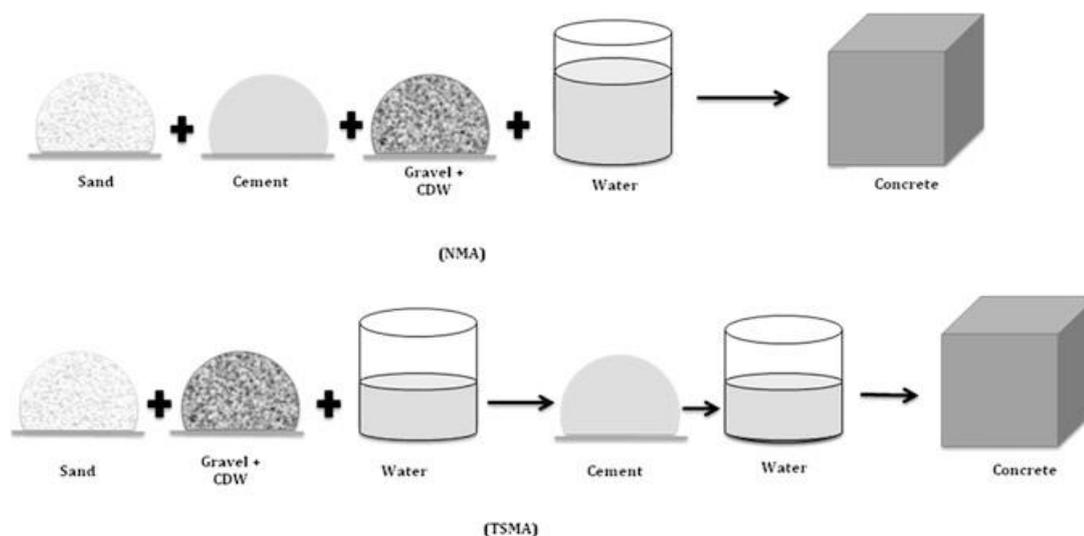


Figure 2.1 : Les procédures de mélange du béton normal (NMA) et en deux étapes (TSMA) adoptées par Tam et al. (2008) [1]

Cette méthode de malaxage en deux étapes améliore effectivement le comportement mécanique des bétons de GBR (augmentation d'environ 15 % de la résistance à la compression, et de 20 à 25 % de la résistance à la traction) et leur durabilité (pénétration des ions chlorure et carbonatation), par comparaison au malaxage en une seule étape. L'effet bénéfique s'explique par une amélioration des propriétés de la nouvelle auréole de transition (AT)[29].

Une autre méthode de malaxage est du sable enrobé (Sand Enveloped Mixing Approach SEMA) elle a donné de meilleurs résultats que le procédé TSMA en termes de résistance

à la compression des bétons de GBR. La méthode SEMA consiste à malaxer le sable (naturel), le ciment et 3/4 de l'eau totale avant l'ajout des gravillons de GBR, ce qui permet de mélanger plus facilement le sable avec le ciment et l'eau, avant que les GBR n'absorbent de l'eau[30].

2.3 Microstructure du béton recyclé

Les progrès dans le domaine des matériaux résultent principalement de la reconnaissance du principe selon lequel les propriétés proviennent de la microstructure interne; en d'autres termes, les propriétés peuvent être modifiées en effectuant des changements appropriés dans la microstructure d'un matériau. Bien que le béton soit le matériau de construction le plus utilisé, sa microstructure est hétérogène et très complexe. Les relations microstructure-propriété dans le béton ne sont pas encore complètement développées[14]; cependant, une certaine compréhension des éléments essentiels de la microstructure serait utile avant de discuter des facteurs influençant les propriétés du béton, tels que la résistance, le retrait, le fluage et la fissuration et la durabilité.

Lors de l'étude de la microstructure du béton, il y a eu deux approches. La première considère deux phases (granulats et mortier), la deuxième distingue trois phases (granulats, mortier et auréole de transition (AT)). Des recherches approfondies ont montré que certains problèmes dans le béton ne peuvent être mieux expliqués et résolus que par l'AT utiliser le point de vue de trois phases pour étudier les propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Cette approche peut être un moyen bien précis d'interprétation des résultats.

Le béton recyclé sera composé de: pâte de ciment hydratée, du sable, des granulats naturels, des granulats recyclés, du nouveau AT (l'interface entre les granulats et le nouveau mortier) et de l'ancien AT (la zone d'interface entre les granulats naturels d'origine et l'ancienne pâte de ciment dans GBR)[31].

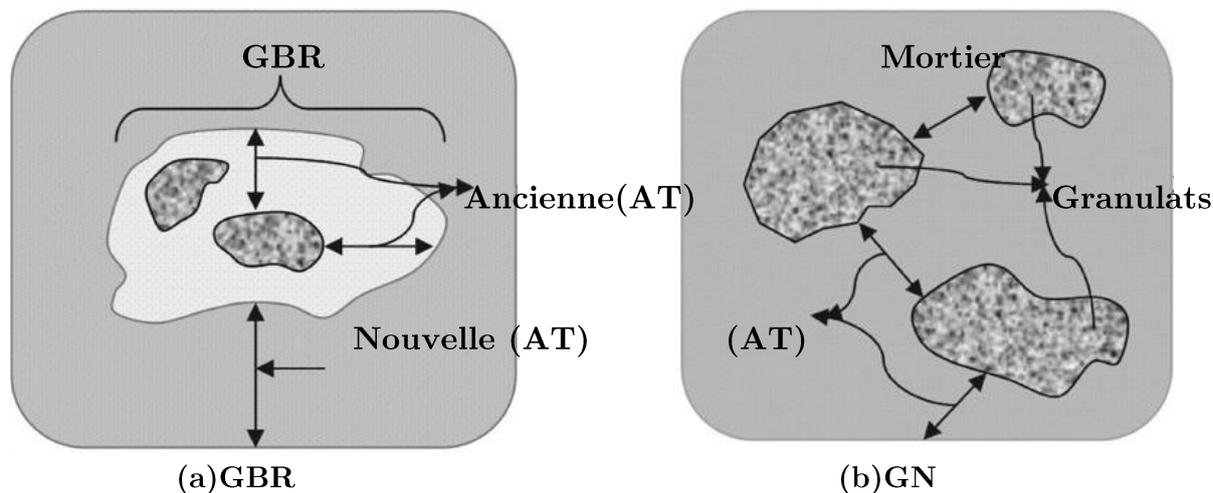


Figure 2.2 : Auréole de transition (AT) dans un béton de GBR(a) et un béton de GN(b)
[32]

L'AT est le maillon le plus faible de la chaîne et elle est traitée comme la phase qui limite la résistance dans le béton[33]. Par conséquent, la rupture du béton se produit à un niveau de contrainte considérablement inférieur à la résistance de l'un des deux composants principaux (matrice de mortier et granulats) en raison de la présence d'AT.

2.4 Propriétés du béton recyclé frais

L'utilisation des GBR dans le béton modifie considérablement les diverses propriétés du mélange de béton.

Dans cette section, des propriétés telles que l'ouvrabilité, la densité, la teneur en air et Le ressuage seront présentées à partir de diverses références.

La plupart des études qui visent à développer l'incorporation des GBR dans les bétons ne s'intéressent qu'à l'effet des gravillons de GBR

Ces caractéristiques spécifiques ci-dessous doivent être prises en compte pour concevoir des bétons ayant des propriétés stables à l'état frais, c'est-à-dire entre le malaxage et la prise. Que les GBR :

- Sont plus légers, plus anguleux et ont des compacités plus faibles.
- Sont plus poreux, plus fragiles et ont une plus grande absorption d'eau.
- Sont susceptibles de réduire l'efficacité des super plastifiants en raison des interactions potentielles avec les sulfates et les impuretés. [1]

2.4.1 La maniabilité

La maniabilité ou l'ouvrabilité du béton est une propriété très importante, qui garantit un remplissage parfait des moules et des coffrages dont les formes sont parfois complexes et un bon enrobage des armatures. Elle est déterminée par différentes méthodes, la plus couramment utilisée c'est l'essai au cône d'Abrams.

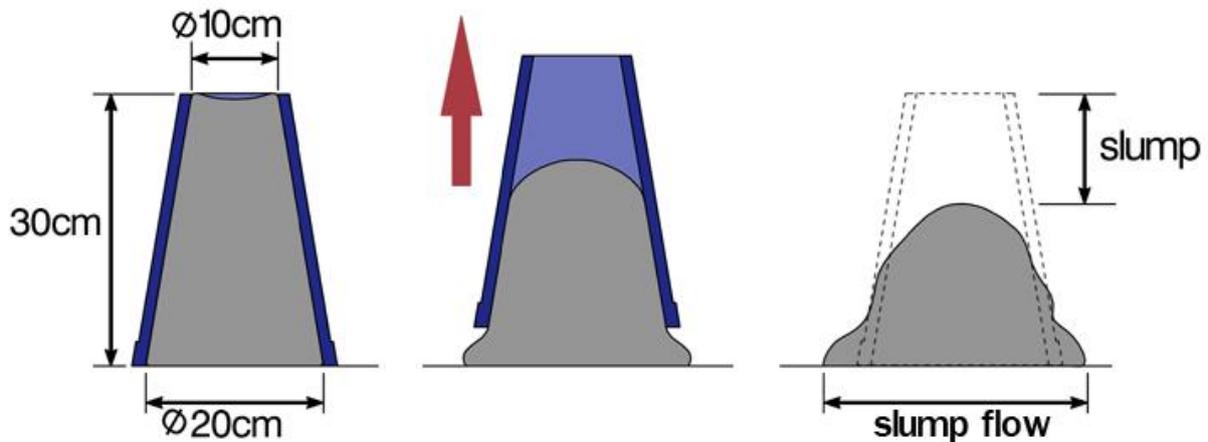


Figure 2.3 : Schématisation de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'affaissement du béton à base de granulats recyclés (BGR) devrait être inférieur à celui du béton à base de granulats naturels (BGN) en raison de la capacité d'absorption d'eau plus élevée des GBR que celle des GN. La texture de surface et l'angularité des GBR ont également une influence considérable sur les performances d'ouvrabilité du béton[34][24].

2.4.1.1 Influence du taux de pré saturation

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, les GBR ont un taux d'absorption élevé, il est nécessaire de prévoir une pré saturation pour éviter que le GBR n'absorbe pas l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment, afin d'assurer les différentes propriétés requises.

D'après l'étude réalisée par Topçu (1997)[35] sur l'influence du taux de pré-saturation. Il a observé un affaissement de 75 mm de béton contenant de granulats grossière généré à partir de béton concassé, alors que celui du béton courant équivalent était de 100

mm. Une maniabilité plus faible des BGR que des BGN a été signalée dans plusieurs publications antérieures[36] [37].

Toutefois, selon la technique de pré-saturation, l'affaissement varie fortement.

Le tableau 2.1 ci-dessous résume quelques données issues de la littérature sur la performance d'affaissement du béton contenant des GBR pré-saturés ainsi que la taux d'absorption d'eau.

Tableau 2 - 1 : Performance d'affaissement du béton contenant des GBR pré-saturés ainsi que la capacité d'absorption d'eau

	Type de granulats (valeur de remplacement)	Valeur E/c	Affaissement (mm)	Coefficient d'absorption d'eau (%)	Méthode de pré-saturation
Sagoe-Crentsil et al.2001[38]	Gravillon GN	0.76	90	1.0	/
	Gravillon GBR (100%)	0.73	75	5.6	
			0.74	95	5.6
Vieira et al.2011[22]	Gravillons GN	0.43	89±2.8	1.0	/
	Gravillons GBR (100%)	0.49	82±4	6.7	10 min pré-saturation dans l'eau avant de mélanger
Etxeberria et al.2007[26]	GN	0.50	80-100	0.88	/
	GBR (100%)	0.40-0.50	80-100	4.44	Humidifié par un système d'arrosage et recouvert de plastique pendant 1 jour

2.4.1.2 L'Influence de la procédure de broyage des granulats recyclés

Plusieurs paramètres affectent l'affaissement du BGR. En particulier, le processus de broyage.

Lavado[39] a utilisé deux types de gravillon GBR dans son test, l'un a été broyé une seule fois et l'autre a été broyé deux fois. Il a produit 3 mélanges de béton pour chacun des granulats, béton témoin GN, béton a granulats broyé une seule fois (GBR1) et béton a granulats broyé deux fois (GBR2), avec un E/C égal à 0,55 pour un affaissement de

14 cm, plus une compensation de l'eau nécessaire en raison de la plus grande absorption des GBR.

La figure 2.4 ci-dessus représente les résultats d'affaissement obtenue à partir du test

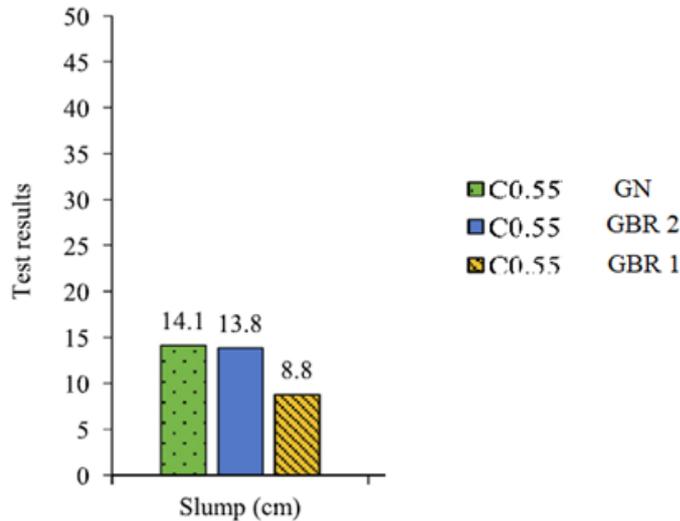


Figure 2.4 : Représentation des résultats d'affaissement obtenus du test [39]

Dans le béton avec GBR 1, l'affaissement était environ 38 % inférieur à celui du béton GN.

Cela peut être justifié par les forces d'emboîtement plus élevées qui sont générées entre les particules, car les GBR 1 ont une forme plus irrégulière et une texture plus rugueuse, ce qui entrave le mouvement du béton.

L'affaissement n'était que légèrement plus élevé dans le béton GN que dans le GBR 2, dans les limites de la variabilité du test lui-même.

À savoir que des granulats plus irréguliers entraînent une ouvrabilité moindre. Il est donc conclu que, s'il y a une compensation correcte de l'absorption d'eau, l'ouvrabilité est essentiellement affectée par la forme des granulats[39]

2.4.1.3 Influence du rapport E/C et du superplastifiant

Le rapport E/C présente une influence capitale sur l'ouvrabilité du béton.

Cette influence change de comportement lorsqu'un super plastifiant est ajouter au béton où l'ouvrabilité du béton reste contrôlée par le dosage, type de super plastifiant et le rapport E/C.

Selon la norme NF P 18-333, un superplastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, mortier ou coulis en général, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. Les super plastifiants sont généralement des polymères de synthèse

L'ouvrabilité augmente avec le dosage en eau et en superplastifiant (SP). En variant le dosage en super plastifiant, on s'aperçoit qu'à partir d'un certain point, que l'on nomme point de saturation, il n'y a plus d'amélioration de l'ouvrabilité.

En général, le béton avec un E/C de 0,35 a tendance à être plus ferme que celui avec E/C 0,55.

Pour obtenir les mêmes valeurs d'affaissement, les mélanges avec un E/C plus faible nécessitent une plus grande quantité de superplastifiant.

Tableau 2 - 2 : Affaissement du béton avec des rapport E/C et pourcentage de SP différentes.[40]

Mélange	E/C	SP(%)	L'affaissement (cm)
Béton GN	0.55	0.0	14.1
BGR			13.8
Béton GN	0.45	0.2	13.7
BGR			13.8
Béton GN	0.35	0.5	12.6
BGR			11.0

Pour la bonne efficacité du SP, il était important de pré-saturer GBR, afin qu'il n'absorbe pas le SP. Ainsi, il était possible que presque tous les SP introduits dans le mélange agissent sur les particules de ciment[40].

2.4.2 Masse volumique

La masse volumique du béton frais est la masse de béton frais, normalement compacté, y compris ses vides résiduels par unité de volume. Cette propriété dépend de plusieurs facteurs comme le types de granulats et de ciment, la teneur en eau et la teneur en vides. La masse volumique du béton frais contrôle également diverses propriétés du béton à l'état durci.

La masse volumique du BGR frais est légèrement inférieure à celle du mélange contenant de GN puisque la masse volumique de GBR est plus faible que celle des GN. La présence de particules résiduelles de mortier de ciment de plus faible masse volumique attachées au granulat est le principal facteur de réduction de la masse volumique du BGR[16].

Le tableau 2.3 présente quelques valeurs typiques de la masse volumique de divers mélanges de béton contenant des GN et des GBR, ainsi que la masse volumique des granulats.

Tableau 2 - 3 : La masse volumique de divers mélanges de béton contenant des GN et des GBR, ainsi que la masse volumique des granulats

	Type de granulats	Masse volumique (kg/l)	Masse volumique des granulats (kg/l)
Sagoe Crentsil et al. 2001[38]	Gravillon GN	2466	2890
	Gravillon GBR (100%)	2335	2394
Gomez Soberon 2002[41]	GN	2130	2593
	GBR (100%)	2090	2236
Vieira et al. 2011[22]	GN	2413	2600
	GBR (100%)	2299	2400
Etxeberria et al. 2007a[26]	GN	2420	2670
	GBR (100%)	2340	2430

2.4.3 Teneur en air

La présence d'une certaine quantité de bulles d'air piégées pendant le mélange du béton a plusieurs effets bénéfiques sur les propriétés du béton frais et durci.

Dans le béton frais, une teneur en air d'environ 3 % peut réduire la demande en eau du béton et rendre le mélange plus collant, ce qui contribue à réduire la ségrégation [1].

Le tableau 2.4 montre la teneur en air de différents mélanges de béton contenant des GN et des GBR.

Tableau 2 - 4 : Teneur en air du mélange de béton contenant des granulats recyclés pré-saturés

	Type de granulats	Teneur en air (%)
Sagoe-Crentsil et al. (2001)[38]	GN	2.4
	GBR	2.4
Katz (2003)[42]	GN	1.3
	GBR	4.8

Selon Katz[42], il a été observé que la teneur en air d'un béton frais est plus importante avec l'usage des gravillons recyclés. Avec un taux de remplacement de 100%, l'augmentation est de 4% à 5,5% en valeur absolue.

D'après l'auteur, cela peut être attribué à une porosité plus élevée des gravillons recyclés. En effet, lors de phase de vibration, la forme et la rugosité des gravillons recyclés peuvent empêcher le dégazage des bulles d'air. Le phénomène peut être accentué si la quantité de sable est importante dans le béton.

En revanche, Sagoe-Crentsil[38] n'a observé aucune différence dans la teneur en air entre le béton contenant des granulats normaux et le BGR.

En effet, selon De Larrard[18], la teneur en air est essentiellement contrôlée par la quantité de sable dont les grains facilitent le piégeage des petites bulles d'air lors de la phase de vibration.

2.4.4 Le ressuage

Le ressuage du béton est le mouvement ascendant de l'eau pendant la décantation du mélange de béton. Un ressuage plus important à la surface augmente le rapport E/C et diminue donc la résistance de la surface du béton.

L'augmentation de la porosité capillaire du béton durci due au ressuage peut également affecter les performances de durabilité. Toutefois, dans certains cas, l'eau de ressuage peut ne pas remonter à la surface. Il est piégé par des morceaux de granulats plats ou floconneux ainsi que par des armatures et s'accumule sous ces obstacles. C'est ce que l'on appelle l'hémorragie interne, qui peut affecter plusieurs propriétés du béton durci telles que la liaison pâte de ciment granulats et renforcer les microfissures. Une forte hémorragie du béton se produit en raison de divers facteurs tels qu'un rapport E/C élevé, une faible teneur en ciment, des particules de ciment grossières et des granulats mal calibrés. Peu de références sont disponibles sur le comportement de ressuage du BGR.

2.5 Propriétés du béton recyclé durci

Étant donné que les propriétés des granulats recyclés sont significativement différentes de celles des granulats naturels, l'ajout des granulats recyclés modifiera les diverses propriétés de durcissement du béton conventionnel.

Dans cette section, les informations obtenues à partir de diverses références seront utilisées pour examiner les propriétés de durcissement du béton

2.5.1 Propriétés mécaniques du béton recyclé durci

2.5.1.1 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, les chercheurs ont trouvé une diminution de la résistance à la compression du béton avec l'augmentation progressive du pourcentage de granulats recyclés.

Pourtant, le pourcentage à partir duquel la résistance commence à diminuer de manière significative n'est pas encore clair. Selon diverses études consultées, les valeurs de résistance dépendent de plusieurs facteurs associés à chaque mélange, à chaque type de granulat recyclé et à chaque condition d'essai [1].

Trois raisons sont évoquées pour expliquer la baisse de résistance des bétons à base de granulats recyclés [4]

- L'absorption élevée d'eau des granulats recyclés (surtout pour les fins) due au mortier d'ancien ciment qui recouvre les granulats naturels.
- La résistance faible des granulats recyclés.
- Les surfaces de fissuration suivent le plus souvent le contour des gros granulats recyclés, la rupture des BGR s'effectue ainsi dans la pâte de mortier ancien attachée aux GBR. De ce fait l'auréole de transition constitue le maillon faible de la matrice de BGR. Le mortier ancien qui recouvre les granulats est à l'origine de cette fragilité

La plupart des auteurs s'entendent pour dire que la résistance à la compression des BGR est inférieure à celle du béton à base de GN de même ouvrabilité. Cette diminution de résistance serait de l'ordre de 10% [2], pour un remplacement à 100% de gros granulats naturels par des granulats recyclés. Si tous les granulats du béton sont remplacés par des granulats recyclés, cette baisse est de l'ordre de 24% à 35% [2]

La rupture des BGR s'effectuait dans le mortier attaché aux GBR, contrairement aux bétons à base de GN où la rupture s'effectue aux interfaces pâte-granulats [8].

Certaines études ont indiqué une relation entre le rapport granulats sur ciment et la résistance à la compression du BGR (figure 2.5): une diminution du rapport granulats sur ciment est bénéfique pour la résistance à la compression du BGR [25]. Les auteurs ont souligné que la faible résistance à l'écrasement des granulats ainsi que la faible adhérence entre les granulats et la pâte de ciment sont les causes de ces résultats. En fait, la teneur en ciment dans le béton joue un rôle vital dans le comportement de résistance à la compression du BGR.

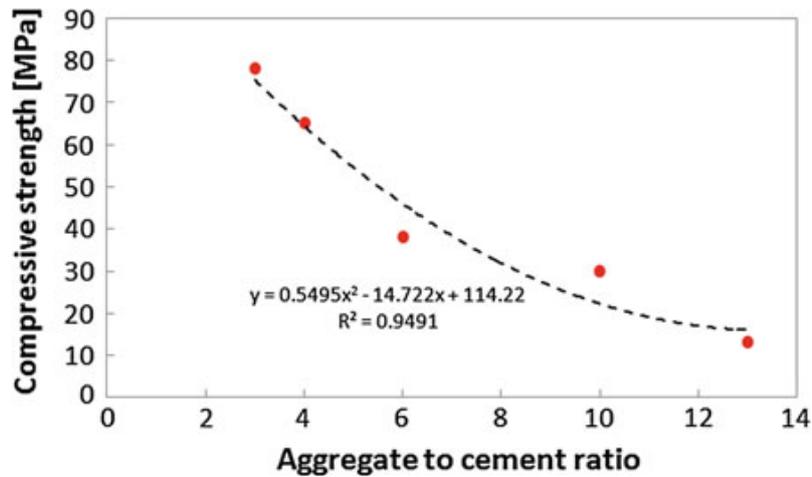


Figure 2.5 : Relation entre le rapport granulats ciment et résistance à la compression du BGR [1]

Certains chercheurs ont observé des différences beaucoup plus faibles entre la résistance du béton conventionnel et celle du BGR, lorsque le rapport E/C a augmenté jusqu'à une certaine valeur et qu'elles sont devenues les plus faibles pour les valeurs E/C entre 0,58 et 0,80 (figure. 2.6).

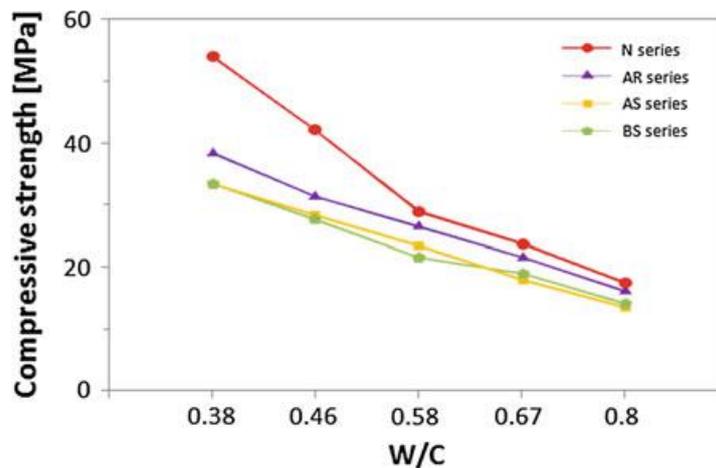


Figure 2.6 : Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression du BGR[1].

2.5.1.2 Résistance à la traction

De manière similaire à celle de la résistance à la compression, la tendance générale est la diminution de la résistance à la traction du béton avec l'augmentation du pourcentage de remplacement de granulats recyclés [1].

Certains auteurs ont noté des baisses de résistance de 20 à 40%. C'est le cas de Zaharieva et al [24].

Yang et al [44] ont observé une diminution de la résistance à la traction du béton recyclé avec l'augmentation de coefficient d'absorption d'eau du GBR incorporés. Comme pour la résistance à la compression, Gomez-Soberon [41] ont observé une relation inverse entre la résistance à la traction et la porosité du béton recyclé. La relation entre la porosité ouverte et la résistance à la traction observée par l'étude Gomez-Soberon est présentée sur la figure 2.7.

En plus de la faible qualité des granulats recyclés et les microfissures que comportent ces granulats, et qui sont dues au mode de concassage [9], la baisse de résistance en traction des bétons recyclés est en général due à l'augmentation en pate de ciment [3] et à la forme (plus angulaire et moins cubique) des granulats recyclés [5].

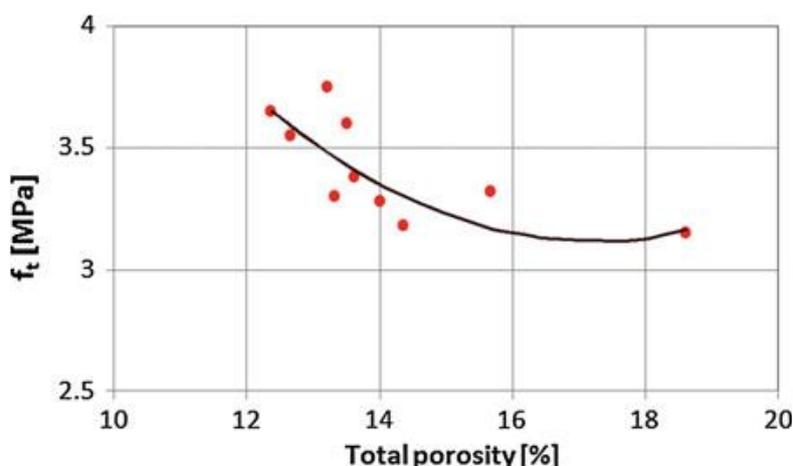


Figure 2.7 : Relation entre la porosité ouverte et la résistance à la traction [41]

2.5.1.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young est représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte déformation.

Les modules d'élasticités des bétons à base de granulats recyclés sont généralement plus faibles que ceux des bétons à base de granulats naturels correspondants.

Les facteurs les plus importants qui affectent le module d'élasticité sont la teneur en mortier adhére, le rapport E/C et la teneur en air. [13].

Que ce soit la résistance à la compression ou la résistance à la traction, la plupart des études mentionnent une baisse dans le module d'élasticité avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés [1].

On a observé des chutes des modules élastiques des bétons à base de gros granulats recyclés, d'environ 15 à 45% par rapport à ceux d'un béton à base de granulats naturels(BGN). Cette baisse en module d'élasticité du béton recyclé est due au module élastique plus faible des granulats utilisés [5]. Une autre hypothèse, est le développement, après concassage, de microfissures dans les granulats recyclés, qui influencent la relation contrainte déformation [8]

Tableau 2 - 5 : Réduction du module d'élasticité du béton avec 100% GBR

Auteurs	%Réduction
Bairagi et al. (1993)[43]	39
Poon et al. (2006)[25]	20–40
Yang et al. (2008) [44]	8–25
Frondistou- Yannas (Frondistou-Yannas 1977) [45]	40

2.5.2 Propriétés physiques du béton recyclé durci

2.5.2.1 Gonflement

La présence des sulfates dans les granulats recyclés est la cause de l'apparition de la réaction sulfatique conduisant à une expansion (gonflement) pouvant provoquer une fissuration du béton [11]. Selon les essais réalisés et compte tenu des porosités, le gonflement de bétons à base de granulats de bétons concassé augmente de 20 à 60% [2].

2.5.2.2 Fluage

Le fluage du béton est défini comme la déformation de la structure sous une charge soutenue. Le fluage dépend de divers facteurs, dont les propriétés des granulats et la quantité de pâte de ciment[1]. Généralement, un faible fluage est observé dans le béton contenant des granulats solides et des granulats de haute rigidité. Comme les propriétés des GBR sont différentes de celles des GN, l'incorporation des GBR modifie considérablement le fluage du béton. Elle augmente également la teneur totale en pâte de ciment dans le béton, ce qui a également un certain effet sur les performances de fluage du béton. En général, le fluage du béton augmente avec l'incorporation des GBR dans le béton.

Domingo-Cabo et al. (2010)[46] ont déterminé la déformation de fluage totale, le coefficient de fluage et la déformation de fluage spécifique du béton en raison du remplacement du GN grossier par du GBR grossier. Ils ont observé une augmentation progressive des paramètres ci-dessus avec le contenu de GBR dans le béton. Ils ont observé une déformation totale de fluage supérieure de 35, 42 et 51% en raison d'un remplacement de 20, 50 et 100% de GN par GBR, respectivement, lorsque les échantillons ont été chargés pendant 180 jours. De même, la déformation de fluage spécifique a également été augmentée de 25, 29 et 32% en raison d'un remplacement de 20, 50 et 100% de GN par GBR. Les coefficients de fluage pour divers mélanges de béton sont présentés dans la figure 2.8.

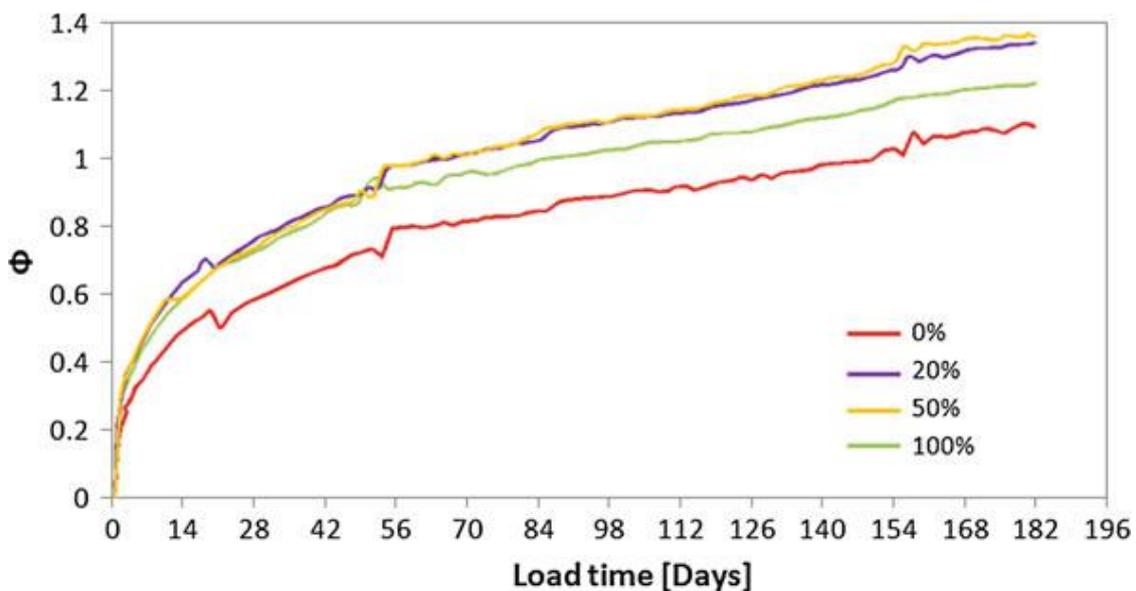


Figure 2.8 : Coefficient de fluage du béton avec remplacement du GN grossier par du GBR grossier [46]

2.5.2.3 Porosité

A cause de la porosité élevée, le béton recyclé présente une absorption d'eau importante. Des chercheurs ont remarqué une augmentation du double de la porosité du béton recyclé par rapport au béton naturel [6]. Gomez-soberon concluait avoir trouvé 50% d'augmentation si seul les gros granulats sont remplacées par des GBR [41].

2.6 La Durabilité

La durabilité du béton est sa capacité de maintenir dans le temps les fonctions pour lesquelles il a été conçu et utilisé dans une construction

La durabilité du béton est fonction du matériau et des conditions d'exposition, qui dépendent elles-mêmes de la température, l'agressivité chimique et mécanique du milieu environnant, et de l'humidité.

La durabilité d'une structure en béton est généralement affectée par l'action simultanée de différents facteurs externes mécanique, physique, chimique ou biologique (figure 2.9)

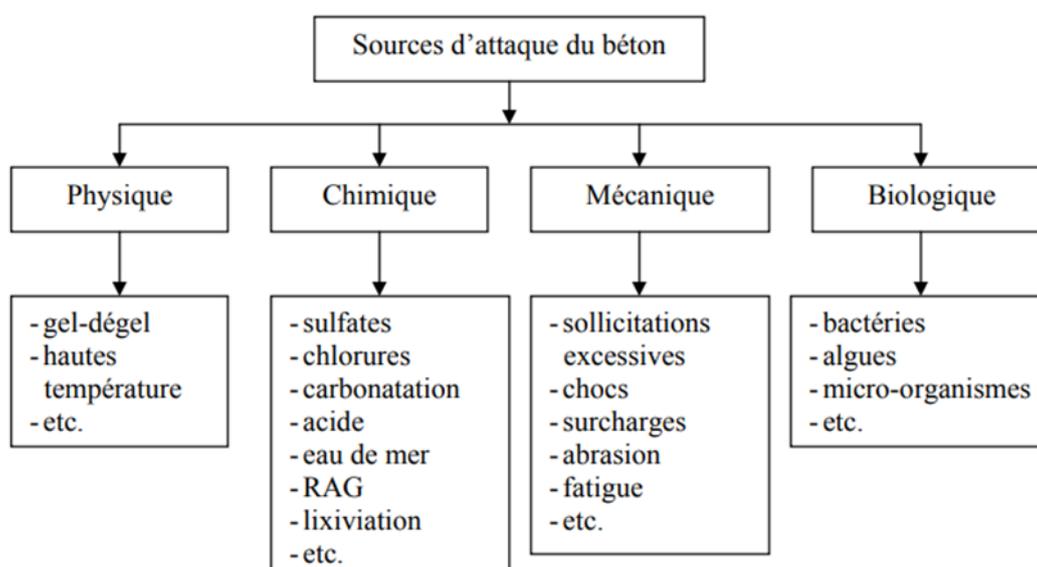


Figure 2.9 : Organigramme des différentes causes de détérioration du béton

Les causes majeures de détérioration du béton par ordre d'importance décroissante, les sont : la corrosion des armateurs, l'action du gel dans les climats froids et l'effet chimique sur les pâtes de ciment hydraté, du aux agents extérieurs (eaux chargées en dioxyde de carbone, sulfates ou chlorures)

2.6.1 Retrait de séchage

Le retrait de séchage est la diminution du volume de béton due à la perte d'humidité capillaire du béton, qui entraîne la progression des fissures à l'intérieur de la structure méso-poreuse du mortier de ciment[47].

Les résultats présentés par plusieurs chercheurs montrent que le retrait de séchage du béton de granulats recyclés est supérieur à celui du béton avec des granulats naturels, et l'ampleur du retrait dépend de nombreux facteurs tels que la quantité de granulats recyclés, la méthode de malaxage, méthode de concassage, qualité des granulats recyclés, conditions de durcissement, utilisation d'adjuvants minéraux.

L'augmentation de la quantité de pâte de ciment dans le béton due à l'incorporation des GBR a été identifiée comme la principale raison de l'augmentation du retrait de séchage du béton[48].

Le retrait du béton augmente avec le taux de GBR et la résistance de conception. Les raisons de cette tendance sont: l'augmentation de la teneur en ciment pour réduire la valeur E/C et atteindre la même résistance du béton courant, et la présence d'anciennes pâtes de ciment dans GBR[49]. Comme dans le béton courant, un retrait plus faible a été observé dans le béton recyclé avec une résistance à la compression plus élevée.

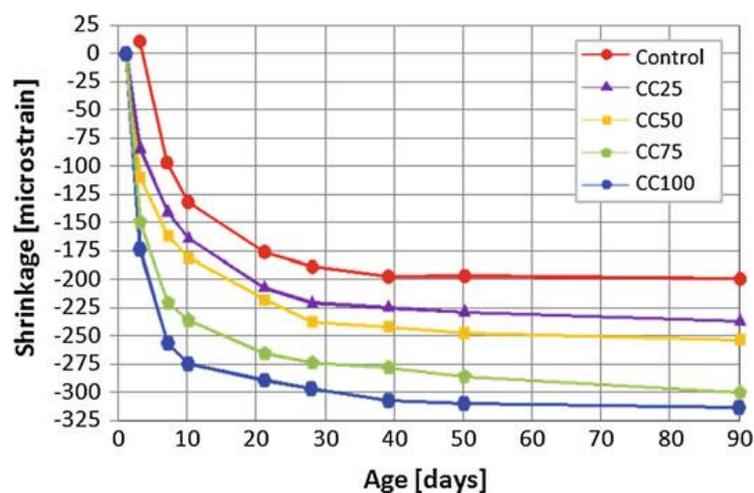


Figure 2.10 : Retrait de séchage du béton courant et du BGR (CC) en fonction du temps[50]

2.6.2 Perméabilité

La perméabilité est le passage de matières étrangères à travers les pores du béton. La perméabilité peut être indiquée par plusieurs façons comme la perméabilité à l'eau, la perméabilité à l'air, la perméabilité à l'oxygène, l'eau capillaire et l'absorption d'eau.

Un béton à faible perméabilité est un béton durable. Une perméabilité plus faible signifie une teneur en vides plus faible dans le béton, et donc l'eau et certains autres agents de corrosion ne peuvent pas pénétrer facilement le béton.

La porosité du béton dépend de plusieurs facteurs, dont la porosité des granulats. L'utilisation des GBR dans le béton peut modifier son porosité en raison de la porosité plus élevée des GBR que celle des GN.

La plupart des chercheurs ont constaté que la perméabilité du BGR fabriqué partiellement ou entièrement avec des granulats recyclés était plus grande que celle du béton préparé avec des granulats naturels et qu'elle augmente avec l'augmentation du pourcentage de GBR. Cela est dû à la présence d'une plus grande quantité de pores, de fissures et de fissures sur le mortier attaché dans les GBR pendant la production[32].

2.6.2.1 Perméabilité à l'eau

Thomas et al[51]. Ont étudié la pénétration de l'eau dans le béton pour des mélanges de différents pourcentages de GBR. Cette caractéristique physique donne des informations liées à la perméabilité à l'eau de ce matériau et par conséquent, on obtient de l'information indirecte sur la facilité avec laquelle les ions chlorure peuvent rentrer dans la matrice du béton. Dans cette étude, la profondeur de pénétration de l'eau a augmenté avec le rapport E/C et avec le pourcentage de GBR utilisée.

Ces résultats ont été obtenus en utilisant trois échantillons cylindriques de chaque mélange pour la pénétration maximale de l'eau sous pression. Dans cet essai, une colonne d'eau agit sur l'échantillon 72 h sous 5 bars de pression, ce qui revient à maintenir les échantillons à 50 m de profondeur sous l'eau.

La perméabilité à l'eau augmente avec le rapport E/C et avec le pourcentage de GBR incorporé, les courbes ont tendance à converger vers des valeurs de pénétration de l'eau

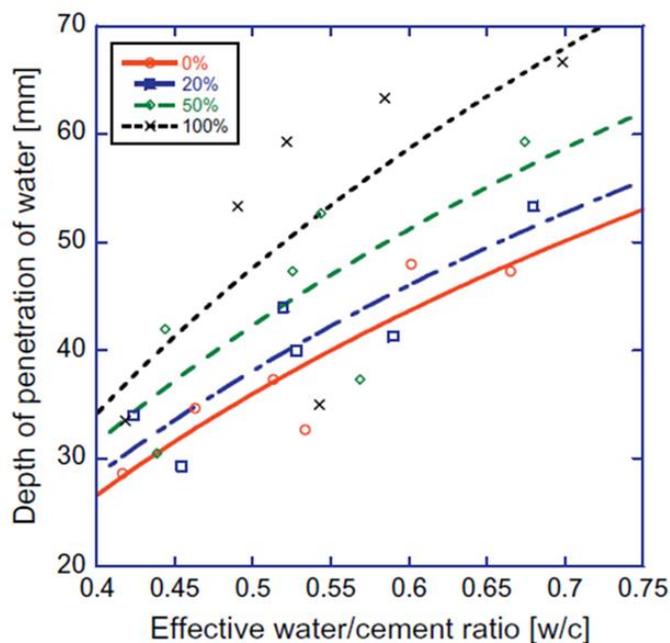


Figure 2.11 : Profondeur de pénétration de l'eau en fonction du rapport E/C après 28 jours [51]

D'environ 30 mm et un rapport E/C inférieur à 0,45. Dans ces conditions, on peut confirmer que les différences observées entre béton courant et BGR sont minimales. En général, la profondeur maximale enregistrée est liée au degré d'incorporation de GBR.

Cependant, comme cela a été noté, avec un E/C inférieur à 0,45, les valeurs de pénétration de l'eau obtenues sont très similaires dans tous les cas[51].

La figure 2.12 montre la pénétration de l'eau sous pression par rapport à la résistance à la compression du BGR. La représentation montre quelques particularités. Il y a peu de différence entre les courbes du Béton courant et celles avec 20% d'incorporation de GBR. Les courbes convergent vers des valeurs de pénétration de l'eau de 30 mm correspondant à une résistance à la compression d'environ 60 MPa.

Pour des valeurs plus élevées de résistance à la compression, l'incorporation de GBR n'a aucun effet appréciable sur la profondeur de pénétration de l'eau[51].

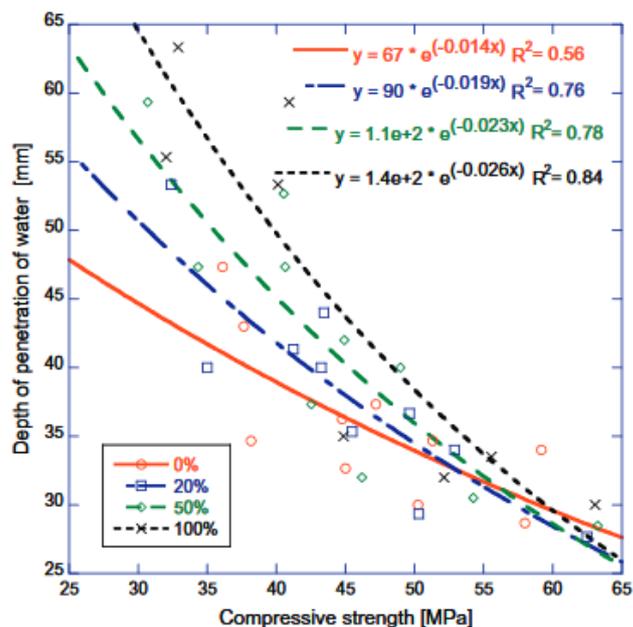


Figure 2.12 : Pénétration maximale de l'eau sous pression en fonction de la résistance à la compression du BGR [51]

Pour la pénétration maximale de 50 mm imposée par des différentes normes, la résistance à la compression du béton courants est d'environ 35 MPa, bien que pour 100% GBR, la résistance à la compression requise pour garantir la même profondeur de pénétration de l'eau soit supérieure à 40 MPa.

2.6.2.2 Perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air du béton est liée à sa microstructure. Cette propriété dépend de la porosité, de la connectivité des pores, des fissures et de la saturation en eau du béton. Étant donné que les GBR sont poreux et, dans certains cas, fissurés, l'incorporation des GBR dans le béton affecte sa perméabilité. La plupart des études[51][49] ont clairement indiqué que la perméabilité au gaz du BGR avec une substitution totale ou partielle de GN par le GBR est supérieure à celle du béton courant.

On observe que la différence de perméabilité aux gaz entre le béton courant et le BGR diminue avec les paramètres suivants:

- Le temps de durcissement[52].

- les conditions de durcissement, la perméabilité à l'air du BGR était 6 fois supérieure à celle du béton courant après durcissement à l'eau et environ 20 fois après durcissement à l'air[34].
- En utilisant un rapport E/C plus faible[51].
- Processus de malaxage par approche de malaxage en deux étapes, ce qui réduit la perméabilité à l'air à environ 41% en 182 jours[28].

2.6.3 Résistance aux cycles de gel/dégel

La plupart des études rapportent que la résistance au gel-dégel du BGR est inférieure à celle des bétons courants[53] et dépend notamment du degré de saturation en eau du matériau. D'autres chercheurs[54] montrent qu'en utilisant un entraîneur d'air, les BGR peuvent s'avérer aussi durables que les bétons de granulats naturels.

Une étude[55] sur l'influence de la pré-saturation en eau des GBR vis-à-vis de la résistance aux cycles de gel-dégel. Les caractéristiques suivantes des bétons ont été investiguées : rapport E/C (0,7, 0,6, 0,5), pourcentage de granulats naturels substitués par des GBR (0 %, 50 %, 100 %), et degré de saturation des GBR (0 %, 50 %, 100 %). La taille maximale des GBR était de 8 mm, et leur absorption d'eau de 6,2 %. Il a été constaté que la saturation complète et la saturation à 50 % des GBR améliore la résistance du béton aux cycles gel-dégel.

Dans différentes études Nous avons trouvé ces résultats :

- la résistance au gel/dégel du BGR est similaire à celle du béton de granulats naturels, à résistance mécanique équivalente.
- la résistance au gel-dégel du BGR diminue avec l'augmentation du pourcentage de remplacement du GBR et du taux E/C, mais ils diminuent lorsqu'une quantité de cendres volantes est appliquée dans le Béton[56], la raison principale étant attribuée à l'absorption d'eau plus élevée des GBR.
- la résistance au gel/dégel du BGR est liée aux propriétés de l'ancien béton présent dans les GBR. Les GBR provenant d'un béton sans air entraîné ont une résistance au gel/dégel plus faible[57].

2.7 Conclusion

Sur la base des études présentées, les aspects importants suivants ont été observés

La différence de résistance à la compression entre le béton courant et le BGR a diminué avec l'augmentation du rapport E/C jusqu'à 0,55, puis les deux résistances sont presque égales.

Les propriétés du BGR fait de 0 à 100% de granulats grossiers recyclés ont été étudiées et ont conclu que le BGR fait de 20 à 30% de granulats grossiers recyclés n'affecte pas de manière significative les propriétés du béton

Quel que soit le pourcentage d'inclusion de GBR, la résistance à la traction par fendage des BGR est toujours inférieure à celle du béton courant et la différence est plus importante à 100% du GBR.

La variation du développement de la résistance du BGR avec l'âge de durcissement suit la même tendance que celle du béton courant. Cependant, le pourcentage de gain de résistance de 7 jours à 28 jours est plus faible que le béton courant.

La densité du BGR a diminué avec l'augmentation de la quantité de GBR en raison de la présence d'ancien mortier adhérent à la surface du GBR. En outre, la méthode de malaxage ne montre aucun changement significatif dans la densité de BGR.

Les facteurs tels que la quantité des GBR, la qualité des GBR, les conditions de durcissement, la méthode de concassage, la méthode de malaxage, l'utilisation d'adjuvants minéraux influencent principalement la performance à long terme et la durabilité du BGR.

Le retrait au séchage du BGR augmente avec l'augmentation du taux de substitution avec GBR.

La substitution de 20 à 30% par des GBR n'a montré aucune différence significative dans le comportement au retrait du BGR et du béton courant. Mais, l'inclusion des granulats fins (sable) recyclés affecte considérablement le comportement de retrait du BGR.

Chapitre 3

Procédure Expérimentales

3.1 Introduction

Dans ce chapitre les points suivants seront présentés à savoir les objectifs du présent projet de fin d'études, la méthodologie employée, les matériaux ainsi les équipements utilisés, la formulation et procédure de malaxage du béton, la confection et cure des éprouvettes ainsi que les différents essais effectués sur le béton ordinaire et le béton élaboré.

3.2 Objectifs du projet

L'objectif général du projet est d'examiner la possibilité de remplacer les granulats naturels utilisés dans le béton par des granulats recyclés issus de déchets de démolition. Plus précisément, il s'agit d'étudier l'effet de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton destiné à la construction d'une façon générale.

Cette étude sert aussi à obtenir des données sur l'utilisation de matériaux recyclés disponibles en Algérie dans la confection de nouveaux bétons. Ces données peuvent éventuellement être utilisées dans le but d'aider à avancer dans l'élaboration d'une norme qui permettra l'utilisation des granulats recyclés dans les nouveaux bétons. Il faut signaler qu'il n'existe aucune norme pour les agrégats recyclés.

Afin d'étudier la valorisation des granulats recyclés dans le béton de résistance moyenne, le présent projet est structuré en trois phases. La première est consacrée à la récupération des granulats à recycler issus de la démolition.

La deuxième phase est destinée à la caractérisation du matériau recyclé. Cette partie consiste à définir les propriétés du matériau recyclé et à obtenir l'information qui permet d'adapter la méthode de préparation du béton aux granulats recyclés. La troisième phase a permis de formuler un béton ayant un taux de remplacement du granulats naturel de 100% et d'évaluer l'impact de ceux-ci sur le béton élaboré.

Les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité de ces mélanges sont évaluées dans cette phase.

En raison des contraintes du laboratoire et de la pandémie mondiale, nous avons fait de notre mieux pour finaliser notre projet en respectant étroitement les mesures barrières et les recommandations strictes de notre établissement.

3.3 Méthodologie

L'étude comprend trois phases distinctes : démolition et récupération des granulats recyclés ; conditionnement et caractérisation des granulats recyclés ; et finalement étude des différents paramètres sur le béton. Le Programme expérimental est présenté sur la figure 3.1

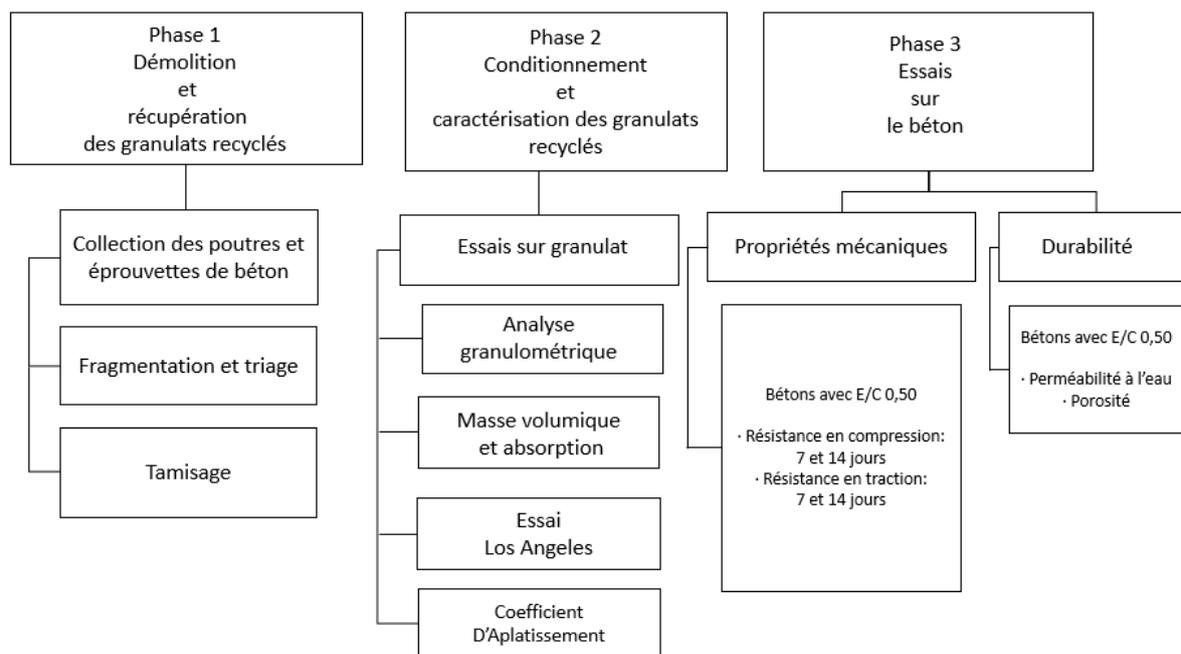


Figure 3.1 : Programme expérimental

3.3.1 Phase 1 : Obtention des granulats recyclés

La première phase a consisté à casser d'anciennes poutres et éprouvettes déjà confectionnées et testées au laboratoire de génie civil par les anciennes promotions, dans le but de récupérer les granulats à recycler. Ainsi, 3 poutres datées de 2003, et des éprouvettes dont la plus récente est de 2018 ont été sélectionnées.

Il a fallu une semaine pleine pour les fragmenter à l'aide d'un marteau jusqu'à obtenir des dimensions adaptées pour les introduire dans la machine Los Angeles. Malheureusement le résultat obtenu n'était pas satisfaisant aussi il était donc nécessaire de poursuivre le travail manuellement.

Par la suite On a procédé à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires 0/5, 8/15 et 15/25.

Il est à noter que seuls les spécimens du laboratoire (poutre, éprouvettes) ont été fragmentés, par conséquent les granulats résultants sont propres.

En se basant sur la littérature, il a été décidé de ne pas utiliser les éléments fins, inférieurs à 5mm.



Figure 3.2 : Démolition et élaboration des granulats recyclés

3.2.2 Phase 2 : Conditionnement et caractérisation des granulats recyclés

La deuxième phase consiste en la caractérisation détaillée des granulats recyclés et la comparaison avec les granulats naturels.

Cette phase a pour but d'identifier les propriétés des granulats recyclés. Les essais effectués sont des essais normalisés sur granulats (analyse granulométrique, la masse volumique, l'absorption d'eau, l'essai de résistance à l'abrasion Los Angeles et le coefficient d'aplatissement).



Figure 3.3 : Mesure de coefficient d'aplatissement

3.2.3 Phase 3 : Essais sur le béton

La troisième phase d'étude consiste à effectuer les différents essais sur le béton.

Suite au confinement dû au Covid-19, le programme expérimental a été revu et redéfini, d'autant plus qu'il était impératif d'arrêter au mois de mars notre travail au milieu de la caractérisation et la formulation de notre béton.

Dès que la direction de l'école a de nouveau autorisé l'accès au laboratoire, le travail a repris avec une réduction de la durée de cure à 7 et 14 jours au lieu à 28 jours avec deux mélanges, un béton témoin et un béton contenant des granulats recyclés avec un taux d'incorporation de 100%.

Des essais ont été réalisés durant cette reprise afin d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Les essais effectués à ce stade sont des essais sur béton frais (affaissement et masse volumique), des essais d'évaluation des propriétés mécaniques du béton durci (résistance à la compression et résistance à la traction indirecte par l'essai brésilien) en

plus des essais visant à mesurer la durabilité du béton durci (perméabilité à l'eau et porosité).



Figure 3.4 : Essai de traction par fendage

3.4 Matériaux utilisés

3.4.1 Ciment Portland

Le ciment utilisé est un ciment portland de type CEM II 32.5 N fabriqué en Algérie par Chamil Lafarge.

Nous avons utilisé le même sac de ciment pour la fabrication de l'ensemble des bétons (béton granulats naturels **BGN** et béton de granulats recyclés **BGR**)

3.4.2 Les granulats (naturels et recyclés)

Dans cette étude deux types de granulats ont été utilisés.

- Les granulats naturels (GN) : provenant des carrières

- Les granulats bétons recyclés (GBR): les granulats recyclés sont préparés au niveau de notre laboratoire par concassage de béton et séparation par l'opération de tamisage selon chaque fraction souhaitée sans lavage.

Tableau 3 - 1 : Identification des granulats naturels et recyclés utilisés

	Type	Classe	Code	Nature	Source
Naturels	Granulat	15-25	GN 15/25	Calcaire Concasse	Carrière
	Granulat	8-15	GN 8/15	Calcaire concasse	Carrière
	Sable	8-3	SN 8/3	Calcaire concasse	Carrière
	Sable	0-3	SN 0/3	Sable des dune	Gisement
recyclés	Granulat	15-25	GBR 15/25	Béton concassé	Fabrique en laboratoire
	Granulat	8-15	GBR 8/15	Béton concassé	Fabrique en laboratoire

Les quantités obtenues depuis le recyclage	
classe	Quantités (Kg)
15-25	110.490
8-15	142.730
0-8	167.675

3.4.2.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique a été effectuée sur les granulats naturels et recyclés suivant la norme française NF EN 933-1[58]. Elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M ($200D < M < 600D$) préalablement sécher dans une étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat.

- **Coefficient d'uniformité:** noté CU, est déterminé comme suit

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Avec :

D60 : est le diamètre du tamis qui laisse passer 60% de l'échantillon.

D10 : est le diamètre du tamis qui laisse passer 10% de l'échantillon.

D60 et D30 sont déterminés sur la courbe granulométrique.

- **Coefficient de courbure** : noté C_c , est déterminé comme suit

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Avec :

D_{30} : le diamètre du tamis qui laisse passer 30% de l'échantillon

- **Le module de finesse M_f** :

Le module de finesse des sables est déterminé selon la norme XP P 18-540, en utilisant la formule suivante:

$$M_f = \frac{1}{100} \times \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5\}$$

3.4.2.2 Le Coefficient d'Aplatissement (A) :

Le coefficient d'aplatissement (A) est l'un des facteurs qui déterminent la forme des gravillons. Selon la norme NF EN 933-3[59]. Il consiste en une double opération de tamisage du même échantillon (4-25 mm) de granulats d'une masse $M \geq 0,2D$, en utilisant une série de tamis à maille carrées et une série de grilles à fente parallèles d'écartement $E=D/2$. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Le coefficient d'aplatissement est calculé d'après la formule suivante:

$$A_i = \frac{\sum m_i}{\sum R_i} \times 100$$

Avec :

R_i : Masse de la classe granulaire

m_i : Masse passant à travers le tamis à fente parallèles d'écartement E

Correspondant

3.4.2.3 Essai Los-Angeles

La résistance à la fragmentation (au choc) est déterminée par l'essai Los-Angeles selon la norme NF P18-650-2[60], qui stipule la valeur spécifique limite de 40% à ne pas dépasser. L'essai consiste à mesurer la masse (m) d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los-Angeles en 500 rotations à une vitesse régulière



Figure 3.5 : Les GBR 15-25 après fragmentation

Les matériaux sont lavés, tamisés et séchés à l'étuve à 105°C, jusqu'à une masse constante. Le coefficient Los-Angeles est déterminé par la formule

$$La = \frac{m}{M} \times 100$$

Avec:

m : le passant du matériau au tamis 1,6mm après essai en(g).

M : la masse initiale en (g), $M = 5000 \pm 5$ g.

3.4.2.4 Masses volumiques

Les masses volumiques apparente et absolue des différents granulats utilisés sont calculées d'après la norme NF P18-650-6[61].

- La masse volumique apparente φ_{app}

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau avec tous vides inclus, exprimée en Kg/m³.

$$\varphi_{app} = \frac{M_s}{V}$$

Avec

M_s : la masse de granulats secs

V : volume de solides V_s + volume de vides V_v ($V = V_s + V_v$)

- La masse volumique absolue φ_{abs}

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau (les vides exclus).

$$\varphi_{abs} = \frac{M_s}{V_s}$$

Avec M_s : la masse de granulats secs

V_s : volume de solides V_s

3.4.2.5 Taux d'absorption d'eau :

Les granulats recyclés se différencient des granulats naturels essentiellement par leur structure poreuse. La porosité ouverte élevée des granulats recyclés entraîne une forte capacité d'absorption d'eau. C'est le paramètre le plus important qui distingue les granulats recyclés des granulats naturels.



Figure 3.6 : Les GBR immergés dans l'eau pendant 24h

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes NF P18-650[62]. Il est déterminé selon la formule suivante

$$Ab = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Avec :

- Mh : la masse de l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche).

- Ms : la masse de l'échantillon séché à 105°C.

3.4.2.6 Propreté des sables

L'analyse de la propreté des sables utilisés permet de déceler la présence d'éléments fins dans le sable et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique appelée équivalent de sable (ES). L'essai est réalisé conformément au mode opératoire défini dans la norme la norme NF P18-622-8 [63].

L'équivalent de sable est déterminé selon la formule suivante:

$$ES = \frac{h1}{h2} \times 100(\%)$$

Où : - h1 en (cm): est la hauteur totale y compris le flocculat (fines en suspension).

- h2 en (cm): est la hauteur du dépôt de sable visible.

3.4.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du réseau d'eau potable de distribution.

3.5 Matériels et équipements utilisés

3.5.1 Malaxeur

Le malaxeur utilisé est un malaxeur à axe rotatif vertical de capacité maximale 100 litres



Figure 3.7 : Malaxeur à axe rotatif vertical

3.5.2 Les moules

Trois types de moules sont utilisés pour confectionner les éprouvettes de béton

- Moules cylindriques en acier ($\text{Ø}160\text{mm}$, h 320mm)
- Moules cubiques en acier (150x150x150 mm³)
- Moules cubiques en acier (100x100x100 mm³)

3.6 Confection et cure des éprouvettes

La préparation des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe vertical de capacité maximale 100 litres. La fabrication des éprouvettes nécessite pour chaque type de béton une seule gâchée

Avant démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'air. Après 24 heures de coulage, toutes les éprouvettes sont démoulées puis conservées dans l'eau. Pour les essais de compression, traction, Porosité et Perméabilité à l'eau, les éprouvettes sont immergées 14 jours avant d'être testées.

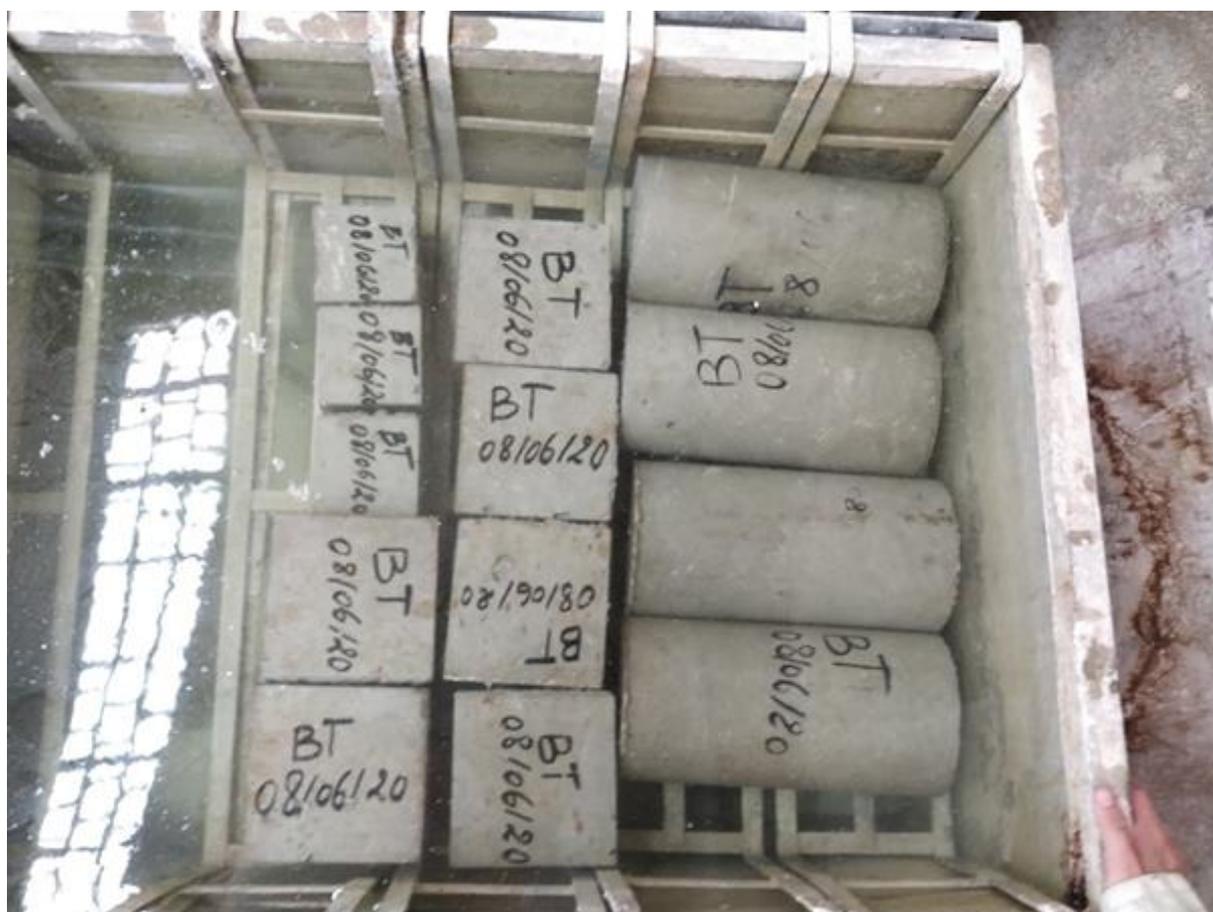


Figure 3.8 : Cure des éprouvettes

Les différentes éprouvettes utilisées pour la réalisation des essais, sont résumées dans le tableau 3.2

Tableau 3 - 2 : Eprouvettes utilisées pour la réalisation des essais sur les différents bétons

Essai	Eprouvette (mm)	Nombre	Norme
Résistance à la compression	Cubique (150x150x150)	4	NF EN 12390-3[64]
Résistance à la traction par fendage	Cylindrique (Ø160, h320)	4	NF EN 12390-6[65]
Perméabilité à l'eau	Cubique (150x150x150)	2	NF EN 12390-8[66]
Porosité	Cubique (100x100x100)	3	NBN B 15-215[67] NBN B 15-217[68]

3.7 Formulation et procédure de malaxage du béton

3.7.1 Formulation du béton:

L'étude de la composition d'un béton consiste presque toujours à rechercher conjointement deux qualités essentielles : la résistance et l'ouvrabilité.

Les méthodes de formulation de béton permettent d'obtenir des dosages en constituants "volumétriques" ou "pondéraux" des différents constituants. Elles sont dites à granulométrie continue et à granulométrie discontinue. Pratiquement, la plupart des bétons utilisés actuellement sont à granularité continue.

Il existe de nombreuses méthodes de formulation, car il existe de nombreux paramètres à considérer lors de l'étude de la composition du béton. Les plus couramment utilisées sont liées aux noms suivants: Bolomey, Abrams, Faury, Valette, Joisel et Dreux-Gorisse. Cette dernière a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations testées sur le chantier et ont donné des résultats satisfaisants. Elle est très simple d'utilisation et se base sur la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés.

3.7.1.1 Béton témoin

Pour les besoins de l'étude, nous avons fabriqué un béton naturel (béton témoin) à base de 100% de gros et fins granulats naturels ; il constitue la référence (BGN) pour tous l'autre bétons recyclé BGR fabriqués

On a utilisé la méthode de **Dreux-Gorisse**.

- Diamètre maximal des granulats $D_{max} = 25 \text{ cm}$
- Les trois classes granulaires : sable (0/5) et gravier (8/15 et 15/25).
- Affaissement = 9 cm (béton plastique)
- Vibration normale (aiguille vibrante)
- On choisit un rapport $\frac{E}{C} = 0.5$
- On a obtenu le dosage en utilisant l'abaque représenté dans la figure 3.9 ci-dessous. Selon l'affaissement et le rapport C/E choisit, le dosage est de 380 kg/ 1M³
- D'où $E = 0.5 \times C \Rightarrow E = 190 \text{ litre}/1\text{M}^3$

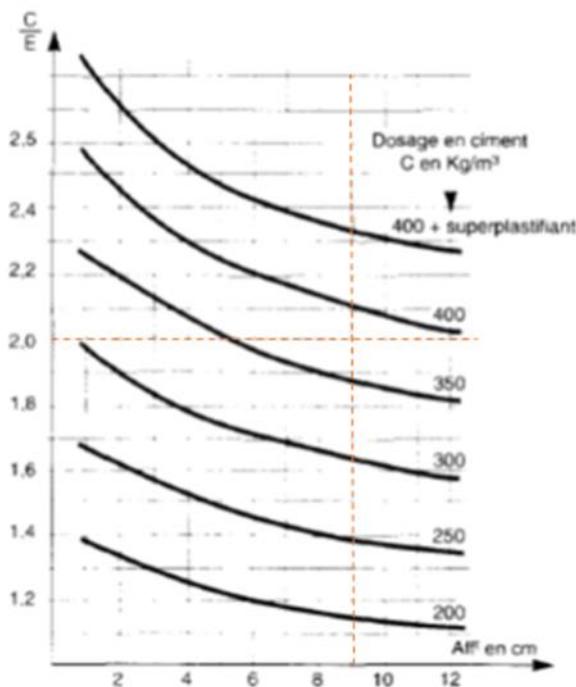


Figure 3.9 : Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E[69].

- Courbe de référence :

On trace la référence OAB de la courbe granulométrique et on calcul les points :

- Point de l'origine (0, 0)
- Point de l'extrémité B (D_{max} , 100%)

- o Point de brisure A (X_A, Y_A) définit de notre travail comme suit :

Avec $X_A = 11.5$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{\max} + k + k_s + k_s}$$

Où : $D_{\max} = 25$

K est un coefficient donné par le tableau 3.3

K_s et K_p étant des coefficients correctifs

$$K_p = 0 \text{ béton non pompe}$$

$$K_s = 6 M_f - 15 \Rightarrow M_f = 2.5 \quad k_s = 0$$

$$K = 0.8$$

- On a les coordonnées suivant :
- O (0,0)
 - B (25,100)
 - A (11.5,45.8)

Les détails des Analyse granulométrique des granulats naturels sont présentés dans l'annexe A.

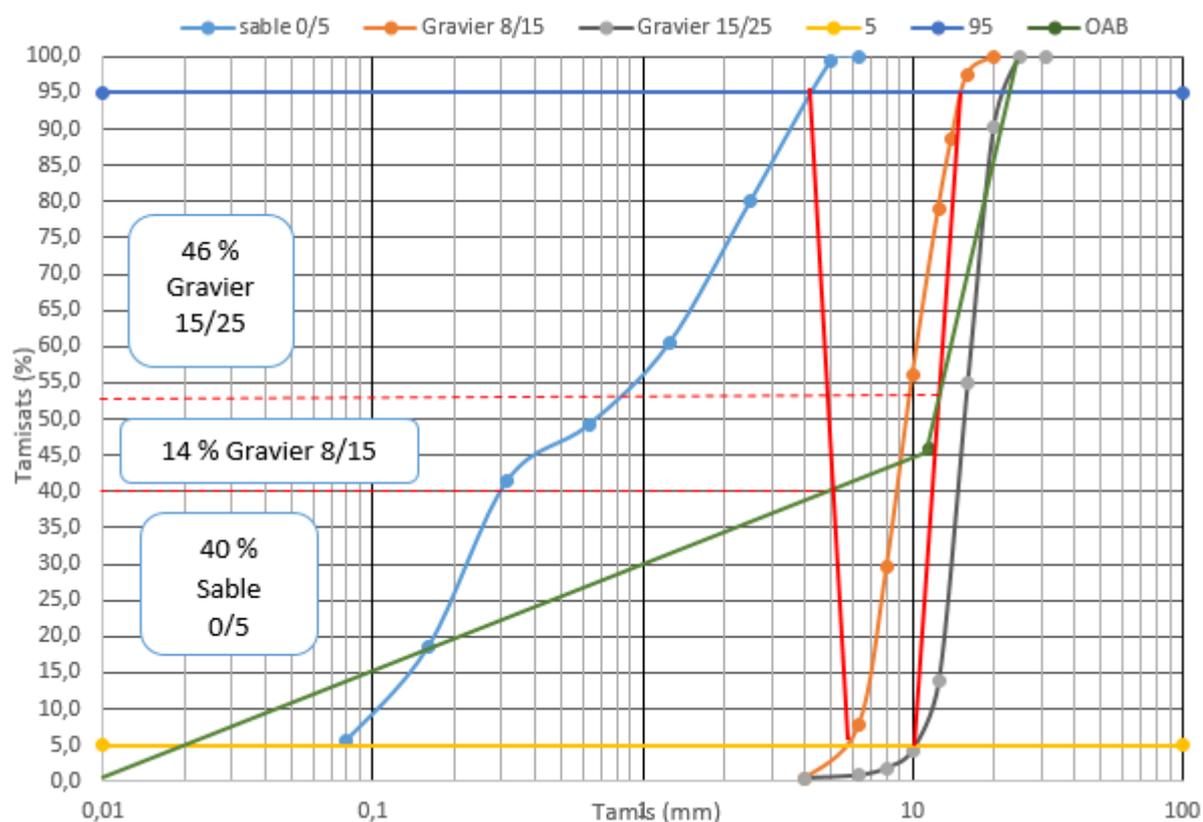


Figure 3.10 : Courbe granulométrique

Tableau 3 - 3 : Valeur de K

Vibration		Faible		Normale		puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	concassé	Roulé	concassé	Roulé	concassé
Dosage en ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Dosage en granulats : Coefficient de compacité γ : $D_{max}=25$ mm d'après le tableau 3.4 on tire la valeur par une interpolation D20 et D31.5

Tableau 3 - 4 : volumes absolus des matières solides en litres /1000

Ouvrabilité	Vibration	γ (Granulats roulés ; C = 350 kg/m ³)					
		D = 4 mm	D = 8 mm	D = 12.5 mm	D = 20 mm	D = 31.5 mm	D = 40 mm
Très Plastique $10 \leq A \leq 15$ cm	Piquage	0.75	0.78	0.795	0.805	0.81	0.815
	Faible	0.755	0.785	0.8	0.81	0.815	0.82
	Normale	0.76	0.79	0.805	0.815	0.82	0.825
Plastique $5 \leq A \leq 9$ cm	Piquage	0.765	0.795	0.81	0.82	0.825	0.83
	Faible	0.77	0.8	0.815	0.825	0.83	0.835
	Normale	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835	0.84
Ferme $0 \leq A \leq 4$ cm	Piquage	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835	0.84
	Faible	0.78	0.81	0.825	0.835	0.84	0.845
	Normale	0.785	0.815	0.83	0.84	0.845	0.85
Corrections sur γ	- 0.01 (Sable roulé, Gravier concassé)			En fonction du dosage en ciment : $(C - 350) / 5000$			
	- 0.03 (Sable et Gravier concassé)						

Les résultats de la formulation de béton témoin est résumé dans le tableau ci-dessous 3.5

Tableau 3 - 5 : Composition d'1 m³ de BGN

	Ciment	Sable de dune	Sable 0/5	Gravier 8/15	Gravier 15/25	L'eau
Volume (L)	122.58	88.47	182.90	94.98	312.07	190
Masse (kg)	380	233.55	468.23	250.74	817.63	190

3.7.1.2 Béton recyclé (BGR)

Pour le BGR nous avons remplacé les GN par des GBR (en volume) pour garder la même formulation du béton et limiter les variables étudiées

Les résultats de la formulation de béton granulats recyclés est résumé dans le tableau ci-dessous 3.6

Tableau 3 - 6 : Composition d'1 m³ de BGR

	Ciment	Sable de dune	Sable 0/5	Gravier 8/15	Gravier 15/25	L'eau
Volume (L)	122.58	88.47	182.90	94.98	312.07	190
Masse (kg)	380	233.55	468.23	232.70	748.98	190

3.7.2 Malaxage du béton

Le tableau 3.7 résumé La procédure de malaxage suivie.

Tableau 3 - 7 : Procédure de malaxage du béton

Temps	t ₀ -4'	t ₀ -2'	t ₀ -1'	t ₀	t ₀ +30''	t ₀ +2'	t ₀ +5'	t ₀ +5'30''
Ajouts	G+S+½E		ciment		½E			
Malaxage	malax.	repos	malax.	repos	malax.	repos	malax.	repos

3.8 Essais sur Béton

Dans cette partie, nous présentons les essais effectués sur nos différents échantillons de béton et les normes en vigueur appliquées.

Notre travail a consisté à réaliser un essai sur le béton frais et quatre autres sur béton durci. Cependant en raison des contraintes du laboratoire et surtout de la pandémie mondiale, nous étions limités dans notre travail même obligés de suspendre nos essais jusqu'à nouvel ordre. Suite à l'autorisation tardive de reprise nous avons effectué des essais plus tôt que l'âge spécifié initialement.

3.8.1 Essai d'ouvrabilité

L'ouvrabilité a été mesurée à l'aide de l'essai d'affaissement (appelé également l'essai au cône d'Abrams) conformément à la norme NF P 18-451[70].

La norme NF EN 206 [71] classe l'affaissement du béton en cinq groupes

Par ailleurs, nous avons mesuré la masse volumique apparente du béton frais par la pesée d'un volume connu.

Tableau 3 - 8 : Classes d'affaissement

Classe	Affaissement en mm	Propriété du béton frais
S1	10 – 40	Ferme, très secs et peu maniable
S2	50 – 90	Plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne ,Béton armé normal placé avec vibration
S3	100 – 150	Très plastique, très humide et à maniabilité élevée
S4	160 – 210	Fluide, très humide et à maniabilité élevée
S5	≥ 220	Très fluide, très humide et à maniabilité élevée



Figure 3.11 : l'essai d'affaissement

3.8.2 Essai de compression

L'essai a été effectué conformément à la norme NF EN 12390-3[64] où les deux éprouvettes cubiques (150x150x150mm) âgées de 7 jours et 14 jours pour chaque béton sont chargées jusqu'à rupture dans la presse hydraulique model C78Z00. L'essai de compression réalisé conformément à la norme NF EN 12390-4[72]. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.



Figure 3.12 : Ruptures correctes d'éprouvettes cubiques [64]

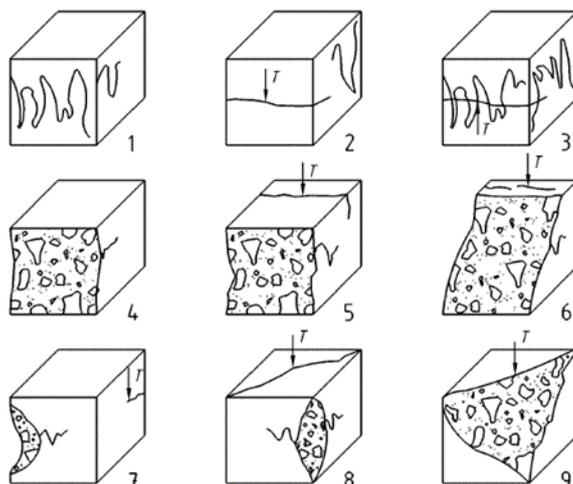


Figure 3.13 : Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cubiques [64]

Pour une rupture correcte les quatre faces exposées sont fissurées approximativement de la même façon, en général sans dommage important des faces en contact avec les plateaux (Figure 3.12).

3.8.3 Essai de traction par fendage

L'essai a été effectué conformément à la norme NF EN 12390-6[65] sur la machine de compression model C78Z00 du laboratoire Génie civil. L'éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction.

La résistance à la traction est déduite par la moyenne d'écrasement par fendage de deux éprouvettes cylindrique ($\varnothing 160\text{mm}$, h 320mm) âgées de 7 jours et 14 jours pour chaque béton.

La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

f_{ct} est la résistance en traction par fendage, en méga pascals ou en newtons par millimètre carré.

Avec : F est la charge maximale, en newtons.

L est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en millimètres.

d est le diamètre nominal de l'éprouvette, en millimètres.

3.8.4 Essai de perméabilité à l'eau

L'essai a été effectué conformément à la norme NF EN 12390-8[66], avec deux éprouvettes cubiques (150x150x150mm) âgées de 14 jours pour chaque béton. Le dispositif d'essai est constitué d'un perméabilimètre à six cellules et d'un compresseur pour maintenir la pression d'eau constante (figure 3.14)



Figure 3.14 : Dispositif d'Essai de perméabilité à l'eau

L'eau est mise sous pression à la surface du béton (5 bars durant 72 heures). A la fin de l'essai, après rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration de l'eau.

La profondeur maximale de pénétration, exprimée au millimètre le plus proche, constitue le résultat de l'essai. Le tableau 3.9 représente l'échelle de l'essai

Tableau 3 - 9 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [73]

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

3.8.5 Essai de porosité

On définit la porosité comme la fraction du volume occupée par les cavités

Porosité (%) = absorption d'eau par immersion (en %) x masse spécifique sèche du béton (en kg/dm³)

Pour trouver la porosité, nous avons effectué l'essai d'absorption d'eau par immersion conformément à la norme NBN B 15-215[67] sur des éprouvettes cubiques (100x100x100mm) âgées de 14 jours pour chaque béton.

L'absorption d'eau par immersion Abs est exprimée en pourcent de la masse sèche, Abs est calculée par la relation suivante :

$$\text{Abs (\%)} = 100 \times (\mathbf{M}_{\text{humide}} - \mathbf{M}_{\text{sèche}}) / \mathbf{M}_{\text{sèche}}$$

Avec :

$\mathbf{M}_{\text{humide}}$: la masse humide constante de l'éprouvette après immersion.

$\mathbf{M}_{\text{sèche}}$: la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve et avant humidification.



Figure 3.15 : L'Essai de de porosité

3.8.6 Essai d'absorption capillaire

Cet essai a été choisi car il permet d'obtenir, en complément de l'essai de perméabilité, des mesures quantitatives sur la structure poreuse d'un béton. L'essai est réalisé conformément à la norme belge NBN B 15-217[68] sur des éprouvettes cubique (100x100x100mm³). Le résultat est la moyenne de la mesure sur trois éprouvettes testées pour chaque composition.

Après séchage, l'éprouvette de béton est posée sur sa base sur des cales d'au moins 1 cm d'épaisseur, dans un bac où le niveau d'eau est maintenu constant (environ 4 à 6 mm au-dessus de la base de l'éprouvette) pendant toute la durée d'essai (72 heures). Les éprouvettes sont soumises à une absorption d'eau unidirectionnelle.

À 3, 6, 24 et 72 h, l'éprouvette est essuyée rapidement avec un chiffon humide, pesée puis replacé dans les mêmes conditions. Le gain de masse et le temps écoulé depuis le début de la remontée capillaire sont notés.



Figure 3.16 : Essai d'absorption capillaire

Chapitre 4

Résultats Et Interprétation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre les résultats des différents essais sur les granulats naturels, les granulats recyclés ainsi que sur les bétons élaborés seront présentés et discutés de façon à mettre en évidence les caractéristiques et comportements spécifiques des granulats et des bétons.

4.2 Granulats

4.2.1 Analyse granulométrique

L'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité, car la résistance et l'ouvrabilité du béton dépendent essentiellement du granulat.

Les distributions granulométriques des GN et des GBR des deux fractions utilisées (8/15, 15/25) sont illustrées dans les Figure 4.1 et Figure 4.2

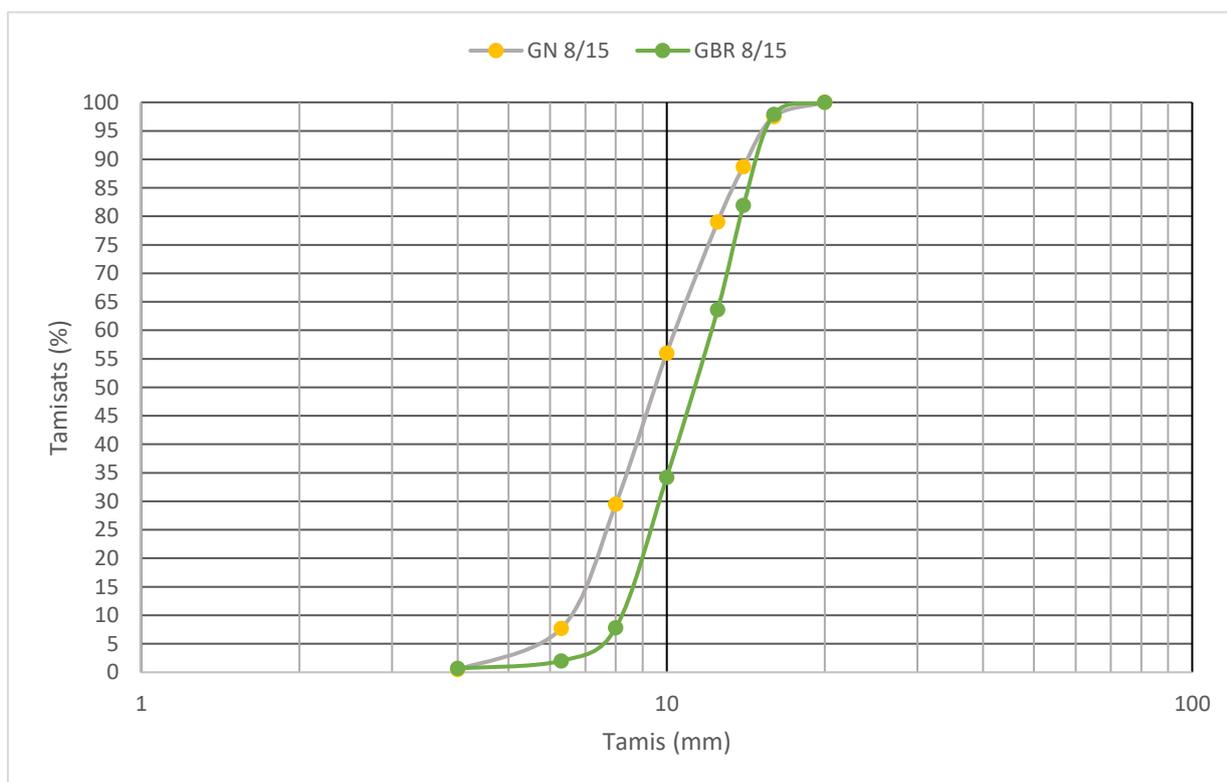


Figure 4.1 : Courbes granulométriques des granulats (8/15) naturels (GN) et de bétons recyclés (GBR)

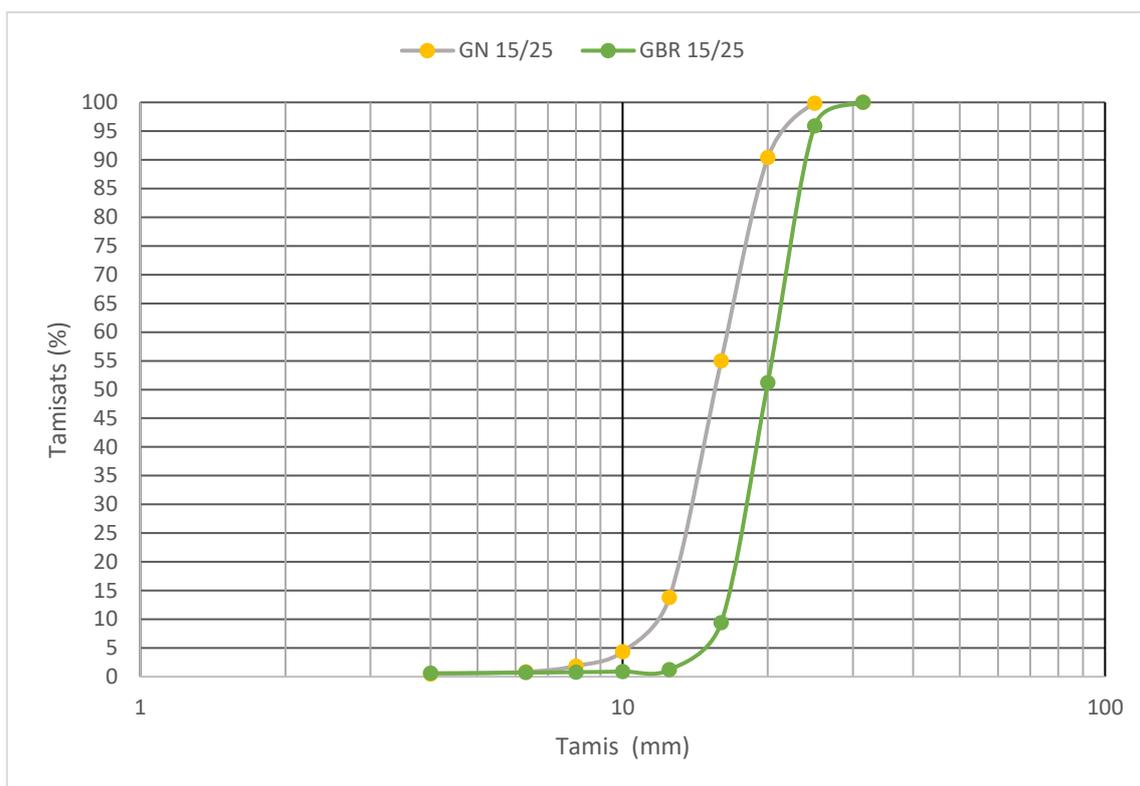


Figure 4.2 : Courbes granulométriques des granulats (15/25) naturels (GN) et recyclés (GBR)

Les détails des Analyse granulométrique concernant les granulats recyclés sont présentés dans l’annexe B.

D’après les courbes granulométriques les GBR sont plus grossières que les GN.

On détermine les coefficients D10, D30, et D60, à partir des courbes granulométriques.

L’interprétation des coefficient d’uniformité et de courbure sont résumées dans les tableaux suivant

Tableau 4 - 1 : Les caractéristiques granulométrique

Fraction	GN		GBR	
	8/15	15/25	8/15	15/25
D10	6.5	12.5	8.1	16.875
D30	8.1	15	9.8	18.75
D60	10	17.5	12.5	21
Cc	1.01	1.03	0.95	0.99
Cu	1.54	1.4	1.54	1.24

Tableau 4 - 2 : Présentation des caractéristiques granulométrique

		Coefficient de courbure		Coefficient d'uniformité	
		Granulométrie bien graduée $1 < C_c < 3$	Granulométrie Mal graduée $C_c < 1, C_c > 3$	Granulométrie Serrée $C_u < 2$	Granulométrie Etalée $C_u > 2$
Les fractions 8/15	Natures GN	X		X	
	GBR		X	X	
Graviers 15/25	Natures GN	X		X	
	GBR		X	X	

Les deux échantillons des (GBR) sont mal gradués cela signifie une absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D10 et D60. Par contre toutes les fractions des granulats sont uniformes ou serrées.

4.2.2 Formes des grains et coefficient d'aplatissement

A l'œil nu, on constate que La texture des particules de gros granulats recyclés est enrobée d'une couche non négligeable de pâte de mortier ancien, et dans plusieurs cas, la particule de granulats est simplement un ensemble de granulats plus petits liés par la pâte de mortier ancien.



Figure 4.3 : Exemple d'une particule de GBR 15-25

Selon les résultats de mesure de coefficient d'aplatissement on constate que les GBR sont plus plat que les GN, néanmoins, il n'y a qu'une différence de l'ordre de 10% dans le coefficient d'aplatissement (A) entre les GN et les GBR, ce qui signifie que ces derniers reste conforme aux limites fixées par la norme NF EN 933-3 [59].

Les détails des coefficients d'aplatissement des granulats utilisés sont dans l'annexe C.

Tableau 4 - 3 : Coefficient d'aplatissement (A) des granulats utilisés

	Fraction 8/15		Fraction 15/25	
	GN	GBR	GN	GBR
A(%)	8.31	8.8	7.1	7.6

Les coefficients d'aplatissement (A) des GBR sont plus importants que ceux des GN. Cette augmentation est de 17% et 15% pour les fractions 8/15 et 15/25 respectivement. Malgré cette différence, ces coefficients restent de l'ordre de 10%, tout en étant conforme à la limite préconisée par la norme NF EN 933-3 qui est fixe à 15%.

Les résultats trouvés dans la littérature sont beaucoup plus importants de l'ordre de 20% [74] indiquant que les GBR ont des coefficients d'aplatissement qui ne respectant pas les spécifications exigées. Cette différence peut être expliquée par la méthode de concassage utilisée, différente de celle évoquée dans la littérature. On effet, nous avons concassé le béton à la main à l'aide d'un marteau, en revanche, la plupart des chercheurs ont utilisé des GBR obtenus par concassage mécanique moyennant des concasseurs à mâchoires.

4.2.3 Masses volumiques

Les résultats trouvés sont présentés dans la figure 4.4 et figure 4.5

On remarque que les masses volumiques des granulats recyclés sont plus faibles que celles des granulats naturels utilisés. La masse volumique absolue a conduit à une diminution de 8.40% entre les GBR et les GN de la fraction 15/25 et de 7.2% pour la fraction 8/15.

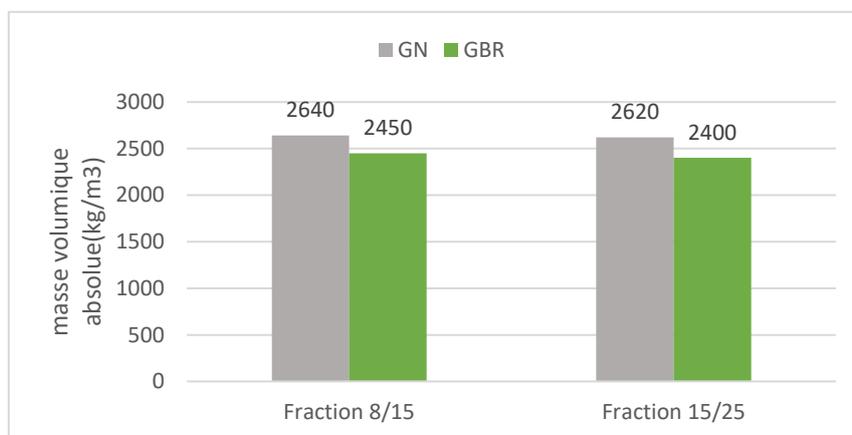


Figure 4.4 : Masses volumiques absolues des granulats utilisées

De même, pour la masse volumique en vrac, on constate une diminution de %24.60 entre les GBR et les GN de la fraction 15/25, et de %11.76 pour la fraction 8/15.

Ces résultats sont similaires aux résultats trouvés dans la littérature [17]. Cette chute de masse volumique des GBR est due à la pâte de mortier ancien qui recouvre les particules et principalement à sa faible densité, nous pouvons également remarquer que la baisse est plus importante dans la masse volumique en vrac, ce qui peut être expliqué par la forme irrégulière des GBR et leur porosité élevée.

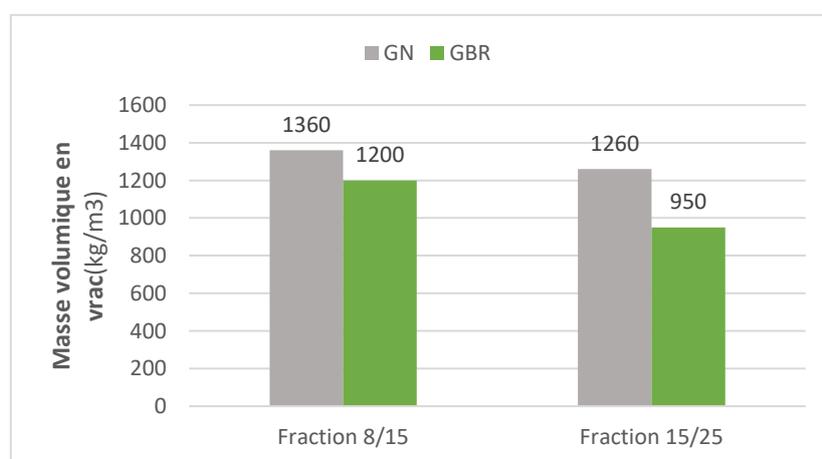


Figure 4.5 : Masses volumiques en vrac des granulats utilisées

4.2.4 Taux d'absorption d'eau

Les résultats sont récapitulés sur la figure 4.6.



Figure 4.6 : Taux d'absorption d'eau des granulats utilisés

Les résultats présentés dans la figure 4.6 montrent que le taux d'absorption d'eau des GBR est beaucoup plus important que celui du GN. Effectivement les granulats recyclés ont pratiquement une absorption six fois plus importante que celle des granulats naturels. Cette augmentation est due à la présence de la pâte de mortier ancien attaché aux granulats primaires (naturels), à sa porosité élevée, et à la présence des fissurations dans les GBR due aux concassages.

Par ailleurs On remarque que le taux d'absorption est plus important pour les granulats recyclés 8/15 (5.18%) en comparaison avec la fraction 15/25 (4.45%). Cette augmentation de 16% est éventuellement due à la teneur en pâte de mortier ancien plus élevée. A rappeler que la teneur en pâte de mortier ancien augmente avec la diminution de Dmax selon plusieurs études [17][13] et de ce fait, elle est plus importante pour la fraction 8/15.

La valeur d'absorption d'eau des GBR 15/25 reste tolérable au regard des limites (5%) exigées par différentes normes mais les GBR 8/15 dépasse légèrement cette limite.

A l'issu de ces résultats, les GBR nécessitent alors un pré-mouillage avant le malaxage des bétons afin de ne pas diminuer l'ouvrabilité de béton élaboré.

4.2.5 L'essai Los Angeles

Les résultats trouvés sont présentés dans la figure 4.7 et les détails sont rapporté dans l'annexe D.

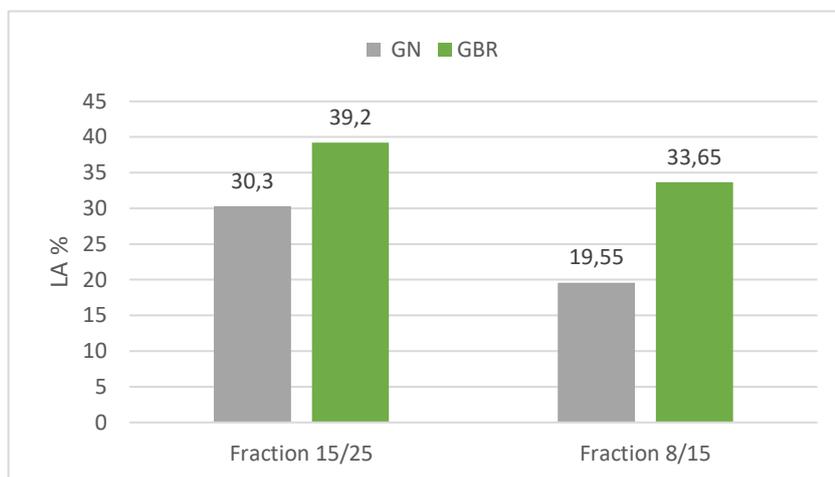


Figure 4.7 : Coefficients Los-Angeles des granulats utilisés

D'après les résultats obtenus, les GN présentent de bonnes résistances de dureté (choc et Usure), tandis que les GBR présentent de faibles résistances.

La différence de coefficient LA varie dans un intervalle de 8.9% et 14.1%. On remarque une chute de dureté d'environ 11.5 % par rapport aux GN. La pâte de ciment de l'ancien mortier qui recouvre la surface des GBR peut être à l'origine de cette différence de dureté. Les granulats recyclés ont subi des fragmentations qui ont conduit à leur altération et développement des fissures. Ajouter à cela, que l'âge des éléments concassés poutre (2003) et éprouvettes (2017) dont les performances ne peuvent être que moindres avec la vieillissement de béton.

Toutefois, selon la norme utilisée NF P18-650-2[60] la limite est à 40 % donc les GBR restent acceptables (35.5% en moyenne).

4.3 Béton frais

4.3.1 Ouvrabilité et densité

Nous avons effectué l'essai d'affaissement au cône d'Abrams sur le béton frais et mesuré sa masse volumique. Les mélanges ont été réalisés pour obtenir un béton plastique à avec un affaissement de 9 cm, les résultats trouvés sont présentés dans la figure 4.8

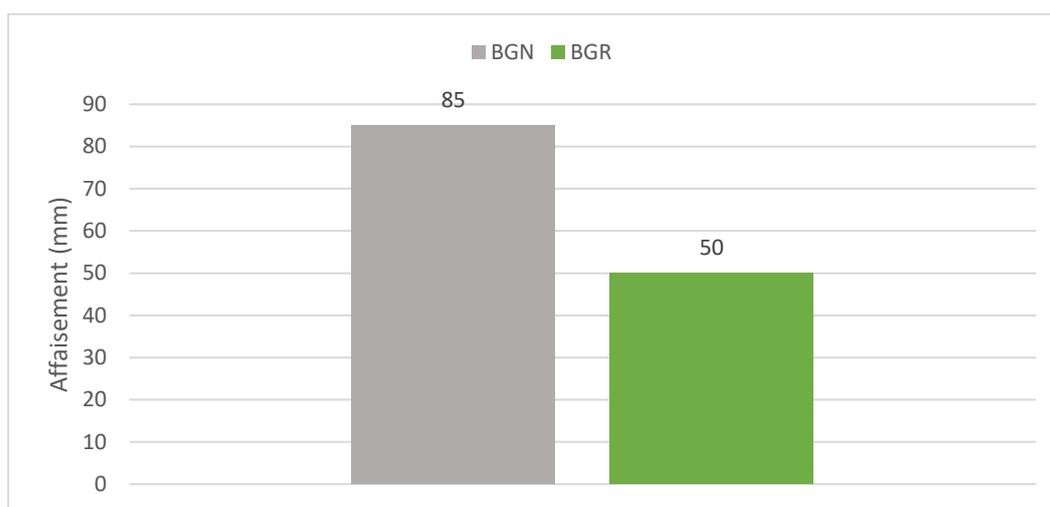


Figure 4.8 : Affaissement des bétons réalisés

On remarque une perte d'ouvrabilité très importante d'environ 40 % entre le BGR et le BGN, On peut dire que ce résultat était attendu en raison de taux d'absorption élevé des granulats recyclés. Nous avons observé une demande en eau supplémentaire lors de la confection du BGR à cause de l'absorption d'eau de gâchage par les granulats recyclés. La chute d'ouvrabilité est également causée par la forme aplatie et la texture de surface des GBR [24].

Une compensation de l'absorption d'eau est nécessaire pour garder le même affaissement d'un béton fabriqué à partir de GN. Différentes techniques de pré-saturation ont été proposées par plusieurs chercheurs [24][30], et ils ont montré des résultats satisfaisants. Ces techniques sont basées sur le pré-mouillage des GBR durant différentes périodes.

On remarque également que la masse volumique du BGR regroupée dans le tableau est inférieure à celle du BGN et ceux-ci est due à la légèreté des GBR par rapport aux GN comme indiqué précédemment sur la figure 4.4.

Tableau 4 - 4 : Masses volumiques mesurées des bétons réalisés

	$\rho_{\text{réel}}$ (kg/m ³)
BGN	2330.10
BGR	2235.35

4.4 Béton Durci

4.4.1 Résistance à la compression

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau 4.5 et la figure 4.9.

Tableau 4 - 5 : Résistance à la compression des bétons réalisés

	Poids (g)	Contrainte de compression (MPa)		% de baisse
BGN (7 jrs)	8298.2	24.68	25.20	13.38
	8220.7	25.71		
BGR (7 jrs)	7900	23.67	21.83	
	7835	19.98		
BGN (14 jrs)	8255	27.39	28.41	11.95
	8260	29.43		
BGR (14 jrs)	7940	24.28	25.01	
	8140	25.73		

Les résistances moyenne à la compression à 28 jours ont été évaluées par la formule recommandée par BAEL :

$$f_{cj} = \frac{j \cdot f_{c28}}{(4,76 + 0,83j)}$$

Avec j : le temps par jour.

f_{c28} : la résistance à 28 jour.

f_{cj} : la résistance à jour j .

On remarque que La chute de résistance entre le BGR et le BGN est d'environ 10%, ce résultat est similaire aux résultats trouvés ailleurs cas de remplacement totale de gros granulats naturels par de gros granulats recyclés [1] (>5 mm).

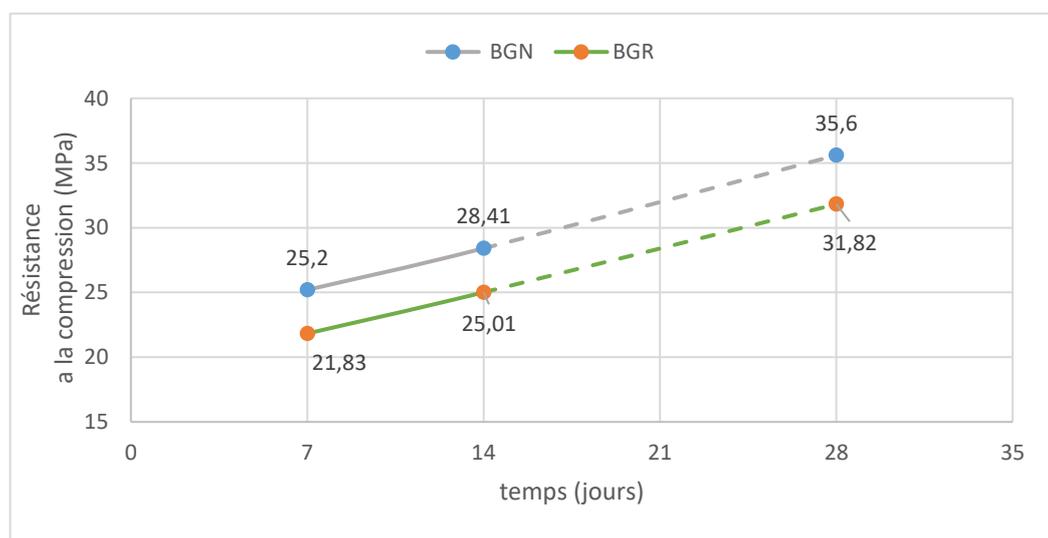


Figure 4.9 : Résistance à la compression des bétons réalisés

Trois raisons sont évoquées pour expliquer la baisse de résistance des BGR :

- l'absorption élevée d'eau des granulats recyclés due à la pâte de mortier ancien qui recouvre les granulats naturels qui va absorber l'eau de gâchage et limiter l'hydratation de la pâte de ciment,
- la résistance faible des granulats recyclés à cause des fissurations et la porosité élevée,
- Les surfaces de fissuration suivent le plus souvent le contour des gros granulats recyclés, la rupture des BGR s'effectue ainsi dans la pâte de mortier ancien attachée aux GBR, contrairement aux BGN où la rupture s'effectue aux interfaces pate-granulats [28]. De ce fait l'auréole de transition constitue le maillon faible de la matrice de BGR. Le mortier ancien qui recouvre les granulats est à l'origine de cette fragilité.

A titre indicatif les valeurs de la résistance à la compression équivalente des éprouvettes cylindriques sont données dans le tableau 4.6 calculé à partir des résultats obtenus sur éprouvettes cubiques (150x150x150mm³)

Tableau 4 - 6 : Valeurs de la résistance à la compression équivalentes pour des éprouvettes cylindriques

	7	14	28
BGN	20.16	22.73	28.48
BGR	17.46	20.01	25.46

À la lecture de ces valeurs, une résistance de 25.46 MPa reste intéressante et acceptable pour la réalisation de structure avec ce taux important de remplacement.

4.4.2 Résistance à la traction par fendage

Les résistances moyenne à la traction par fendage de deux éprouvettes cylindriques (Ø160mm et L 320 mm) âgées de 7 et 14 jours, sont présentées dans le tableau 4.7

Tableau 4 - 7 : Résistance en traction des bétons réalisés

	Poids (g)	Contrainte de traction (MPa)		% de baisse
BGN (7 jrs)	15245	2.37	2.18	35.8
	15160	1.98		
BGR (7 jrs)	14745	1.28	1.40	
	14900	1.51		
BGN (14 jrs)	15335	2.41	2.58	17.4
	15320	2.75		
BGR (14 jrs)	14910	2.44	2.13	
	14995	1.82		

On remarque que les pourcentages de chute des résultats obtenus par l'essai de la résistance à la traction par fendage sont plus élevés que ceux de la compression.

Les résistances moyenne à la traction par fendage à 28 jours ont été évaluées par la formule suivante recommandée par BAEL :

$$R_{tj} = 0.6 + 0.06 R_{Cj}$$

Avec R_{Cj} : Résistance à la compression

La résistance en traction de BGR présente une chute significative variant de 17% à 25% en moyenne, par rapport à le BGN, ces résultats se rapprochent des résultats trouvés dans la littérature [1].

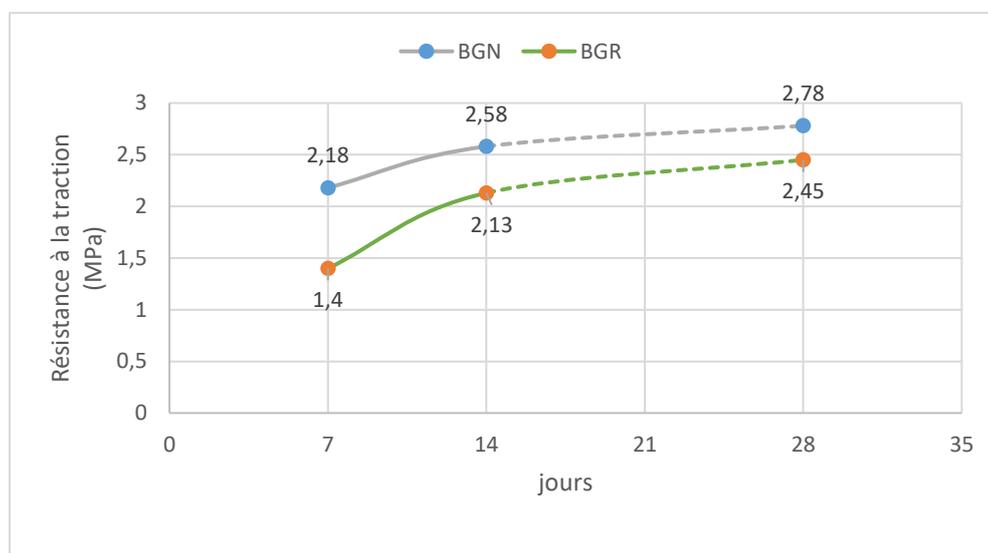


Figure 4.10 : Résistance à la traction par fendage des bétons réalisés

On remarque qu'à jeune âge le BGR présente une faible résistance, avec une différence de 35.8% entre les deux bétons mais à 14 jours l'écart est plus petit 17.4%.

On peut expliquer cette diminution par les microfissures trouvées dans les GBR et la forme angulaire et moins cubique de ces granulats [26]. De plus, des chercheurs ont trouvé une corrélation entre la porosité de BGR et sa résistance à la traction [16], ce qui peut aussi expliquer cette baisse.

4.4.3 Perméabilité à l'eau

La résistance des bétons n'est pas seulement mécanique mais aussi physique et chimique, leur durabilité ne peut être assurée que s'ils sont suffisamment imperméables à la pénétration d'agents agressifs extérieurs.

Les résultats obtenus des essais de la perméabilité à l'eau sur les BGN et les BGR sont illustre sur la figure 4.11.

Il faut mentionner que les essais ont été effectués sur un béton de 14 jours, où les normes spécifient un âge de 28 jours [66].

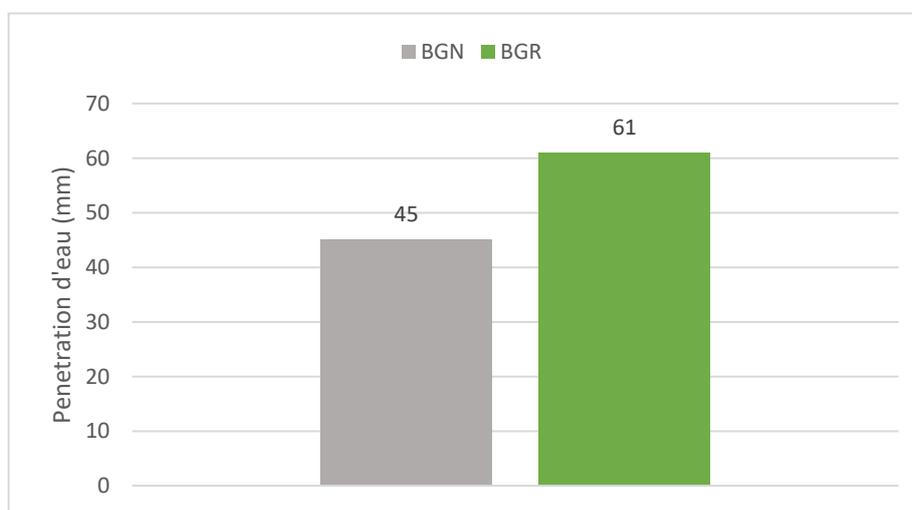


Figure 4.11 : Pénétration d'eau des bétons réalisés

On constate que la pénétration d'eau du BGR (61mm) est supérieure à celle du BGN(45mm) d'environ 30%. La pénétration d'eau de GBR est élevée étant donné que la limite donnée par la norme EHE-8 est de 50 mm [75], ce qui signifie que le BGR est perméable par rapport au BGN, ces résultats peuvent être expliqués par l'absorption élevée des GBR qui indique une porosité plus important. Ajouter à cela la fragilité et l'état fissuré de l'ancien mortier attaché au GBR, la présence d'une plus grande quantité de pores, des fissures et des fissures sur le mortier attaché dans les GBR pendant la production.

Ce qui signifie que la durabilité du BGR, confectionné avec le même rapport E/C, est inférieure à celle du BGN. Il convient également de noter qu'à jeune âge, le comportement des granulats a une plus grande influence sur la perméabilité du BGR à

cause du taux d'hydratation faible de la pâte de ciment, ce qui signifie que théoriquement la différence entre les deux résultats va diminuer avec le temps.

Selon l'étude réalisée par Thomas et al [51] sur la profondeur et la porosité de pénétration de l'eau, il semble recommandable de diminuer de 0,1 le rapport E/C pour les bétons à 100% de GBR, par rapport aux BGN pour maintenir la même perméabilité.

4.4.4 Porosité et absorption d'eau par immersion

Les résultats obtenus d'essai d'absorption d'eau par immersion sont présentés dans le tableau 4.8 et la figure 4.12

Tableau 4 - 8 : Absorption d'eau et Porosité des bétons réalisés

	Abs moyenne (%)	Masse humide moyenne(g)	Masse sèche moyenne(g)	Masse spécifique sèche (kg/dm ³)
BGN	5	2504.06	2385.6	2.385
BGR	7.81	2316.26	2149.2	2.149

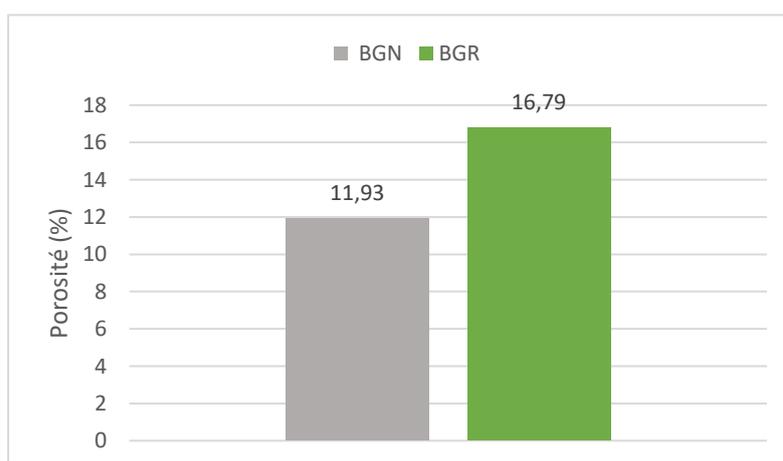


Figure 4.12 : Porosité des bétons réalisés

Selon les résultats obtenus, le BGR présente une augmentation de porosité d'environ 30% par rapport au BGN. Cette porosité est principalement due à la forte absorption d'eau du GBR.

La porosité a une influence sur les différents résultats obtenus dans la compression, traction et aussi la perméabilité.

Il faut ajouter que les études de durabilité se font au-delà de 28 jours. Mais à ce jeune âge la formation de gel dans notre béton n'a pas atteint un pourcentage élevé (hydratation de la pâte de ciment n'est pas complète)

À titre explicatif concernant la porosité de BGR, il y'a environ 168 mm^3 de vide internes dans un volume de 1000 mm^3 , cette porosité élevée du BGR constitue une menace face aux pénétration des agents agressifs sous formes gazeuse et liquide.

4.4.5 Absorption capillaire

Les résultats d'absorption qui sont présentés, obtenus sur des éprouvettes en contact avec une nappe d'eau de 5 mm, représentent effectivement l'état de porosité des premiers millimètres de l'éprouvette. C'est en effet la porosité de ces quelques premiers millimètres qui gouverne la pénétration des agents agressifs et constituent les chemins privilégiés pour la pénétration des fluides gazeux et liquides. Ceux-ci migrent d'autant plus facilement lorsque la porosité et la vitesse d'absorption sont élevées.

L'évolution de l'absorption d'eau par capillarité dans le temps des différents bétons réalisés, est représentée dans la figure 4.13.

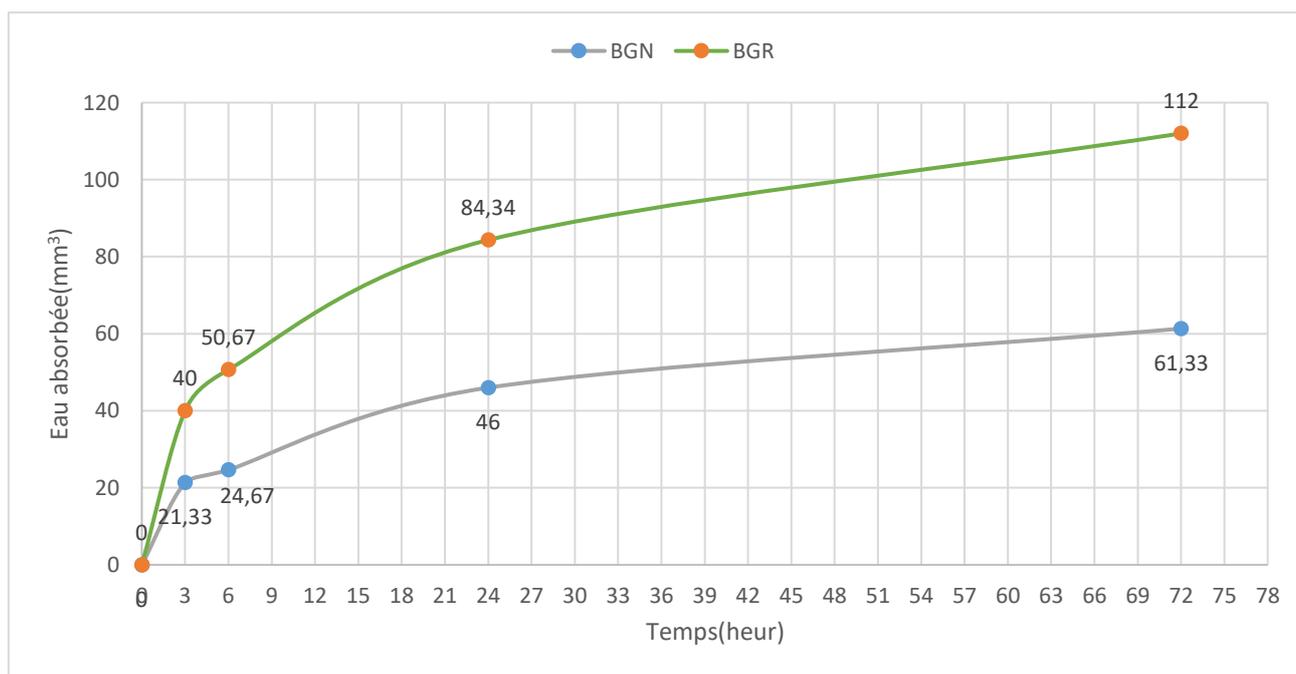


Figure 4.13 : Absorption d'eau par capillarité en fonction du temps des différents bétons réalisés.

On remarque que l'absorption capillaire du BGR est d'environ 84.4% plus importante que celle du BGN, cela est dû au pourcentage élevé de GBR et, surtout, à leur grande capacité d'absorption d'eau.

Conclusion Générale Et Perspectives

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier la possibilité d'utiliser des granulats issus de la démolition et des déchets d'ancien béton dans la formulation d'un nouveau béton et d'étudier son comportement.

En Algérie, chaque année une quantité importante de déchets de construction et de démolition est générée, et seulement une petite partie est recyclée. Cette valorisation est essentiellement orientée vers leur usage comme des matériaux destinés à des applications non structurelles. La valorisation de ces déchets permet de prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes, réduction de coût de transport et des émissions de CO₂ associées, sachant que les centres de recyclage sont plus proche des villes que les carrières. L'utilisation de ces déchets de démolition signifie également une évolution vers une économie circulaire qui pourrait apporter des avantages tels que la protection de l'environnement par la réduction des déchets et stimuler la croissance économique.

À partir des résultats expérimentaux que nous avons obtenus et la recherche bibliographique que nous avons fait, nous pouvons conclure les points suivants :

- La granularité des granulats est influencée par leur méthode d'élaboration.
- Les granulats bétons recyclés se distinguent des granulats naturels par deux particularités importante : La gangue de mortier qui reste attachée aux granulats naturels après concassage du béton et la présence d'impuretés (maçonnerie, matières organiques, argile).
- La présence de cette pâte de ciment adhéree aux granulats recyclés a conduit à une porosité plus élevée et une densité plus faible et qui, on peut dire, a affaibli toutes les propriétés des granulats.
- Les granulats recyclés sont plus anguleux et la texture de surface est poreuse et rugueuse en raison de l'existence d'anciens mortiers.
- Les granulats bétons recyclés ont une absorption beaucoup plus élevée que les granulats naturels à cause de pâte de ciment adhéree.
- La résistance à l'abrasion des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels mais les valeurs de coefficient los Angeles restent acceptables (35.5%) vis-à-vis la limite définie par la norme (40%)

Conclusion Générale et Perspective

- Les masses volumiques des bétons recyclés sont moins élevées que celles du béton ordinaire à cause de la légèreté des GBR
- En raison de l'absorption d'eau élevée des GBR, l'ouvrabilité de BGR diminue considérablement.
- Il est possible de minimiser ou de prévenir l'impact négatif des GBR sur les propriétés à l'état frais du béton en ajoutant une phase de pré-saturation partielle des granulats avant le malaxage.
- La chute de résistance à la compression entre le BGR et le BGN est d'environ 10%.
- La baisse de résistance des BGR est due à : l'absorption élevée d'eau des granulats recyclés qui va absorber l'eau de gâchage et limiter l'hydratation de la pâte de ciment, la résistance faible des granulats recyclés à cause des fissurations et la porosité élevée. La rupture des BGR s'effectue ainsi dans la pâte de mortier ancien attachée aux GBR, où l'auréole de transition constitue le maillon faible de la matrice de BGR.
- La résistance en traction de BGR présente une chute significative d'environ 26.6% par rapport à celle BGN.
- De manière similaire à celle de la résistance à la compression, la tendance générale est la diminution de la résistance à la traction du béton avec l'augmentation du pourcentage de remplacement de granulats recyclés
- La durabilité du BGR dépend de la porosité et l'absorption d'eau des GBR. Le BGR est plus perméable à l'eau et plus poreux, un tel béton est donc considéré plus vulnérable aux divers agents agressifs.

Perspectives

Les observations et l'analyse que nous avons effectuées dans le cadre de ce projet de fin d'étude nous a aidé à maîtriser certains aspects du sujet qui méritent la poursuite des recherches surtout en sachant que c'est un sujet d'actualité. Les recommandations et perspectives envisagés s'articulent autour des points suivants:

Conclusion Générale et Perspective

- Usage des granulats issus réellement de démolition des bâtiments est indispensable pour avoir des résultats représentatifs de l'utilisation industrielle et prendre en considération les impuretés.
- Des études enviro-économiques sur le marché algérien restent à faire.
- Variation du taux de substitution des GBR, car il a été constaté que la substitution totale peut avoir un impact négatif sur la durabilité.
- Variation du rapport E/C et utilisation des superplastifiant pour contrôler l'ouvrabilité du BGR.
- Analyser le comportement des éléments structuraux fabriqués en béton armé à base des granulats recyclés sous chargement statique et dynamique.
- Etude de différentes techniques de traitement des GBR afin d'améliorer la durabilité du BGR.
- Études de la possibilité d'usage de liant ternaire en incorporant de la poudre de verre dans le BGR, vu qu'elle améliore la durabilité.

Les recherches futures sur les bétons à base de granulats recyclés devraient continuer à être menées, de telle sorte que les principales caractéristiques de ce type de matériau puissent être bien comprises et des critères soient de plus en plus clairs pour l'utilisation appropriée de ces granulats comme sources de matériaux dans les structures en béton.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] J. De Brito and N. Saikia, *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] A. Coelho, “Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW),” in *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, Elsevier, 2013, pp. 141–185.
- [3] Sathya Prakash. Methods of Demolition of Building Structures[enligne][Consulté le 19/04/2020]. Disponible à l’adresse : <https://www.civilengineeringnews.tk/2014/07/methods-of-demolition-of-building.html>.
- [4] M. Quebaud, “Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats,” 1996.
- [5] D. Canela and H. Chevet, “Le recyclage-concassage des matériaux minéraux issus de la démolition en Belgique et au Royaume Uni,” *Cahiers du Centre scientifique et technique du bâtiment*, vol. 360, no. 2814, 1995.
- [6] Y. Kasai, *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Reuse of demolition waste*, vol. 2. Routledge, 1988.
- [7] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 598–614, 2017.
- [8] T. C. Hansen, “Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985,” *Materials and structures*, vol. 19, no. 3, pp. 201–246, 1986.
- [9] J. Xiao, “Recycled aggregate concrete,” in *Recycled aggregate concrete structures*, Springer, 2018, pp. 65–98.
- [10] L. Butler, “Evaluation of recycled concrete aggregate performance in structural concrete,” 2012.
- [11] M. Pepe, *A conceptual model for designing recycled aggregate concrete for structural applications*. Springer, 2015.
- [12] T. C. Hansen and H. Narud, “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate,” *Concrete international*, vol. 5, no. 1, pp. 79–83, 1983.

Bibliographie

- [13] G. Bai, C. Zhu, C. Liu, and B. Liu, “An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 240, p. 117978, 2020.
- [14] P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing, 2006.
- [15] R. M. Salem, E. G. Burdette, and N. M. Jackson, “Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete,” *Materials Journal*, vol. 100, no. 3, pp. 216–221, 2003.
- [16] T. C. Hansen, “Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985,” *Materials and structures*, vol. 19, no. 3, pp. 201–246, 1986.
- [17] L. Ferreira, J. De Brito, and M. Barra, “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 63, no. 8, pp. 617–627, 2011.
- [18] F. de Larrard and H. Colina, *Concrete Recycling: Research and Practice*. CRC Press, 2019.
- [19] E. Wirquin, R. Hadjieva-Zaharieva, and F. Buyle-Bodin, “Utilisation de l’absorption d’eau des bétons comme critères de leur durabilité—Application aux bétons de granulats recyclés,” *Materials and structures*, vol. 33, no. 6, p. 403, 2000.
- [20] T. Hanson, “Recycling of demolished concrete and masonry,” *London: E & FN Spon*, 1992.
- [21] M. Tavakoli and P. Soroushian, “Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate,” *Materials Journal*, vol. 93, no. 2, pp. 178–181, 1996.
- [22] J. Vieira, J. Correia, and J. De Brito, “Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 5, pp. 533–541, 2011.
- [23] Concrete Permanent Commission, “Instrucción Del Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code),” *Spanish Minister of Public Works: Madrid, Spain*, 2008.
- [24] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, and E. Wirquin, “Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 2, pp. 223–232, 2003.

Bibliographie

- [25] C.-S. Poon and D. Chan, “Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 164–175, 2007.
- [26] M. Etxeberria, A. R. Marí, and E. Vázquez, “Recycled aggregate concrete as structural material,” *Materials and structures*, vol. 40, no. 5, pp. 529–541, 2007.
- [27] M. B. de Oliveira and E. Vazquez, “The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete,” *Waste management*, vol. 16, no. 1–3, pp. 113–117, 1996.
- [28] V. W. Tam, C. M. Tam, and Y. Wang, “Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 10, pp. 1928–1939, 2007.
- [29] N. Otsuki, S. Miyazato, and W. Yodsudjai, “Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete,” *Journal of materials in civil engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 443–451, 2003.
- [30] Y. Liang, Z. Ye, F. Vernerey, and Y. Xi, “Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 5, p. 04014163, 2015.
- [31] J. Xiao, “Recycled aggregate concrete,” in *Recycled aggregate concrete structures*, Springer, 2018, pp. 65–98.
- [32] M. C. Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai, *Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete*. Springer, 2019.
- [33] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, “Microstructure and properties of hardened concrete,” *Concrete: Microstructure, properties and materials*, pp. 41–80, 2006.
- [34] F. Buyle-Bodin and R. Hadjieva-Zaharieva, “Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete,” *Materials and Structures*, vol. 35, no. 8, pp. 504–509, 2002.
- [35] I. B. Topcu, “Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete,” *Cement and concrete research*, vol. 27, no. 12, pp. 1817–1823, 1997.
- [36] A. Khan, “Recycled concrete—a source for new aggregate,” *Cement, concrete and aggregates*, vol. 6, no. 1, pp. 17–27, 1984.
- [37] T. Mukai and M. Kikuchi, “Studies on utilization of recycled concrete for structural members (Part 1, Part 2),” 1978, pp. 85–86.

Bibliographie

- [38] K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, and A. H. Taylor, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate," *Cement and concrete research*, vol. 31, no. 5, pp. 707–712, 2001.
- [39] J. Lavado, J. Bogas, J. de Brito, and A. Hawreen, "Fresh properties of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 233, p. 117322, 2020.
- [40] K. S. Chia and M. H. Zhang, "Effect of chemical admixtures on rheological parameters and stability of fresh lightweight aggregate concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 56, no. 8, pp. 465–473, 2004.
- [41] J. M. Gómez-Soberón, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study," *Cement and concrete research*, vol. 32, no. 8, pp. 1301–1311, 2002.
- [42] A. Katz, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete," *Cement and concrete research*, vol. 33, no. 5, pp. 703–711, 2003.
- [43] N. K. Bairagi, K. Ravande, and V. K. Pareek, "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates," *Resources, conservation and recycling*, vol. 9, no. 1–2, pp. 109–126, 1993.
- [44] K.-H. Yang, H.-S. Chung, and A. F. Ashour, "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.," 2008.
- [45] S. Frondistou-Yannas, "Waste concrete as aggregate for new concrete," in *Journal Proceedings*, 1977, vol. 74, no. 8, pp. 373–376.
- [46] A. Domingo, C. Lázaro, F. L. Gayarre, M. A. Serrano, and C. Lopez-Colina, "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete," *Materials and Structures*, vol. 43, no. 8, pp. 1147–1160, 2010.
- [47] M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review," *Construction and building materials*, vol. 68, pp. 501–516, 2014.
- [48] S. Kou, C. Poon, and F. Agrela, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 8, pp. 788–795, 2011.
- [49] M. C. Limbachiya, "Recycled aggregates: Production, properties and value-added sustainable applications," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 25, no. 6, pp. 1011–1016, 2010.

Bibliographie

- [50] J. M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate,” *Cement and concrete research*, vol. 35, no. 4, pp. 763–769, 2005.
- [51] C. Thomas, J. Setién, Ja. Polanco, P. Alaejos, and M. S. De Juan, “Durability of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1054–1065, 2013.
- [52] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 565–573, 2012.
- [53] V. M. Malhotra, “Recycled concrete—a new aggregate,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 42–52, 1978.
- [54] A. Richardson, K. Coventry, and J. Bacon, “Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 2–3, pp. 272–277, 2011.
- [55] S. T. Yildirim, C. Meyer, and S. Herfellner, “Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 91, pp. 288–296, 2015.
- [56] J. Xiao, D. Lu, and J. Ying, “Durability of recycled aggregate concrete: an overview,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 11, no. 12, pp. 347–359, 2013.
- [57] K. Liu, J. Yan, Q. Hu, Y. Sun, and C. Zou, “Effects of parent concrete and mixing method on the resistance to freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 264–273, 2016.
- [58] AFNOR . Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1” NF EN 933-1. Paris 2012.
- [59] AFNOR, . Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3. NF EN 933-3.Paris 2012.
- [60] AFNOR, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats–Partie2. NF P18-650-2. Paris 2010.
- [61] AFNOR, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats–Partie 6 .NF P18-650-6. Paris 2010.
- [62] AFNOR.Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats–Partie3NF P18-650-3. Paris 1998 .
- [63] AFNOR, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats–Partie8:évaluation des fines–Équivalent de sable NF P18-622-8. Paris 1999 .

Bibliographie

- [64] AFNOR. Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.NF EN 12390-3.Paris 2019.
- [65] AFNOR. Essais pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes.NF EN 12390-6. Paris 2012.
- [66] AFNOR. Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression. NF EN 12390-8. Paris 2012.
- [67] NBN, B 15-215 Essais des bétons –Absorption d'eau par immersion. 1969.
- [68] NBN, B 15-217. Essais des bétons - Absorption d'eau par capillarité .1964 .
- [69] G. Dreux and J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Eyrolles, 1998.
- [70] AFNOR, Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUPNF P 18-451. Paris 2018.
- [71] AFNOR. Béton - Spécification, performance, production et conformité NF EN 206. Paris 2014.
- [72] AFNOR. Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai. NF EN 12390-4. Paris 2010.
- [73] German Institute for Standardisation. TESTING CONCRETE - TESTING OF HARDENED CONCRETE. DIN 1048 .Germany 1998.
- 74] R. Hadjieva-Zaharieva, “Durabilité des bétons à base de granulats recyclés,” Artois, 1998.
- [75] M. Martín-Morales, M. Zamorano, A. Ruiz-Moyano, and I. Valverde-Espinosa, “Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08,” *Construction and building materials*, vol. 25, no. 2, pp. 742–748, 2011.

Annexes

Annexe A

Les tableaux suivants représentent les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les granulats naturels

Annexe A.1 : Analyse granulométrique des granulats naturels (Sable de dunes)

Module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis (g)	Refus cumules de chaque tamis (g)	Refus cumules (%)	Tamisat cumules (%)
38	5	0	0	0	100
35	2.500	0	0	0	100
32	1.250	0	0	0	100
29	0.630	0	0	0	100
26	0.315	5.7	5.7	1.9	98.1
23	0.160	169.4	175.1	58.4	41.63
20	0.080	93.7	268.8	89.6	10.4
	Fond	17.4	286.2	95.4	4.6
	Somme	286.2			
	Perte	13.8			
					Mf=0.603

Annexe A.2 : Analyse granulométrique des granulats naturels (Sable 0/5)

Module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis (g)	Refus cumules de chaque tamis (g)	Refus cumules (%)	Tamisat cumules (%)
38	5	2.3	2.3	0.8	99.2
35	2.500	86.7	89	29.7	70.3
32	1.250	87.1	176.1	58.7	41.3
29	0.630	53.4	229.5	76.5	23.5
26	0.315	31.3	260.8	86.9	13.1
23	0.160	20.4	281.2	93.7	6.3
20	0.080	13	294.2	98.1	1.9
	Fond	5.1	299.3	99.8	0.2
	Somme	299.3			
	Perte	0.7			
					Mf = 3.463

Annexe A.3 : Analyse granulométrique des granulats naturels (Sable corrigé)

Module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis pour sable de dune(g)	La masse des refus pour chaque tamis pour le sable 0/5 (g)	Les masse des refus pour chaque tamis des deux sables(g)	Tamisat cumules (%)
38	5	0	1.55	1.55	99.48
35	2.500	0	58.44	58.44	80
32	1.250	0	58.71	58.71	60.43
29	0.630	0	35.99	35.99	49.23
26	0.315	1.86	21.10	22.95	41.58
23	0.160	55.22	13.75	68.97	18.58
20	0.080	30.55	8.76	39.31	5.75
	Fond	5.67	3.44	9.11	2.48
					Mf = 2.50

La Correction du module de finesse :

La Correction du module de finesse :

$$S_1 = \frac{2.5 - 0.6}{3.46 - 0.6} = 67.4 \%$$

$$S_2 = \frac{3.46 - 2.5}{3.46 - 0.6} = 32.6 \%$$

Avec : $MS_1 = 3.46$ S_1 : sable 0/5

$MS_2 = 0.60$ S_2 : sable de dune

$M_{opt} = 2.50$

Annexe A.4 : Analyse granulométrique des granulats naturels (Gravier 8/15)

module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis (g)	Refus cumules de chaque tamis (g)	Refus cumules (%)	Tamisat cumules (%)
43	16	50	50	2.5	97.5
	14	175	225	11.3	88.7
42	12.5	195	420	21	79
41	10	460	880	44	56
40	8	530	1410	70.5	29.5
39	6.3	435	1845	92.3	7.7
37	4	145	1990	99.5	0.5
	Fond	0			
	somme	1990			
	perte	10			

Annexe A.5 : Analyse granulométrique des granulats naturels 15/25

module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis (g)	Refus cumules de chaque tamis (g)	Refus cumules (%)	Tamisat cumules (%)
45	25	7	7	0.14	99.86
44	20	475	482	9.64	90.36
43	16	1770	2252	45.04	54.96
42	12.5	2060	4312	86.24	13.76
41	10	470	4782	95.64	4.36
40	8	125	4907	98.14	1.86
39	6.3	50	4957	99.14	0.86
37	4	20	4977	99.54	0.46
	fond	0			
	somme	4977			
	perte	23			

Annexe B

Les tableaux suivants présentent les résultats de l'analyse granulométrique obtenus, pour les granulats recyclés

Annexe B.1 : Analyse granulométrique des granulats recyclés 8/15

module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis (g)	Refus cumules de chaque tamis (g)	Refus cumules (%)	Tamisat cumules (%)
43	16	105.5	105.5	2.1	97.9
	14	800.3	905.8	18.1	81.9
42	12.5	913.6	1819.4	36.4	63.6
41	10	1472.1	3291.5	65.8	34.2
40	8	1319.1	4610.6	92.2	7.8
39	6.3	291.2	4901.8	98.0	2
37	4	65.5	4967.3	99.3	0.7
	Fond	25.1	4992.4	99.8	0.2
	Somme	4992.4			
	Perte	7.6			

Annexe B.2 : Analyse granulométrique des granulats recyclés 15/25

module	Taille de la maille (mm)	La masse des refus pour chaque tamis (g)	Refus cumules de chaque tamis (g)	Refus cumules (%)	Tamisat cumules (%)
45	25	207.2	207.2	4.1	95.9
44	20	2233.4	2440.6	48.8	51.2
43	16	2087.4	4528.0	90.6	9.4
42	12.5	409.8	4937.8	98.8	1.2
41	10	20.0	4957.8	99.1	0.9
40	8	2.0	4959.8	99.2	0.8
39	6.3	4.2	4964.0	99.3	0.7
37	4	3.3	4967.3	99.4	0.6
	fond	14.2	4981.5	99.6	0.4
	somme	4981.5			
	perte	18.5			

Annexe C

Les tableaux suivants présentent les résultats des coefficients d'aplatissement, pour les granulats naturels et recyclés

Annexe C.1 : Détermination du coefficient d'aplatissement Granulats Normales 8/15

M0=1998.7 g				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles a fentre		
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (Ri) du granulats élémentaire di/Di (g)	Ecartement Nominal des fentes de la grille (mm)	Passant Sur une grille à fentes (mi) (g)	$A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$
16/20	128	10	13.4	10.5
12.5/16	679.3	8	52.8	7.8
10/12.5	529.4	6.3	36.4	6.9
8/10	391.1	5	36.2	9.3
6.3/8	216.8	4	22.5	10.4
5/6.3	38.5	3.15	3.6	9.4
4/5	3.2	2.5	0.3	9.4
M1 = somme Ri	1986.3	M2 = somme mi	165.2	/
$A = \frac{M2}{M1} \times 100 = 8.31$				

Annexe C.2 : Détermination du coefficient d'aplatissement Granulats Normales
15/25

M0= 1998.9 g				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles a fentre		
Granulat elementaire di/Di (mm)	Masse (Ri) du granulats elementaire di/Di (g)	Ecartement Nominal des fentes de la grille (mm)	Passant Sur une grille à fentes (mi) (g)	$A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$
25/31.5	0	16	0	0
20/25	834.1	12.5	54	6.5
16/20	1081.5	10	86.4	8
12.5/16	70.7	8	0	0
10/12.5	4.3	6.3	0	0
8/10	/	5	/	/
6.3/8	/	4	/	/
5/6.3	/	3.15	/	/
4/5	/	2.5	/	/
M1= somme Ri	1990.6	M2=somme mi	140.4	/
$A = \frac{M2}{M1} \times 100 = 7.1$				

Annexe C.3 : Détermination du coefficient d'aplatissement Granulats recyclés 8/15

M0 = 1999.6 g				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles a fentre		
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (Ri) du granulats élémentaire di/Di (g)	Ecartement Nominal des fentes de la grille (mm)	Passant Sur une grille à fentes (mi) (g)	$A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$
16/20	35	10	10	28.6
12.5/16	882	8	85	9.6
10/12.5	593	6.3	40	6.7
8/10	435	5	35	8.0
6.3/8	40	4	5	12.5
5/6.3	8	3.15	0.9	11.3
4/5	1.6	2.5	0.3	0.2
M1 = somme Ri	1994.6	M2 = somme mi	176.2	/
$A = \frac{M2}{M1} \times 100 = 8.8$				

Annexe C.4 : Détermination du coefficient d'aplatissement Granulats Recyclés
15/25

M0=2000g				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles a fentre		
Granulat elementaire di/Di (mm)	Masse (Ri) du granulats elementaire di/Di (g)	Ecartement Nominal des fentes de la grille (mm)	Passant Sur une grille à fentes (mi) (g)	$A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$
25/31.5	35	16	0	0
20/25	823	12.5	90	10.9
16/20	948	10	40	4.2
12.5/16	175	8	20	11.4
10/12.5	5	6.3	0	0
8/10	5.4	5	0.7	13
6.3/8	1.4	4	0.2	14.3
5/6.3	2.3	3.15	0.1	4.3
4/5	1.1	2.5	0.1	9.1
M1= somme Ri	1996.2	M2=somme mi	151.1	/
$A = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 7.6$				

Annexe D

Annexe D1 : Les détails de l'essai Los-Angeles sont résumé dans le tableau ci-dessous

Fraction	Masse M1 (g)		L _A (%)	
	GN	GBR	GN	GBR
15-25	3486.9	3037.7	30.3	39.2
10-14	4126.9	3328.1	17.5	33.4
6.3-10	3922.3	3306.8	21.6	33.9