



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Abderrahmane Sidi Hayballa Mohamed & SIDI Cherif

Ahmedou Mohamedou

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : STRUCTURE

Thème

**COMPORTEMENT FLEXIONNEL DES POUTRES EN BETON
ARME CONTENANT DES GRANULATS DE BETON
RECYCLE**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Boukhalkhel Aboubakeur	M.C.B	Président
Gotteicha Messaouda	M.A.A	Examinatrice
Bellakehal Hizia	M.C.A	Rapporteur
Krobba Ben Harzallah	M.C.B	Co-rapporteur

Promotion : Juillet - 2022

Remerciements

Avant tout propos, nous rendons grâce à Dieu de nous avoir donné la force et la compassion afin de finir ce travail malgré les difficultés et les circonstances.

C'est une occasion agréable d'exprimer en quelques lignes notre reconnaissance à ceux qui nous ont donné un soutien sans faille et un encouragement continu tout au long de nos années d'études.

Ces remerciements sont destinés en premier lieu à la promotrice *Dr. Bellakehal Hizia*. Nous tenons à exprimer nos sincères gratitude pour le soutien continu de nos études et recherches de master, pour sa patience, sa motivation et ses immenses connaissances. Ses conseils nous ont aidés durant le temps de recherche et d'écriture de ce mémoire. Sans son aide persistante, l'objectif de ce projet n'aurait pas été atteint. Nous tenons à remercier le Co encadreur *Dr. Ben Harzallah Krobba* il a été toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation des essais expérimentaux.

Nous remercions ensuite l'ensemble des membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir examiner notre travail : président *Dr. Boukhalkhel Aboubakeur* pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteur de cette thèse et de présider ce jury, Examinatrice *Gotteicha Messaouda* pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Enfin, nous remercions aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous vous disons merci

DEDICACE

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

- ❖ A nos très chers Parents ;*
- ❖ A nos frères et sœurs ;*
- ❖ A tous nos professeurs du cycle master ;*
- ❖ A tous nos amis et collègues de spécialité structure ;*

Nous vous remercions tous.

عنوان المذكرة: سلوك الانحناء لروافد الخرسانة المسلحة المحتوية على ركام خرساني معاد تدويره

المؤطر: بلكمل حيزية

الاسم: سيدي حيبلا محمد

اللقب: عبد الرحمان

احمدو محمدو

سيدي اشريف

ملخص: يعد استنفاد الموارد الطبيعية تحديًا كبيرًا للإنتاج المستدام للخرسانة. إن استبدال جزء من الركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره سيكون له تأثير اقتصادي وبيئي ملحوظ. المركب المنتج عبارة عن خرسانة تم فيها استبدال الركام الطبيعي (الرمل والحصى) بالركام المعاد تدويره بالنسب التالية: 0%؛ 15%؛ 30%؛ 50%؛ 100%. تتكون هذه الدراسة التجريبية، بعد وصف جميع المواد المستخدمة وتقييم الخواص الفيزيائية في الحالة الطازجة وفي الحالة الصلبة للخرسانة، في صنع عوارض خرسانية مسلحة صغيرة الحجم تخضع للانحناء البسيط عند أربع نقاط. هذا لمقارنة تأثير الركام المعاد تدويره على سلوك الانحناء لهذه الحزم مقارنة بحزمة التحكم مع الركام الطبيعي (OS0G). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن محتوى الركام المعاد تدويره لم يؤثر بشكل كبير على قدرة تحمل الانحناء للحزم. يحدث انخفاض طفيف بسبب انخفاض مقاومة الانضغاط للخرسانة.

كلمات مفتاحية: الركام المعاد تدويره، الانحناء، خرسانة مسلحة، السهم، التشوهات

Memory title: Bending behavior of reinforced concrete beams containing concrete aggregates.

Name: Abderrahmane

First name: Sidi Hayballa Mohamed

Directed by: Bellakehal Hizia

Sidi cherif

Ahmedou mohamedou

Abstract: The depletion of natural resources is a major challenge for the sustainable production of concrete. Replacing part of the natural aggregates with recycled aggregates will have a marked economic and environmental impact. The composite produced is a concrete in which the natural aggregates (sand and gravel) have been replaced by recycled aggregates with the following percentages: 0%; 15%; 30%; 50%; 100%. This experimental study consists, after having characterized all the materials used and evaluated the physical properties in the fresh state and in the hardened state of the concrete, in making small-scale reinforced concrete beams subjected to simple bending at four points. This is to compare the influence of recycled aggregates on the bending behavior of these beams compared to a control beam with natural aggregates (OS0G). The results obtained show that the content of recycled aggregates did not affect the flexural bearing capacity of the beams too much. A slight reduction occurs due to the decrease in the compressive strength of the concrete.

Key words: Recycled aggregates, Bending, Reinforced concrete, deformation, strains.

Titre du mémoire : Comportement flexionnel des poutres en béton armé contenant des granulats du béton recyclé.

Nom : Abderrahmane

Prénom : Sidi Hayballa Mohamed

Encadreur : Bellakehal Hizia

Sidi cherif

Ahmedou Mohamedou

Résumé : L'épuisement des ressources naturelles constitue un défi majeur pour la production durable du béton. Le remplacement d'une partie des granulats naturels par des granulats recyclés aura un impact économique et environnemental marqué. Le composite élaboré est un béton dans lequel les granulats naturels (sable et gravier) ont été substitué par des granulats recyclés avec des pourcentages suivant : 0% ; 15% ; 30% ; 50% ; 100%. Cette étude expérimentale consiste, après avoir caractérisé tous les matériaux utilisés et évalué les propriétés physiques à l'état frais et à l'état durci du béton, à confectionner des poutres à échelle réduite en béton armé soumises à la flexion simple à quatre points. Ceci afin de comparer l'influence des granulats recyclés sur le comportement flexionnel de ces poutres par rapport à une poutre témoin à granulats naturels (OS0G). Les résultats obtenus montrent que la teneur en granulats recyclés n'a pas trop affectée la capacité portante flexionnelle des poutres. Une légère réduction se produit à cause de la diminution de la résistance à la compression du béton.

Mots clés : Granulats recyclés, Flexion, Béton armé, flèche, déformations

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : La teneur des constituations du béton en poids et en volume	05
Tableau I.2 : Différents types des bétons.....	06
Tableau I.3 : Composition du ciment portland	08
Tableau I.4 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par NF P 15- 301	09
Tableau I.5 : Classes de résistance du ciment.....	09
Tableau I.6 : Domaine d'utilisation de différent ciment	10
Tableau I.7 : classification normalisée des granulats	19
Tableau I.8 : Classification des granulats suivant leur masse volumique.	19
Tableau I.9 : Classification des déchets.....	21
Tableau I.10 : Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents).....	28

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Tableau II.1 : Désignation des mélanges du béton et le pourcentage de substitution de granulats recyclés	41
Tableau II.2 : Pourcentage des masses en fonction des diamètres provenant de 5 kg d'agrégats recyclés.....	42
Tableau II.3 : Analyse chimique du ciment utilisé.....	43
Tableau II.4 : Composition minéralogique du clinker.....	43
Tableau II.5 : Essais physiques sur le ciment utilisé.....	43
Tableau II.6 : Masse volumique apparent des granulats utilisés.....	47
Tableau II.7 : Masse volumique absolue des granulats utilisés.....	48
Tableau II.8 : Compacité et porosité des granulats.....	49
Tableau II.9 : Analyse granulométrique de gravier naturel 3/8.....	50
Tableau II.10 : Analyse granulométrique de gravier naturel 8/15.....	50
Tableau II.11 : Analyse granulométrique de gravier recyclé 5/15.....	50
Tableau II.12 : Analyse granulométrique de sable naturel.....	51
Tableau II.13 : Analyse granulométriques de sable recyclé.....	51
Tableau II.14 : Coefficients d'uniformité et de courbure des granulats.....	52
Tableau II.15 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau.....	54
Tableau II.16 : Classification des sables.....	55
Tableau II.17 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.....	55
Tableau II.18 : Paramètres de l'essai Los Angles.....	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.19 : Classification des granulats selon le coefficient Los Angles.....	57
Tableau II.20 : Résultats de l'essai Los Anglos.....	57
Tableau II.21 : Récapitulation des résultats de caractérisation physiques des matériaux utilisés.	57
Tableau II.22 : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax.....	60
Tableau II.23 : Correction sur le dosage en eau (%).	61
Tableau II.24 : Valeur de terme correcteur K en fonction du dosage en ciment.....	62
Tableau II.25 : les valeurs du coefficient de compacité γ	62
Tableau II.26 : Le dosage des différentes matières sèches pour chaque formulation des bétons témoins	65
Tableau II.27 : Le dosage des différentes matières sèches pour chaque formulation des bétons recyclés.....	65
Tableau II.28 : Qualité de béton selon la vitesse de son.....	75

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.1 : Résultats de l'essai de compression à 7jours.....	79
Tableau III.2 : Résistance à la compression et à la traction par flexion à 28jours.....	81
Tableau III.3 : Résultats de l'essai ultrasonique à 28jours.....	83
Tableau III.4 : Résultats de l'essai de scléromètre et de l'essai de compression à 28jours.....	85
Tableau III.5 : Résultats expérimentaux de comportement flexionnel des poutres.....	87

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Décharges publique de gravats.....	02
Figure I.2 : Photos des différents types de granulats	11
Figure I.3 : Le Laitier des hauts fourneaux	12
Figure I.4 : Le Laitier cristallisé concassé	13
Figure I.5 : Granulats très légers	14
Figure I.6 : Granulats de débris de maçonneries.....	15
Figure I.7 : Granulats de débris de béton	15
Figure I.8 : Granulats de débris de mixtes, proviennent de la rénovation et de la démolition des bâtiments	15
Figure I.9 : déchets de verre.....	16
Figure I.10 : déchets de pneus usagés	16
Figure I.11 : Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.....	17
Figure I.12 : Ciment durci.....	18
Figure I.13 : Déchets plastiques	18
Figure I.14 : Démolition à l'aide d'une tenaille.....	24
Figure I.15 : Démolition par dynamitage.....	24
Figure I.16 : Passant au tamis de 1,6 mm pour un nombre différent de rotations dans le cylindre de la machine Los Angeles, pour un granulat naturel et un GBR de différentes tailles.....	30
Figure I.17 : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage [21].....	37
Figure I.18 : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage [50].....	38
Figure I.19 : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage [49].....	38

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure II.1 : ciment utilisé.....	42
Figure II.2 : gravier naturel 8/15 utilisé	43
Figure II.3 : Récupération des éprouvettes testées au laboratoire	44
Figure II.4 : Concassage du béton recyclé à l'aide d'un concasseur à mâchoire	45
Figure II.5 : gravier recyclé 8/15 utilisé	45
Figure II.6 : Sable naturel utilisé	46
Figure II.7 : Sable recyclé utilisé	46
Figure II.8 : Essai masse volumique apparent par la méthode de récipient.....	47
Figure II.9 : essai masse volumique absolue par la méthode d'éprouvette gradué.....	48
Figure II.10 : Analyse granulométrique par tamisage	49

LISTE DES FIGURES

Figure II.11 : Courbes granulométries des granulats étudiés.....	52
Figure II.12 : Essai d'absorption d'eau pour les granulats naturels (sables et graviers)	53
Figure II.13 : essai de l'équivalent de sable.....	54
Figure II.14 : essai de Los Angeles.....	56
Figure II.15 : dosage en ciment en termes de C/E et l'affaissement	60
Figure II.16 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.....	63
Figure II.17 : Essai de l'affaissement au cône d'Abrams.....	66
Figure II.18 : mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	66
Figure II.19 : les moules des prismes (7*7*28cm ³).....	67
Figure II.20 : les moules des éprouvettes cylindrique (D=16cm, H=32cm).....	67
Figure II.21 : les moules des éprouvettes cubique (10*10*10cm ³)	67
Figure II.22 : les éprouvettes cubique (10*10*10cm ³) après décoffrage.....	68
Figure II.23 : les éprouvettes cylindrique (D=16cm, H=32cm) après décoffrage.....	68
Figure II.24 : éprouvette prismatique (7*7*28cm ³) après décoffrage	68
Figure II.25 : cure des éprouvettes.....	69
Figure II.26 : Géométrie de la poutre.....	69
Figure II.27 : Coffrage métallique des poutres	70
Figure II.28 : Ferrailage des poutres.....	70
Figure II.29 : Instrumentation des barres d'acier par les jauges de déformations	70
Figure II.30 : Décoffrage des poutres	71
Figure II.31 : Instrumentation du béton par les jauges de déformations	71
Figure II.32 : Essai de traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm.....	72
Figure II.33 : Essai de compression sur les éprouvettes cubiques 10*10*10cm ³	72
Figure II.34 : Essai de compression sur les moitiés des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm..	73
Figure II.35 : Essai de scléromètre réalisé sur des éprouvettes cylindriques (16/32).....	74
Figure II.36 : Essai ultrason sur des éprouvettes cylindrique 16/32.....	74
Figure II.37 : Essai de flexion simple quatre points sur les poutres 10*15-140cm ³	76
Figure II.38 : Emplacement des LVDTs.....	76

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III.1 : Résistance à la compression de béton à base de GBR à 7jours.....	80
Figure III.2 : Résistances à la traction à 28jours du béton à GBR.....	82
Figure III.3 : Résistances à la compression à 28jours sur les moitiés des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm.....	82

LISTE DES FIGURES

Figure III.4 : Module élastique du béton évalué par l'essai aux ultrasons à 28jours.....	84
Figure III.5 : Résistance à la compression du béton évaluée par l'essai aux ultrasons à 28jours.....	84
Figure III.6 : Résistance à la compression du béton évaluée par les essais aux ultrasons, scléromètre, et par écrasement à 28jours sur les cylindres 16/32.....	86
Figure III.7 : Corrélation Indice de rebondissement – Résistance à la compression.....	86
Figure III.8 : Courbe charge – flèche à mi- travée des poutres.....	88
Figure III.9 : Courbes de la largeur des fissures en fonction de la charges.....	89
Figure III.10 : Déformation du béton comprimé.....	89
Figure III.11 : Déformation des aciers tendus.....	90
Figure III.12 : Schémas de fissuration de la poutre témoin 1 (BT1S0G0).....	91
Figure III.13 : Schémas de fissuration de la poutre témoin 2 (BT2S0G0).....	91
Figure III.14 : Schémas de fissuration de la poutre (BS0G100).....	91
Figure III.15 : Schémas de fissuration de la poutre (BS100G0).....	91
Figure III.16 : Schémas de fissuration de la poutre (BS0G50).....	91
Figure III.17 : Schémas de fissuration de la poutre (BS30G50).....	91
Figure III.18 : Schémas de fissuration de la poutre (BS15G30).....	92

LISTE DES ABREVIATIONS

GBR : Granulats de béton recyclé.

SBR : Sable de béton recyclé

SN : Sable naturel.

GN : Gravier naturel.

DCD : Les déchets de construction et de démolition.

MA : Mortier adhérent.

DRX : Diffraction des Rayons X.

PCA : Pate de ciment adhérent.

BTP : Bâtiment et des Travaux Publics.

DIB : Déchets industriels banales.

DID : Déchets industriels dangereux.

DIS : Déchets industriels spéciaux.

DAS : Déchets d'activité de soin.

DASRI : Déchets d'activité de soin à risques infectieux.

BGR : Béton de granulats recyclés.

BGN : Béton de granulats naturels.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.	INTRODUCTION	5
2.	GENERALITES SUR LES BETONS	5
2.1.	Définition.....	5
2.2.	Différents types du béton.....	5
2.3.	Les différentes méthodes de formulation des bétons.....	6
2.4.	Les composants du béton.....	7
2.4.1.	Ciment	7
2.4.1.1.	Définition	7
2.4.1.2.	Les constituants de base du ciment	7
2.4.1.3.	Composants secondaires	8
2.4.1.4.	Classification et domaine d'application des ciments	8
2.4.2.	Les granulats.....	10
2.4.2.1.	Introduction	10
2.4.2.2.	Les différents types de granulats.....	10
2.4.2.3.	Classification des granulats.....	18
2.4.3.	L'eau de gâchage.....	19
2.4.4.	Les adjuvants	20
3.	GENERALITES SUR LES DECHETS.....	20
3.1.	Définition des déchets.....	20
3.2.	Principes et types de recyclage des déchets :.....	20
3.3.	Classification des déchets	21
3.4.	Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil.....	22
4.	GENERALITES SUR LES BETONS RECYCLES.....	22
4.1.	Granulats de béton recyclé.....	22

TABLE DES MATIERES

4.1.1.	Techniques et matériaux de démolition.....	22
4.1.1.1.	Technique de démolition à l'aide d'outils à main.....	23
4.1.1.2.	Techniques de démolition à l'aide d'outils portés	24
4.1.1.3.	Démolition par dynamitage.....	24
4.1.2.	Élaboration des granulats de béton recyclé	24
4.1.2.1.	Concassage et criblage	25
4.1.2.2.	Dépoussiérage	25
4.1.2.3.	Tri par la densité.....	26
4.1.3.	Caractérisation des granulats de béton recyclé.....	26
4.1.3.1.	Mesure de la teneur en pâte de ciment durci (PCD) adhérente et de mortier adhérent (MA).....	26
4.1.3.2.	Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR	27
4.1.3.3.	Masse volumique et absorption d'eau des GBR	28
4.1.3.4.	Résistance aux chocs et à l'abrasion	29
4.1.3.5.	La porosité (P).....	30
4.1.3.6.	Granulométrie	30
4.2.	Propriétés de béton à granulats recyclé	31
4.2.1.	A l'état frais.....	31
4.2.2.	A l'état durci.....	31
4.2.2.1.	Caractéristiques mécaniques	31
4.2.2.2.	Durabilité.....	33
5.	BETON RECYCLE ARME.....	35
5.1.	Adhérence entre armatures et bétons de GBR.....	36
5.2.	Comportement flexionnel des poutres en GBR :.....	36
6.	CONCLUSION.....	39

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

1.	INTRODUCTION :	41
2.	PROGRAMME EXPERIMENTAL	41
3.	IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES.....	42
3.1.	Ciment.....	42
3.2.	Gravier naturel	43
3.3.	Granulats recyclés.....	44
3.3.1.	Production des granulats recyclés	44

TABLE DES MATIERES

3.4.	Sables :.....	45
3.5.	Eau de gâchage :	46
3.6.	Aciers de ferrailage :.....	46
4.	LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX	46
4.1.	Masses volumiques :.....	46
4.1.1.	Masse volumique apparente : (selon la norme NF P18-555)	46
4.1.2.	Masse volumique absolue : (selon la norme NF P18-555)	47
4.2.	Compacité et porosité :	48
4.3.	Analyse granulométrique :(selon la norme NF P94-056).....	49
4.4.	Coefficient d’Absorption d’eau des granulats : NF P18-555	53
4.5.	Equivalent de sable : (selon la norme NF P18-597).....	54
4.6.	Essai Los Angeles :(selon la norme NF P18-573).....	55
5.	FORMULATION DU BETON	58
6.	METHODE D’ESSAI.....	65
6.1.	A l’état frais	65
6.2.	A l’état durci	66
6.2.1.	Confection des éprouvettes.....	68
6.2.2.	Confection des poutres	69
6.2.3.	Essai de traction par flexion	71
6.2.4.	Essais de compression (Selon la NF EN 1290-3).....	72
6.2.5.	Essai scléromètre :	73
6.2.6.	Essai ultrason (essai d’auscultation dynamique) :.....	74
6.2.7.	Essai de flexion des poutres :	75
7.	CONCLUSION	76

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1.	INTRODUCTION	79
2.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	79
2.1.	Résistance à la compression :	79
2.1.1.	Résultats à la compression à jeune âge :	79
2.2.	Résistance mécanique à 28jours :	80
2.3.	Essai aux ultrasons :.....	82
2.4.	Essai au scléromètre :	84
2.5.	Comportement flexionnel des poutres :.....	87

TABLE DES MATIERES

2.5.1.	Analyse de la flèche	87
2.5.2.	Analyse du largueur des fissures	88
2.5.3.	Déformations du béton comprimé	89
2.5.4.	Déformations des aciers tendues	90
2.5.5.	Fissuration et mode de rupture	90
3.	CONCLUSION :	92

CONCLUSION GENERALE

REFERNCE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXE

1. Généralités

Le monde se développe et s'urbanise à un rythme très rapide. Cet impact de l'urbanisation rapide se reflète également dans l'industrie de la construction. Cependant l'urbanisation s'accompagne d'une responsabilité morale de préserver l'environnement.

Le béton est le matériau de construction de choix pour les ingénieurs civils du monde entier. Durant plusieurs années, il est apprécié pour ses meilleures performances, sa durée de vie plus longue et ses faibles coûts de maintenance. Parvenir à une urbanisation rapide.

Les chantiers de construction et de démolition génèrent une grande diversité de déchets qui constituent une partie importante des coûts de production des déchets solides dans le monde environ 90 % d'entre eux sont éliminés en décharge [1].

L'épuisement de sources naturelles disponibles des granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier.

La vague du développement durable a également un impact sur l'industrie de la construction. Les scientifiques et les ingénieurs du monde entier recherchent des matériaux de constructions durable et réutilisable. L'un de ces matériaux est le béton granulaire recyclé.

Le recyclage des granulats issus des matériaux de démolition, déjà bien engagé dans le secteur des travaux publics mais moins dans les travaux de génie civil, semble être une solution idéale la plus prometteuse pour les problèmes de déchets. Il a connu une grande évolution dans les pays développés, répond aux soucis de manque de granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages de gravats et les figures suivantes sont bien édifiantes.



Débris de bétons

Débris mixte de bétons et maçonnerie

Figure I.1 : Décharges publique de gravats [1].

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, la valorisation de déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et connaît un développement assez important et le taux de recyclage des débris de construction/démolition a atteint dans certains pays les 80 % [1].

En Algérie, l'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires à partir du 04 juillet 2007 (Loi N : 05/12 du 04/08/2005), l'épuisement de certains gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats pour béton afin de répondre aux besoins des grands chantiers lancés par le gouvernement Algérien.

2. Objectif du travail

Le besoin d'améliorer l'utilisation du béton recyclé dans le domaine des structures nécessite d'étudier la capacité du béton recyclé à assurer une bonne adhérence avec l'acier.

Ce projet de Master a été proposé pour contribuer au développement de l'industrie du recyclage et à la valorisation des déchets de construction et de démolition en Algérie en faisant incorporer les granulats du béton recyclé (GBR) dans une matrice de béton frais. Le composite élaboré est un béton dans lequel les granulats naturels (sable et gravier) ont été substitué par des granulats recyclés avec des pourcentages suivant : 0% ; 15% ; 30% ; 50% ; 100%.

Cette étude expérimentale consiste, après avoir caractérisé tous les matériaux utilisés et évalué les propriétés physiques à l'état frais et à l'état durcis du béton, à confectionner des poutres à échelle réduit en béton armé soumises à la flexion simple à quatre points. Ceci afin de comparer l'influence des granulats recyclés sur le comportement flexionnel de ces poutres par rapport à une poutre témoin a granulats naturels (0S0G).

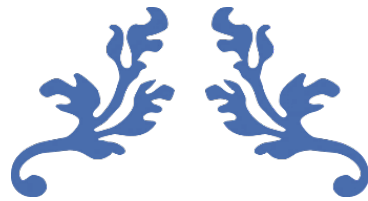
3. Organisation du mémoire :

En premier lieu et après une introduction générale, le première chapitre présente une étude bibliographique afin de présenter des définitions générales des différents constituants du béton, leurs classifications, leurs avantages et leurs inconvénients et de référencer et d'analyser les potentialités de valorisation des déchets de construction et de démolition comme nouvelle source de matériaux pour le secteur de la construction et la réglementation concernant le recyclage des déchets de construction et de démolition dans les bétons.

Le deuxième chapitre est consacré au programme expérimental. Cette étude a pour but d'étudier le comportement flexionnel des poutres en béton armé contenant des granulats de béton recyclé, à l'état frais et durci, d'où la nécessité de la caractérisation préliminaire des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux utilisés dans la formulation du béton.

INTRODUCTION GENERALE

Toutes les étapes menant à la confection des poutres en béton armé sont présentées dans ce chapitre. Le dernier chapitre présente l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus de cette étude. En fin, ce travail est clôturé par une conclusion générale résumant tous les résultats obtenus ainsi que des recommandations pour les futures recherches.



CHAPITRE I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



1. INTRODUCTION

L'environnement, la protection de la nature, et le développement durable jouent un rôle essentiel dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction. Avec l'augmentation constante de la population mondiale une urbanisation accrue se développe et par conséquent, les déchets en général augmentent. Le secteur de bâtiment, lié au développement économique et industriel, génère une grande diversité et de quantités importantes de déchets de chantiers qui constituent une part importante des coûts de production des déchets solides dans le monde [1].

Les déchets de construction et de démolition représentent 90 % de ces déchets de chantiers, 65% de ces déchets proviennent de la démolition, 28 % de la réhabilitation des ouvrages et seulement 7% de la construction neuve [1]. Une petite partie de ces déchets qu'on y trouve est recyclée, et environ 90 % d'entre eux sont aujourd'hui encore trop souvent déposés en installation de stockage ou même sont éliminés en décharges sauvages. Face aux quantités toujours croissantes des déchets, les capacités des décharges s'épuisent de plus en plus, surtout aux alentours des grandes agglomérations. Réduire le volume des déchets de construction et de démolition en les réutilisant est un enjeu majeur. [1]

2. GENERALITES SUR LES BETONS

2.1. Définition

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants qui peut varier en fonction de ses utilisations.

Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints.

Tableau I.1 : La teneur des constituants du béton en poids et en volume. [2]

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 – 22	1 – 6	7 – 14	60 – 78
Poids (%)	5 – 9	-	9 – 18	63 – 85

2.2. Différents types du béton

Il existe plusieurs types de béton, béton compacte au rouleau, béton à durcissement rapide, béton réfractaire, béton de poudre réactive, béton ordinaire, béton préfabriqué, béton de terre, béton bitumineux, béton arme, béton projeté ... etc. Le Tableau I.2 présente les caractéristiques et les applications de quelques types des bétons.

Tableau I.2 : Différents types des bétons [3].

Type de béton	Caractérisations	Application
Le béton léger	<ul style="list-style-type: none"> • Une bonne qualité d'isolation thermique et phonique. • Une faible masse volumique. • Une forte maniabilité. 	Hourdis, cloisons, réhabilitation de bâtiment anciens, remplissages
Le béton lourd	<ul style="list-style-type: none"> • La masse volumique apparent est $>2600 \text{ kg/m}^3$. • Les résistances mécaniques plus élevées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une barrière efficace contre les rayons X, les rayons Gamma. • Utilisé pour réaliser des contrepoids.
Le béton auto-plaçant	Ajout d'adjuvants tels que des super-plastifiants et des agents de viscosité dans la composition. Béton très fluide se mettant en place sans avoir recours à un système de vibration.	Radier, fondations, sols industriels
Le béton fibré	Ajout de fibres de nature, dimension et forme différentes. Réparties de manière homogène dans le mélange, ces fibres améliorent certaines caractéristiques du béton (résistance à la traction, tenue au feu).	Dalles, sols industriels, poutres, tuyaux
Les bétons hauts performances	Bétons aux résistances accrues, très peu poreux Plus durables.	Ponts, centrales nucléaires, ouvrages de grande ampleur
Béton ordinaire	Homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulats, eau. Un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée $20\text{MPa} \leq f_{c28} \leq 50\text{MPa}$.	Dalles, poteaux, poutre, voiles, fondations.

2.3. Les différentes méthodes de formulation des bétons

Le calcul de la composition du béton à pour le but de déterminer le dosage en ciment, granulats et en eau pour un dosage de 1 m^3 de béton frais afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue. Il existe plusieurs méthodes de détermination de la composition du béton proposé et appliquées dans les différents pays du monde parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode de d'Abrams.
- Méthode de FAURY.
- Méthode de d'OISEL.
- Méthode de DREUX GORISSE.
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.
- Méthode générale du centre d'essais des structures.

Dans notre étude on a utilisé la méthode de **DREUX GORISSE**, cette méthode consiste à définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

2.4. Les composants du béton

2.4.1. Ciment

2.4.1.1. Définition

Le ciment est une poudre minérale, dont la propriété est de durcir sous l'eau d'où il est appelé liant hydraulique. Ce dernier est généralement composé de calcaire et d'argile. Il fait partie des principaux composants du béton, liant ses constituants entre eux, et lui confère certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance. On présentera brièvement dans ce qui suit quelque notion générale sur la composition et, les propriétés de ciment ainsi que les paramètres de durabilité.

2.4.1.2. Les constituants de base du ciment

Le ciment est constitué essentiellement à partir de quatre éléments de base :

- **La chaux CaO** (désignation simplifiée « C ») plutôt basique ;
- **La silice SiO_2** (désignation simplifiée « S ») ;
- **L'alumine Al_2O_3** (désignation simplifiée « A ») ;
- **L'oxyde de fer Fe_2O_3** (désignation simplifiée « F ») plutôt acide [4].

Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. En effet, la roche calcaire CaCO_3 se décarbonate à environ 900°C pour donner de la chaux vive **CaO**. Les trois oxydes (**SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3**) abondent

dans la nature sous forme cristallisée et stable (sable, argiles, etc.). Ils doivent donc subir un traitement approprié vers 1450° C pour les amener dans un état de réactivité [4].

Le ciment possède aussi une faible quantité du gypse, environ 3,5% en masse. La composition minéralogique moyenne du ciment est donnée au Tableau I.3 : [4]

Tableau I.3 : Composition du ciment portland [4]

Nom Chimique	Formule chimique	Masse (%)
Silicate tricalcique	3CaO, SiO ₂ (Alite) C3S	50
Silicate di calcique	2CaO, SiO ₂ (Belite) C2S	25
Aluminate tricalcique	3CaO, Al ₂ O ₃ (Aluminate) C3A	12
Aluminon-ferrite tétra calcique	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (Ferrite) C4AF	8
Sulfate de calcium	CaSO ₄ , 2H ₂ O (Gypse)	3,5

2.4.1.3. Composants secondaires

- L'oxyde de Magnésium (MgO)
- Les Alcalis (Le K₂O et le Na₂O)
- Le soufre
- Les chlorures (Cl)
- Les phosphores (P₂O₅)
- Les ajouts cimentaires : Le Laitier de haut fourneau, Pouzzolane naturelle, Fumée de silice, Calcaire.

2.4.1.4. Classification et domaine d'application des ciments

• Types du ciment :

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages, tel que :

- Résistances mécaniques
- Résistance à une attaque physique ou chimique
- Mise en œuvre particulière.

Le tableau I.4 regroupe le classement de ciments courants selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker.

Tableau I.4 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par NF P 15- 301.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	-----	
CEM II /A CEM II /B	Ciment portland Composé	80 à 94 % 65 à 79 %	L'un des Ajouts - 6 à 20% - 21 à 35 %	0 à 5%
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	Laitier - 35 à 65 % - 66 à 80% - 81 à 95 %	
CEM IV/A CEM IV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	Pouzzolane, cendre, ou fumée de silice - 10 à 35% - 36 à 55%	
CEM V/ A CEM V/ B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 % 20 à 39 %	Laitier - 18 à 30% Etcendre- 31 à 50%	

- **Classe de résistance du ciment :**

Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 2 et à 28 jours (Tableau I.5). La résistance du ciment est déterminée sur des éprouvettes de mortier de ciment (Mortier normalisé ; 3 sable/1 ciment/0,5 Eau) [4].

Tableau I.5 : Classes de résistance du ciment [4]

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)	
	2 jours Limite inf	28 jours Limite inf
32.5N (Normale)	-	≥ 32.5
32.5R (Rapide)	≥ 13.5	≥ 32.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5
52.5R	≥ 30	≥ 52.5

- **Domaine d'utilisation de différent ciment :**

Tableau I.6 : Domaine d'utilisation de différent ciment [4]

Ciment	Désignation	Utilisation	Contre-indication
Ciment Portland Ciment composé	CEM I CEM II	Tous travaux de béton armé ✓ Bonne résistance ✓ Décoffrage Rapide (préfabrication) ✓ Bétonnage par temps froid	✓ Présence d'eaux agressives ✓ Travaux souterrains ✓ Bétonnage en grande masse
Ciment au laitier Et pouzzolanique Ou au laitier et cendre.	CEM III CEM IV CEM V	✓ Béton de masse (barrage) ✓ Béton de fondation (sol agressif) ✓ Bétonnage en temps chaud ✓ Eau usée ✓ Travaux souterrains ✓ Réservoir d'eau	✓ Bétonnage par temps froid ✓ Béton préfabriqué ✓ Résistance à jeune âge élevée

2.4.2. Les granulats

2.4.2.1. Introduction

La construction de l'habitat et l'aménagement de l'environnement font appel à trois grands secteurs d'activités, qui sont les industries de carrière et matériaux de construction, le bâtiment et les travaux publics. Tous les travaux liés à ces secteurs d'activités utilisent des matières premières naturelles en tant que morceaux de roches ou alluvionnaires (sous forme de sables et graviers), soient obtenues artificiellement par traitement de roches naturelles ou des déchets industriels et parfois l'utilisation des déchets inertes. La nature et la forme des granulats varient en fonction des gisements et des techniques de production [5].

Un granulat est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais [5].

2.4.2.2. Les différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée (Figure I.2)

- « Naturels », lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;

- « Artificiels », lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- « Recyclés », lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés [7].

A. Les granulats naturels :

Les granulats naturels, proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres,
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites [6].

Les compositions minéralogiques font apparaître trois familles : les roches calcaires, les roches siliceuses et les silico-calcaires [7].

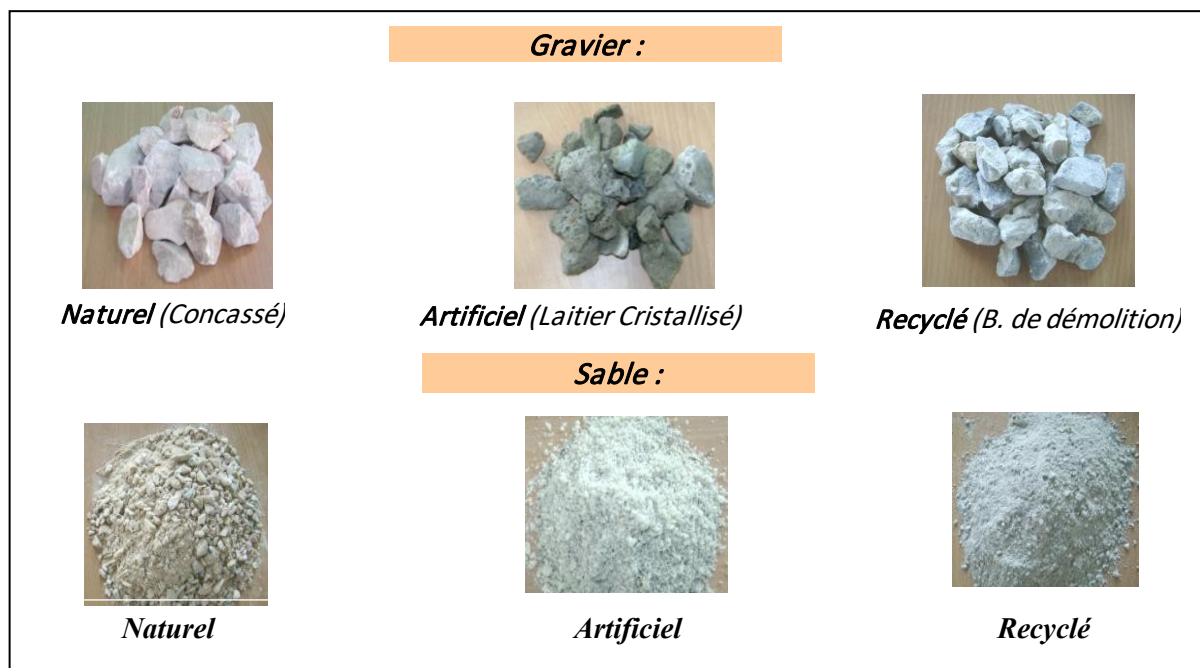


Figure I.2: Photos des différents types de granulats [6].

- **Les Granulats Alluvionnaires :**

Appelées aussi granulats roulés, dont la forme est obtenue par érosion. Il s'agit principalement de dépôts alluvionnaires trouvés dans les lits des rivières (et éventuellement aussi en mer) []. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules d'argile et tamisés pour obtenir différentes classes de granulats.

- **Les Granulats de Carrières :**

Les granulats sont obtenus par grenailage et concassage, suivis d'opérations de criblage ou de tamisage pour sélectionner des particules de taille précise. Les agrégats brisés ont des propriétés qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du lit, degré de fragmentation,

En raison de sa texture de surface et de sa rugosité, ce type de granulats a une très bonne adhérence au coulis. En revanche, ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée, du fait de leur angularité et donc de leur surface spécifique étendue [8].

- **B. Les granulats artificiels :**

Cette catégorie comprend les granulats issus de la conversion thermique des roches, des minerais et des sous-produits industriels de conversion.

- **Le Laitier des hauts fourneaux :**

Le laitier de haut fourneau est le principal sous-produit de la sidérurgie et il est constitué de tous les composants minéraux contenus dans la charge de haut fourneau (minerai et additifs) qui subsistent après l'extraction du fer (Figure I.3).



Figure I.3: Le Laitier des hauts fourneaux.

- **Le laitier cristallisé concassé :**

Il est obtenu par refroidissement lent à l'air libre, et en fosse, il a l'aspect et les propriétés de la roche ignée. Il peut être plus ou moins poreux, et plus la vitesse de refroidissement est lente, plus le laitier cristallise et se densifie en couche mince. Sa masse volumique apparente est >1250 Kg/cm³, et sa composition chimique est principalement composée de chaux, de magnésie, de silice et d'alumine (Figure I.4) [9].



Figure I.4: Le Laitier cristallisé concassé.

- **Le laitier expansé ou bouleté :**

Le laitier est spécialement traité : forte injection d'eau et action mécanique. Les particules de laitier sont alors projetées sur plusieurs mètres et trempées à l'air lors de leur parcours. La masse volumique apparente des scories en expansion est comprise entre 800 et 950 kg/m³ [8].

- **Les Scories d'aciérie :**

Ces scories sont un sous-produit de la conversion de l'hématite en acier. Traité comme du laitier de haut-fourneau, ce matériau est gêné par une déferrisation insuffisante, ce qui se traduit par une masse volumique élevée de l'ordre de 3300 kg/m³ [9].

- **Les Schistes houillers :**

L'industrie minière en général, et les mines de charbon en particulier, génèrent une grande quantité de déchets. Ces déchets ont des applications importantes en tant que granulats dans les terrassements routiers [9].

- **Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :**

Il s'agit de granulats développés spécifiquement pour certaines applications, notamment des granulats très durs utilisés pour renforcer la résistance à l'usure des matériaux de pavage industriels (granulats noirs, émeri...) ou des granulats réfractaires [9].

- **Granulats allégés par expansion ou frittage :**

Ces granulats ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé, leurs masses volumiques varient entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité. Ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique [9].

- **Granulats très légers :**

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Ils sont particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage ou rechargements sur planchers peu résistants (Figure I.5).

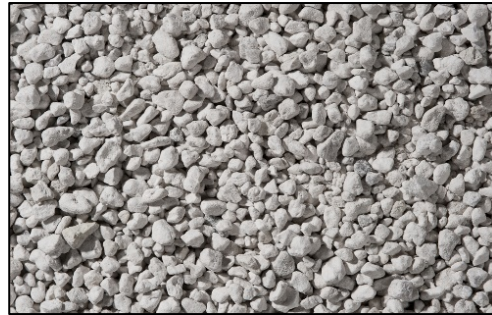


Figure I.5: Granulats très légers.

- **Granulats lourds :**

Les granulats lourds se caractérisent par leur densité élevée. Ils sont utilisés essentiellement pour la fabrication de bétons lourds. Comme les déchets ferreux dont la densité varie de 7,4 à 7,7 [9].

C. Les granulats recyclés :

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux...

- **Les déchets de chantier :**

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé. Les (Figures I.6 a I.8) présentent les différentes catégories de déchets de chantiers et domaine d'application [10].

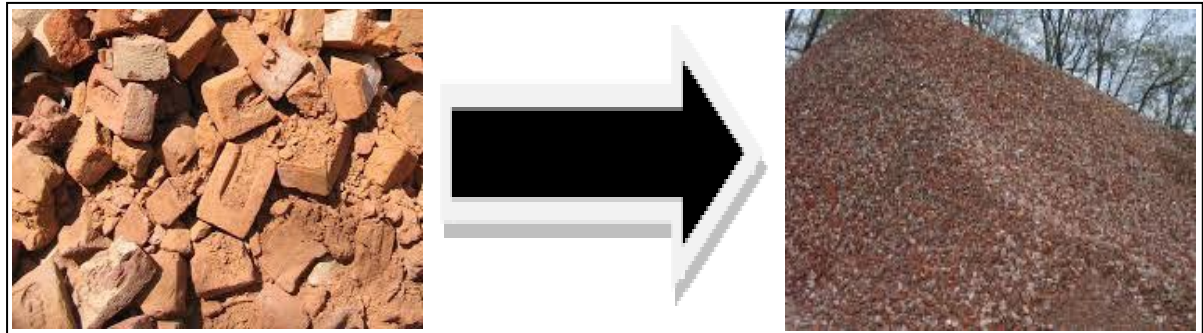


Figure I.6: Granulats de débris de maçonneries.

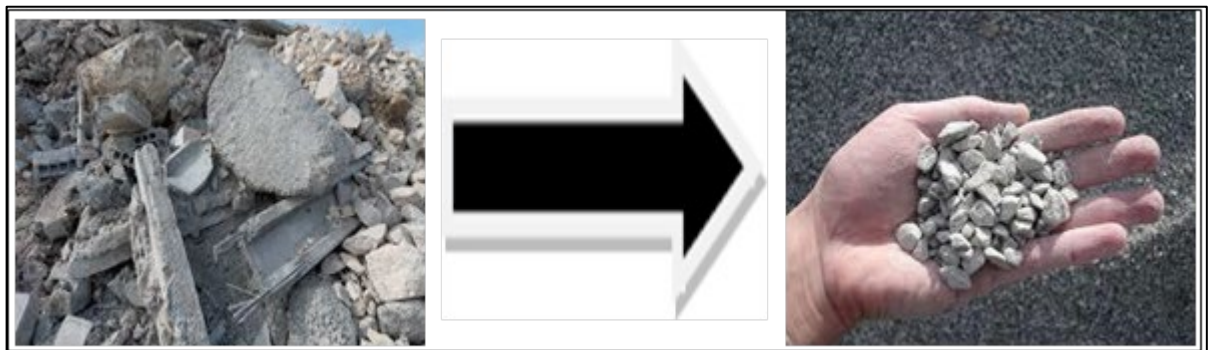


Figure I.7: Granulats de débris de béton.

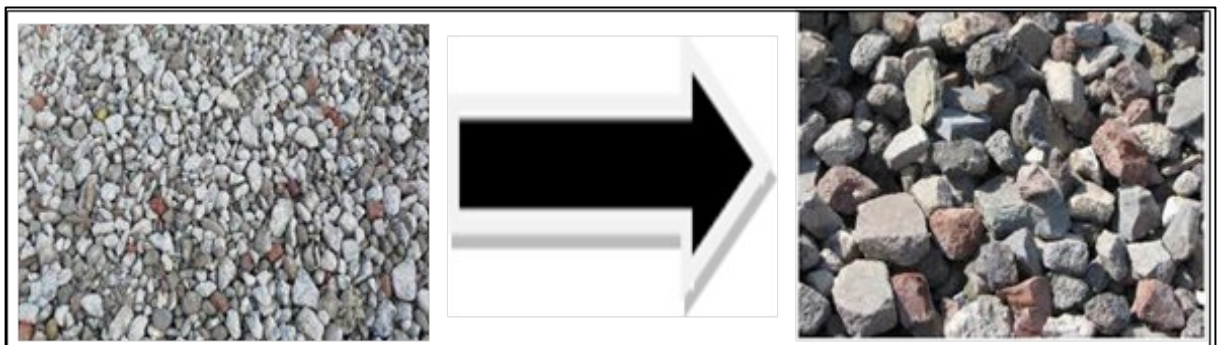


Figure I.8 : Granulats de débris de mixtes, proviennent de la rénovation et de la démolition des bâtiments.

- **Les déchets de démolition :**

Les déchets de démolition sont une sous-catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton [10].

- **Verre de récupération :**

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m^3 par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C . Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours (Figure I.9) [12].



Figure I.9: déchets de verre.

- **Pneus usages :**

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [12].



Figure I.10 : déchets de pneus usagés.

- **Déchets de marbre :**

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire (Figure I.11), existant dans une grande diversité de coloris pouvant présenter des veines ou des fossiles. Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides de plus ou moins siliceux ou argileux [3].



Figure I.11 : Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.

- **Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières :**

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton autoclave ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition [12].

- **Déchets de mines de charbon :**

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger. La température de chauffe de ces déchets susceptible de produire le gonflement ou la dilatation doit être contrôlée pour que les gaz s'échappant de l'argile ou de tout autre matériau soient bien emprisonnés dans les Chapitre I Revue bibliographique 17 granules ramollies. Tous les déchets ne vont pas nécessairement gonfler. Il est donc important de faire des essais préliminaires pour évaluer la capacité de gonflement des types particuliers de déchets [12].

- **Ciment durci :**

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides

et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.



Figure I.12 : Ciment durci.

- **Déchets plastiques :**

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Les déchets plastiques peuvent incorporés dans des matrices cimentaires. En effet, des études antérieures ont montrées qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons comme liant pour la production d'un matériau composite à haute performance, ou ils sont ajoutés dans le béton sous forme de grains et fibres ondulées et rectilignes (Figure I.13).



Figure I.13 : Déchets plastiques.

2.4.2.3. Classification des granulats

- **Classification des granulats selon leur taille :**

La classe granulaire désigne un granulat selon son plus petit diamètre de grain représentatif et son plus grand diamètre de grain représentatif (Tableau I.6). Cela permet ainsi de différencier

les granulats entre eux et de les classer [3]. Cela indique aussi la plage des diamètres de grains couverte par un granulat. Elle est définie par le terme d/D avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat [3].

Tableau I.7 : classification normalisée des granulats [3]

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1.25mm et 70% de passant à 0.063mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10% de passant à 0.063 mm
Sables	0/D	$0 \text{ mm} < D \leq 4 \text{ mm}$
Graves	0/D	$D < 6.3 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 63 \text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d \geq 31,5 \text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

Il est possible de réaliser des mélanges de granulats pour obtenir des distributions granulaires adaptées à chaque utilisation.

- **Classification des granulats selon leur masse volumique :**

Le classement des granulats en fonction de leur masse volumique est illustré dans le tableau I.8:

Tableau I.8 : Classification des granulats suivant leur masse volumique [4].

Classification	Masse volumique (t/m^3)
Granulat léger	< 2
Granulat courant	Entre 2 et 3
Granulat lourd	> 3

2.4.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

2.4.4. Les adjuvants

Selon La norme NF EN 934-2 et le Référentiel de la marque NF "Adjuvant pour béton, mortiers et coulis. Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés lors du malaxage du béton et faiblement dosés lors de la préparation (moins de 5% de la masse du béton). Ces produits offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que son temps de prise ou son étanchéité.

3. GENERALITES SUR LES DECHETS

3.1. Définition des déchets

Un déchet est "tout résidu de production, de transformation ou d'utilisation, déversé par le détenteur, dont la nature a un effet néfaste sur les écosystèmes naturels."

D'un point de vue économique, un déchet est tout objet qui a une valeur économique nulle ou négative pour son détenteur. Pour s'en débarrasser, il paie le service ou le fait lui-même.

Du point de vue juridique, la définition du déchet permet de distinguer une conception subjective et une conception objective. Selon la conception subjective, une propriété devient un déchet lorsque le détenteur a la volonté de s'en débarrasser. Elle lui appartient aussi longtemps qu'elle demeure dans son espace privé. Cette propriété appartient à la municipalité lorsqu'elle est déposée sur la voie publique car, en effet, par cet acte, le détenteur manifeste clairement sa volonté de l'abandonner. Selon la conception objective, un déchet est tout objet dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de sa valeur économique [3].

3.2. Principes et types de recyclage des déchets :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage a donc deux conséquences écologiques majeures :

- La réduction du volume de déchets, et donc la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voir des siècles à se dégrader) ;
- La préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

Les trois grands principes du recyclage sont :

- a) Réduire :** regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.

- b) **Réutiliser** : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.
- c) **Recycler** : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet.

Les trois grands types de recyclage selon la technique utilisée sont [3] :

- a) Le recyclage dit (chimique) utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants ;
- b) Le recyclage dit (mécanique) est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer ou pour séparer courants de Foucault ;
- c) Le recyclage dit (organique) consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

3.3. Classification des déchets

Tableau I.9 : Classification des déchets [3].

Types de déchets		Exemple
Déchets solides ménagers	La fraction biodégradable	Végétaux, déchets alimentaires, fruits, produits cellulosiques et les plastiques biodégradables.
	La fraction inerte	Verre, pierres, céramique, plastique non biodégradables, textiles synthétiques, caoutchouc.
	Les contaminants	Batteries, métaux non ferreux, solvants, peintures, huiles, encres.
Déchets industriels	Déchets industriels banales (DIB)	Cartons, verre, déchets de cuisine, emballages, déchets textiles.
	Déchets industriels dangereux (DID)	
	Déchets industriels spéciaux (DIS)	
Déchets hospitaliers	Déchets d'activité de soin (DAS)	Déchets d'activité de soin à risques infectieux (DASRI)
Déchets de la construction	Déchets inertes	Béton, briques, tuiles et céramiques, mélange de béton brique tuiles et céramique, verre (partie vitrage uniquement), matériaux bitumineux sans goudron, terres et pierres (y compris déblais mais hors terre végétale)
	Déchets non dangereux non	Métaux et leurs alliages, - Bois bruts ou faiblement adjuvantes, - Papiers, Cartons, - Plastiques, - Laines minérales, - Peintures, vernis, colles, mastics en phase

	inertes	aqueuse
	Déchets dangereux	Aérosols, - Accumulateurs et piles contenant des substances dangereuses, - Bois traité avec des substances dangereuses, - Boues de séparateur d'hydrocarbures, - Cartouches contenant des substances dangereuses

3.4. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil

Le recyclage des déchets comme granulats pour les routes ou la construction permet ;

- Une économie de la ressource naturelle;
- Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre;
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants;
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge;
- Conserve l'espace d'enfouissement, par conséquent, réduit le besoin de nouvelle décharge et économise ainsi plus de coût [3].

4. GENERALITES SUR LES BETONS RECYCLES

4.1. Granulats de béton recyclé

Pour favoriser le recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**), il faut que les granulats obtenus soient de bonne qualité. En outre, pour favoriser l'augmentation du taux de recyclage et l'utilisation de granulats de béton recyclé (**GBR**) dans de nouveaux bétons, il faut disposer aussi de déchets triés et de bonne qualité [11].

Cette section s'intitule « Granulats de béton recyclé » est se divise en trois parties :

Partie 1 : Techniques et matériaux de démolition ;

Partie 2 : Élaboration des granulats de béton recyclé ;

Partie 3 : Caractérisation des granulats de béton recyclé [11].

4.1.1. Techniques et matériaux de démolition

Les granulats de béton recyclé (**GBR**) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu'ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique... Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de

trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable [14].

Plusieurs études ont montré que la démolition sélective était techniquement et économiquement réalisable. Dans le cas d'une démolition complète, les déchets inertes représentent 94 % des déchets générés, mais, dans la pratique, 60 % de certains déchets non inertes restent associés aux déchets inertes (par exemple, restes de plâtre sur le béton, bois et plastiques non retirés des murs [13].

Si le recyclage et la valorisation des déconstructions « tout béton » dépasse 75 %, le taux n'est que de 12 % pour les déchets inertes mixtes. En France, cette situation devrait évoluer en raison de l'application des « Plans de Prévention et de Gestion de Déchets de Construction et de Démolition », qui imposent un diagnostic préalable à la démolition [14].

Différents facteurs influencent le choix de la technique ou de la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition [14] :

- La surface de travail disponible ;
- L'existence de réglementations locales ou nationales obligeant le tri des déchets ;
- L'existence de prescriptions environnementales (imposées par le Maître de l'Ouvrage) ;
- L'emplacement du chantier de démolition ;
- Le volume de démolition ;
- Le temps alloué pour réaliser la démolition.

Les techniques décrites ci-après ne peuvent être mises en œuvre que par des entreprises qualifiées, ayant compétences pour appliquer les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le voisinage [14].

4.1.1.1. Technique de démolition à l'aide d'outils à main

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lente et coûteux, mais il permet un bon tri s'il elle est bien fait.

4.1.1.2. Techniques de démolition à l'aide d'outils portés

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets, BRH sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.).

4.1.1.3. Démolition par dynamitage

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets.



Figure I.14: Démolition à l'aide d'une tenaille [14]



Figure I.15: Démolition par dynamitage [14]

4.1.2. Élaboration des granulats de béton recyclé

Les granulats de béton recyclé (GBR) produits industriellement proviennent généralement d'ouvrages démolis. Ils contiennent de ce fait une large variété de bétons de composition et de propriétés différentes associés à une plus ou moins grande proportion de corps étrangers (par

exemple, de la brique en terre cuite, des enrobés bitumineux, du verre, du plâtre, etc.). Il est alors nécessaire d'améliorer leur uniformité et de réduire au maximum les contaminants [15].

Actuellement, si l'on veut éviter le mélange des différents matériaux, la démolition doit se faire de façon très sélective [15].

Il existe plusieurs configurations de plateforme de recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Les procédés rencontrés actuellement comprennent généralement les opérations suivantes [15] :

- Extraction des éléments métalliques à l'aide de séparateurs magnétiques ;
- Élimination des éléments indésirables légers (plâtre, bois, plastique, etc.) par des systèmes de tri (séparateurs manuels, pneumatiques ou hydrauliques, etc.) ;
- Concassage/criblage ou scalpage, pour produire un matériau élaboré compatible avec l'utilisation finale recherchée ;
- Flocculation des argiles, par des techniques de flottation par exemple [15].

Le choix des différents traitements automatiques repose sur la masse de déchets à trier et sur leur composition, mais aussi sur les objectifs technicoéconomiques du producteur.

4.1.2.1. Concassage et criblage

Une combinaison de concasseurs à mâchoires et à percussion sont utilisés, suivie de deux broyages mécaniques et un criblage, afin de minimiser le mortier adhérent.

Les GBR produits en deux concassages (concasseur à mâchoires puis concasseur à marteaux) donnent de meilleurs résultats que lorsque les GBR sont obtenus par un concassage à mâchoires uniquement, car le mortier adhérent est réduit par le double concassage [15].

Finalement, aucun procédé spécifique n'a été distingué comme étant capable de produire des GBR ayant à la fois un spectre granulaire réduit et une bonne qualité. Plusieurs stratégies sont possibles, selon que l'on cherche à récupérer le maximum de granulats naturels, ou à maximiser la réutilisation des DCD.

4.1.2.2. Dépoussiérage

Le recyclage des GBR obtenus par broyage/criblage peut être amélioré si les éléments fins sont éliminés. La composition de cette fraction est difficile à contrôler et, entre autres artefacts induits, elle contient un pourcentage plus élevé de contaminants. La méthode de dépoussiérage la plus courante est le traitement par voie humide. Cependant, le lavage génère des eaux polluées et des

boues, qu'il est difficile de recycler davantage. L'alternative peut être le recours à un procédé de dépoussiérage à sec après concassage, si l'humidité des GBR le permet [15].

Il faut toutefois noter que le cas des sables de GBR n'est pas complètement similaire à celui des sables naturels concassés. En effet, les grains de GBR ont une minéralogie mixte (roche, béton, brique, etc.) et une composition hétérogène (pâte de ciment et éléments rocheux pour les grains de béton concassés, par exemple). Pour certains systèmes, ces différences peuvent améliorer l'efficacité du procédé de dépoussiérage, alors qu'elles peuvent la réduire pour d'autres.

4.1.2.3. Tri par la densité

Comme présenté ci-avant, les technologies de soufflerie sont de plus en plus souvent proposées pour séparer des matériaux légers comme le bois, le plastique, le papier, le carton... des matériaux plus lourds. Toutefois, un plus grand éventail de technologies est proposé. La concentration gravitaire est définie comme le processus par lequel des grains de tailles, de formes et de densités différentes sont séparés les uns des autres par la gravité ou par une force centrifuge. Ce processus de séparation est donc principalement basé sur la densité (gravité spécifique) [15].

4.1.3. Caractérisation des granulats de béton recyclé

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés d'un mélange intime de granulats naturels (GN) et de pâte de ciment durci (PCD) adhérente. Ils peuvent également contenir des impuretés (bitume, métaux, plastique, plâtre, sol, bois, etc.) présentes dans les Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Les GBR sont donc plus hétérogènes que les GN. En outre, en raison de leur composition particulière, ils possèdent des propriétés qui diffèrent sensiblement de celles des GN. En général, par rapport aux granulats naturels, les GBR [11] :

- 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 superplastifiants en raison des interactions potentielles avec les sulfates et les impuretés.

4.1.3.1. Mesure de la teneur en pâte de ciment durci (PCD) adhérente et de mortier adhérent (MA)

Lorsque le béton est concassé, une partie de la pâte de ciment reste attachée aux grains d'origine. Cette pâte de ciment adhérente est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels utilisés pour fabriquer le béton. Par conséquent, la qualité et le volume de PCD résiduelle sont très souvent à l'origine des moins bonnes propriétés des GBR, comparativement à celles des

granulats naturels : plus faible masse volumique, plus forte absorption d'eau, coefficient Los Angeles plus élevé, plus forte teneur en sulfates, etc. Connaître la teneur en PCD dans un GBR est alors nécessaire pour évaluer sa qualité [11].

Plusieurs méthodes ont été tentées pour réaliser cette quantification mais, vu la difficulté, elles n'ont pas réellement abouti. Des méthodes expérimentales se sont alors intéressées à la mesure de la teneur en mortier adhérent (MA). Le mortier adhérent est a priori plus facile à quantifier expérimentalement que la PCD, mais sa définition est plus ambiguë. Tout d'abord, elle dépend étroitement de la taille maximale choisie pour séparer mortier et béton (généralement 4 à 5 mm). Ensuite, le MA peut ne pas contenir que du mortier issu du béton d'origine, mais également des fragments du gravillon naturel libérés lors du concassage. Par conséquent, le MA dépend beaucoup de la méthode expérimentale utilisée pour sa détermination. Plusieurs procédés sont proposés dans la littérature pour mesurer en laboratoire la teneur en PCD ou en MA. Elles reposent sur des méthodes thermomécaniques, chimiques ou visuelles, voire sur la combinaison de plusieurs d'entre elles [11].

La teneur et les propriétés de la PCD dépendent de la composition du béton d'origine. Une plus forte proportion de ciment et d'eau dans la formule du béton se traduira par une plus grande teneur en PCD dans les GBR. Cependant, la PCD n'est pas distribuée de façon homogène au sein des différentes classes granulaires concassées. En effet, plusieurs études ont montré que le taux de MA diminue quand la dimension des granulats augmente. En outre, la distribution de la PCD selon les classes granulaires de GBR est largement influencée par le procédé de concassage. Les concassages successifs diminuent la teneur en MA des gravillons de GBR, mais augmentent concomitamment la quantité de fines de GBR [11].

4.1.3.2. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR

Les différentes normes et directives concernant les exigences chimiques des GBR pour leur réutilisation dans le béton sont centrées sur des propriétés spécifiques, telle la teneur totale en chlorures et en sulfates solubles (dans l'eau ou dans l'acide) contenues dans le mortier adhérent (MA), ou la présence de matières organiques, afin de statuer sur leur potentielle réutilisation.

Néanmoins, la connaissance d'autres caractéristiques chimiques et minéralogiques des GBR est aussi nécessaire, afin de prévenir certaines pathologies, comme la réaction alcali-silice et pour comprendre les mécanismes associés.

Des analyses DRX ont été effectuées sur des différents sables et gravillons de GBR, élaborées par un projet de recherche nommé RECYBETON [11] effectué sur quatre plateformes de recyclage identifiées 1 à 4. Ces résultats montrent que le quartz et la calcite (i.e. calcaire) sont les deux minéraux systématiquement présents. Avec une très forte intensité de pics, indépendamment du contexte géologique et géographique.

La forte teneur en quartz s'explique principalement par la présence systématique de sable siliceux alluvionnaire dans les bétons, et celle aussi de gravillons contenant du quartz. La forte teneur en calcite s'explique par deux origines : la présence de granulats calcaires et la carbonatation de la quasi-totalité de la portlandite initialement générée par l'hydratation du ciment. En effet, aucun pic décelable de portlandite n'a été observé sur les différents diffractogrammes. Les principaux minéraux identifiés (DRX) pour les différentes plateformes sont présentés dans le **Tableau 1.10**. Les silicates sont représentés principalement par des feldspaths K-Na, des plagioclases et du mica blanc. De la dolomite apparaît parfois, en plus de la calcite [16].

Tableau I.10 : Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents) [16].

Plateforme	Principaux minéraux identifiés par DRX à l'exclusion du quartz et de la calcite
1	Dolomite, Feldspaths K-Na (microcline/albite)
2	Micas (muscovite), Feldspaths K-Na (microcline/albite), chlorite
3	Dolomite et Feldspaths K, pics très faibles (microcline/albite)
4	Dolomite, Feldspaths K-Na

4.1.3.3. Masse volumique et absorption d'eau des GBR

En règle générale, les GBR ont une absorption d'eau supérieure et une masse volumique réelle inférieure que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la PCD. Jusqu'à présent, il n'existe pas de norme particulière pour mesurer la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des GBR. Les normes dédiées aux granulats naturels sont donc aussi utilisées pour les GBR [16]. Les propriétés physiques des GBR varient dans une large fourchette selon l'origine et la taille du GBR (sable ou gravillon). La masse volumique réelle moyenne de tous les résultats recueillis de la littérature est 2 327 kg/m³ pour les gravillons et 2 065 kg/m³ pour les sables de GBR. Pour Ab24, les valeurs sont 4,7 % pour les gravillons et 9,5 % pour les sables [16].

Néanmoins, Les protocoles utilisés pour les granulats naturels ne sont pas réellement adaptés pour les GBR. Car l'immersion des GBR peut entraîner un détachement partiel de la PCD. De même, le séchage à l'étuve à 105 °C pour obtenir la masse sèche peut éliminer une partie de l'eau liée aux hydrates de la PCD. Il existe des méthodes spécifiques pour les GBR. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de déterminer précisément l'absorption d'eau au tout début de l'expérience. Ces méthodes ont montré que, contrairement aux granulats naturels testés, l'absorption d'eau des GBR n'est pas toujours achevée après 24h d'immersion dans l'eau. Dans certains cas, jusqu'à 120 h sont nécessaires pour atteindre un équilibre stable [16].

4.1.3.4. Résistance aux chocs et à l'abrasion

Les recommandations de la norme européenne [NF EN 206/CN, 2014] pour désigner la catégorie de résistance à la fragmentation des gravillons recyclés pour une utilisation dans le béton sont basées sur le coefficient Los Angeles (LA), réalisé selon la norme [NF EN 1097-2, 2010] des gravillons naturels. En général, la valeur du coefficient Los Angeles mesurée sur les matériaux de construction recyclés est comprise entre 20 et 40. Elle est donc légèrement supérieure aux valeurs typiques des granulats naturels. C'est la teneur en mortier des GBR qui explique cette différence.

La figure I.16 présente des résultats réalisés par [16] différentes classes de GBR (4/6, 6/10, 10/14 et 14/20) soumises à l'essai Los Angeles, ainsi qu'un granulats concassé siliceux naturel (10/14) pris comme granulats de référence. Il faut rappeler que le nombre normalisé de rotations du cylindre est de 500 tours. Dans cette étude, pour évaluer la linéarité du comportement avec le nombre de tours, ce dernier a été varié entre 20 et 6 000.

Pour le granulats naturel, la linéarité entre la quantité de fines générées (passant à 1,6 mm) avec le nombre de tours est gardée jusqu'à 2000 tours. Le comportement est différent pour les diverses fractions de GBR. En effet, le taux de particules fines générées n'est pas linéaire. Par conséquent, on peut considérer que le mortier adhérent a été le premier à se fragmenter sous les impacts des boulets métalliques. Lorsque la teneur en mortier adhérent a diminué, le comportement des GBR devient alors comparable à celui du granulats naturel d'origine.

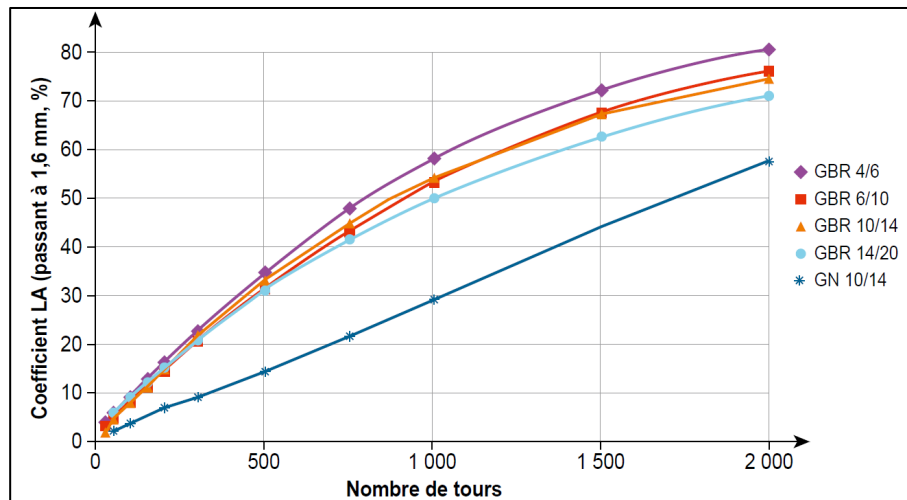


Figure I.16 : Passant au tamis de 1,6 mm pour un nombre différent de rotations dans le cylindre de la machine Los Angeles, pour un granulat naturel et un GBR de différentes tailles [11]

4.1.3.5. La porosité (P)

C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon les normes "NF P18 554, EN 1097-3" [17]. La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface [17].

4.1.3.6. Granulométrie

La granulométrie des éléments fins a été étudiée par l'analyse des particules au laser. Les diamètres des particules sont ainsi obtenus par diffraction (théorie de Fraunhofer). Cette analyse est réalisée sur les éléments de fraction inférieure à 500 μm (réalisée en milieu liquide), puis à 100 μm (réalisée en milieu sec). L'analyse successive sur les fractions granulaires étudiées permet d'obtenir les proportions d'éléments fins présents dans les granulats. Cet essai a été réalisé selon la norme [NF EN 933-1], sur les différents lots par tamisage par voie sèche sans lavage. Les granulats recyclés (GR) contenant du mortier tout autour du granulat parent ne sont pas lavés avant l'essai comme préconisé dans la norme. Comme les fines seront conservées dans la formulation des bétons et des mortiers, le lavage engendrerait leur évacuation. De plus, la présence de fines et d'éléments réactifs interdit une hydratation préalable [17].

4.2. Propriétés de béton à granulats recyclé

4.2.1. A l'état frais

Les aspects extérieurs du béton frais en GBR par rapport à celui en granulats naturelles (GN) sont similaires, Ils diffèrent par [3] :

- La masse volumique du béton recyclé à l'état frais diminue, car le GR est moins dense que le granulats naturels, et le volume d'eau efficace finit par croître jusqu'à 50% pour des taux de substitution importants ;
- Le dosage en ciment reste tout d'abord constant (à faible taux de substitution) puis augmente sensiblement.
- L'utilisation de GBR réduit la maniabilité du béton.

4.2.2. A l'état durci

Le béton de GR diffère du béton traditionnel par un certain nombre d'aspects. Pour de faibles taux de recyclage (jusqu'à 10/15%), les effets de l'introduction de GR sur les autres propriétés des bétons sont mineurs. Avec l'augmentation graduelle du taux de substitution des gravillons, et en remplaçant partiellement ou totalement le sable, on note les tendances suivantes [3] :

- Retrait au séchage augmenté jusqu'à 50% ;
- Fluage accru jusqu'à 50% ;
- Augmente la perméabilité à l'eau jusqu'à 2 à 3 fois pour 100% GBR ;
- Augment la carbonatation de profondeur inférieures à 6 mm à 91 jours
- Diminution la résistance à gel (perte de masse 37.9% pour le béton à GBR par rapport 12.6% dans le béton à GN après 300 cycles de gel-dégel) ;
- La résistance à la fatigue en flexion est légèrement dégradée ;
- La conductivité thermique tend à se réduire, le comportement au feu ne diffère guère de celui des bétons classiques [3].

4.2.2.1. Caractéristiques mécaniques

A. Traction

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée essai brésilien ou par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe [22]. Il semble généralement que la baisse de résistance associée au

remplacement du granulat naturel (GN) par un granulat recyclé (GR) dans le béton soit de 10% à 15% [23] [24].

Comme plusieurs autres propriétés du béton, on observe que la résistance à la traction du béton diminue et la porosité augmente lorsque le taux de remplacement des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR) augmente [25 ; 26 ; 27 ; 28 ; 29 ; 30].

B. Flexion

La résistance à la flexion des bétons est une propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. Dans plusieurs études [32], il a été rapporté que l'addition des GR dans le béton ne réduisait pas autant la résistance à la flexion par rapport à la résistance à la compression. La variation de la résistance à la flexion entre le béton de référence et le béton contenant des GR était négligeable dans certaines études et inférieure à 30% dans d'autres selon les variations de différents facteurs tels que la quantité de remplacement, origine et qualité de l'agrégat recyclé. La résistance augmentait avec le temps de durcissement comme dans le béton de référence [31]. Il a été observé que la résistance à la flexion diminue de 7.5 à 13.8% due au remplacement de 100% du GN par les GBR à divers âges [32]. Au même taux de substitution, ils ont observé une réduction de 5 à 21% de la résistance à la flexion à 28 jours [33]. Dans une autre étude ils ont observé une résistance à la flexion plus élevée pour le béton de GBR en utilisant des GBR de taille plus petite que pour un béton de GBR de taille plus grande, et dans certains cas la résistance à la flexion était plus élevée que celle du béton de référence [34].

C. Compression

La résistance à la compression d'un béton est un des paramètres fondamentaux employés pour évaluer la qualité d'un béton. La résistance à la compression est souvent considérée comme la propriété la plus importante du béton pour plusieurs raisons [22] :

- La résistance à la compression est généralement un bon indicateur de la qualité du béton, car elle est directement reliée aux propriétés de la pâte de ciment hydratée.
- La résistance à la compression est un élément essentiel de la conception structural et est généralement requise pour assurer la conformité.
- Plusieurs autres propriétés du béton, telle la résistance en traction, à la flexion et le Module d'élasticité, sont directement reliés à la résistance à la compression.

Cette propriété est aussi la plus étudiée dans le cas des bétons incorporant des granulats recyclés. On définit celle-ci comme la contrainte maximale que peut subir une éprouvette de béton avant sa rupture. L'impact du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé (GR) sur la

résistance à la compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement.

Il est généralement reconnu que pour une formulation traditionnelle du béton et un taux de remplacement de 100 % du granulat naturel (GN), on observe une diminution de la résistance à la compression. Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à l'âge de 28 jours du béton [35]. Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. La réduction de la résistance à 28 jours a été variée de 20 à 33% selon ces études [23 ; 36 ; 37 ; 38].

D. Module de Young

Le module d'élasticité est l'une des propriétés les plus touchées de bétons recyclés, même à des taux de substitution faibles en granulats recyclés [39]. Le module d'élasticité du béton recyclé a été signalé comme étant de l'ordre de 50-70% par rapport à celui du béton ordinaire, comme l'ont rapporté certains auteurs [40 ; 43, 41]. Ceux-ci ont constaté qu'avec des niveaux de remplacement en granulats recyclés de 20, 50 et 100% dans des bétons, les valeurs moyennes du module d'élasticité sont de 10, 20 et 40% respectivement inférieures à celles enregistrées pour un béton conventionnel [42]. Sur celle-ci on remarque que la perte de rigidité pour les bétons recyclés s'accroît davantage avec l'accroissement du rapport E/C. Une certaine corrélation se dégage entre les modules élastiques statiques du béton conventionnel et du béton recyclé lorsque la substitution en recyclés est partielle (20 et 50%) et elle devient médiocre lorsque le taux de remplacement est à 100%.

4.2.2.2. Durabilité

Chaque agent agressif dans l'environnement entourant une structure en béton peut s'infiltrer, diffuser et pénétrer à travers les pores contenus dans le béton selon des lois et mécanismes de transport. Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes aux bétons. L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur attribuer un domaine d'utilisation et l'absorption d'eau est la tare essentielle qui compromet la durabilité.

L'absorption d'eau par immersion et le volume total des pores sont considérés comme les meilleurs indicateurs de la longévité potentielle du béton que l'absorption par capillarité qui donne une indication macroscopique du réseau poreux puisque le béton n'est pas totalement en état de saturation d'eau. Une étude rapporte que le processus d'absorption d'eau d'un béton

recyclé est similaire à celui d'un béton conventionnel et obéit aux mêmes lois. Toutefois, les bétons recyclés se caractérisent par une plus forte capacité d'absorption d'eau [43]. Cela est dû à la taille plus grande des gros capillaires et à la proportion en volume plus importante des petits capillaires, ce qui les rend a priori plus vulnérables à la pénétration des agents agressifs. Ceux-ci sont sous forme d'eau, d'ions ou de gaz qui pénètrent dans le béton et peuvent changer la cinétique de dégradation du béton pendant la durée de vie de l'ouvrage. Les pathologies les plus abordées par la littérature pour le cas du BGR sont ; la carbonatation, l'alcali-réaction et le gel-dégel. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulats naturel, affecte davantage cette dureté, donc sa qualification [43]

A. La carbonatation

En raison de sa porosité plus élevée, la profondeur de carbonatation devrait être en principe plus importante pour un BGR que pour un BGN. Or, selon une étude faite sur le recyclage de granulats de béton recyclé et de granulats de maçonnerie, la profondeur de carbonatation diminue quand la quantité d'agrégats réutilisés augmente, présentant un meilleur comportement quand ce remplacement était 20% ou 50%. Même à 100% de remplacement, le niveau de carbonatation était pareil à celui observé pour un BGN. L'explication de ceci est le dosage en ciment plus important pour un BGR pour atteindre la résistance mécanique d'un BGN, ce qui fait accroître l'alcalinité du milieu. En plus de ceci, les granulats recyclés sont constitués en partie par du vieux mortier dans lequel le ciment peut contenir de l'hydroxyde de calcium qui augmente davantage l'alcalinité. Sur un autre plan, la saturation en eau (lors de l'absorption et un rapport E/C élevé) pourrait ralentir la diffusion du CO₂ et celle-là est importante lorsque le taux de remplacement en granulats de recyclage augmente [44].

B. Alkali réaction

La réaction alcali-grulats est une pathologie des bétons, qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages, les plus sévèrement exposées à l'humidité et se caractérise par la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un décollement à l'interface pâte-grulats et la formation de microfissures qui se matérialise en surface par une fissuration à multi orientation. Cette pathologie ne peut se produire que lorsque trois conditions soient réunies simultanément :

présence d'un granulat potentiellement réactif, des alcalins (Na^+ , K^+) en quantités suffisantes dans la solution interstitielle ($\text{pH} > 12,5$) pour maintenir une concentration en ions hydroxydes élevée et des conditions d'humidité relative excèdent 80-85% [45]. Pour le cas de la réutilisation des granulats de béton recyclé, très peu de sujets ont été trouvés dans la littérature sur le cas l'alcali-réaction. La pathologie ne peut se produire que si les granulats recyclés sont dès l'origine réactifs et celle-ci peut avoir lieu lorsque les granulats réactifs n'ont pas trouvé les conditions favorables à leur réaction avant la réutilisation (c'est à dire ils étaient en milieu sec ou par manque d'alcalins) ou bien venant du vieux mortier contenant encore une réactivité résiduelle dans la fraction sable [46].

C. Le gel-dégel

Un granulat ne sera pas sensible au gel s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macropores (qui jouent le rôle de bulles d'air). Le volume d'eau susceptible de geler ne doit pas excéder le volume des vides de l'air entraîné du béton. Cette condition se traduit par la nécessité d'avoir un apport E/C suffisamment faible, ce qui assure par la même une bonne résistance au béton qui peut mieux résister aux forces de dégradation induites par le gel. Le béton de granulats recyclés n'échappe pas à cette règle et il est plus exposé à de telles dégradations à cause du fort taux d'absorption d'eau par les granulats.

Des essais ont été menés dans le but d'améliorer la durabilité au gel des bétons de granulats recyclés par une reconfiguration de la composition, ou par des inclusions d'agents antigel. Selon [47], la méthode de l'air entraîné est la meilleure façon d'améliorer la résistance au gel des granulats recyclés, cependant, cette méthode affecte quelques propriétés physiques des bétons. [48], ont fait observer que les mauvais résultats de la résistance au gel des BGR sont obtenus par l'utilisation des granulats à l'état saturé ou sec et que ces bétons devenaient bons avec les granulats prémouillés préalablement.

5. BETON RECYCLE ARME

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons de GBR. Cependant, les recherches sur les éléments de structure réalisés avec ce type de béton sont encore rares. Peu d'études existent pour les poutres, les premiers travaux étant ceux de [18] et de [19]. Les résultats de ces études et les études ultérieures ont montrées, généralement, que la résistance ultime en flexion des poutres n'est pratiquement pas affectée par l'incorporation des GBR. On

sait cependant que le fluage des bétons de GBR est plus conséquent que celui des bétons de granulats naturels.

5.1. Adhérence entre armatures et bétons de GBR

L'adhérence acier/béton est une propriété importante qui contrôle les performances des ouvrages armés. Les premières recherches sont concentrées sur l'effet des granulats de béton recyclé (GBR) sur l'adhérence acier/béton, en utilisant des essais d'arrachement direct.

Les essais montrent qu'il n'y a pas de différence significative de résistance d'adhérence ultime entre bétons de GBR et bétons de granulats naturels. Le rapport entre adhérence et résistance à la traction peut être toutefois plus élevé pour le béton de GBR, en raison de sa plus faible résistance à la traction, comparativement au béton de granulats naturels. Les résultats des essais d'arrachement ont montré que, pour une même classe de résistance, l'adhérence et les mécanismes de ruine associés demeurent quasi-identiques entre bétons de GBR et bétons de granulats naturels [20].

Pour les essais de flexion sur poutres, les bétons de GBR ont montré une fissuration un peu plus dense, avec des fissures moins espacées, que les bétons de granulats naturels. Cependant, l'ouverture des fissures pour les deux types de béton est du même ordre de grandeur, quelle que soit la classe de résistance à la compression du béton (C25/30 ou C35/45). Les modestes différences observées entre bétons sont attribuées à la résistance à la traction des bétons de GBR, un peu plus faible que celle des bétons de granulats naturels. Mais les nombreuses similitudes de comportement permettent de conclure que les prédictions de l'Eurocode2 (EC2) restent valables pour les bétons de GBR étudiés, tant en matière d'adhérence acier/béton que de fissuration, et qu'elles ne remettent pas en cause le niveau de sécurité garanti par ce règlement [20].

5.2. Comportement flexionnel des poutres en GBR :

Mercado et al. (2018) [21] ont réalisés des essais de flexion quatre points sur quatre poutres fabriquées avec des bétons différents. Trois d'entre eux contenaient des GBR (30S30G, 0S100G, 100S100G), le quatrième était un béton témoin ne contenant que des granulats naturels (GN) (0S0G). La figure 1.17 présente les propriétés géométriques des poutres.

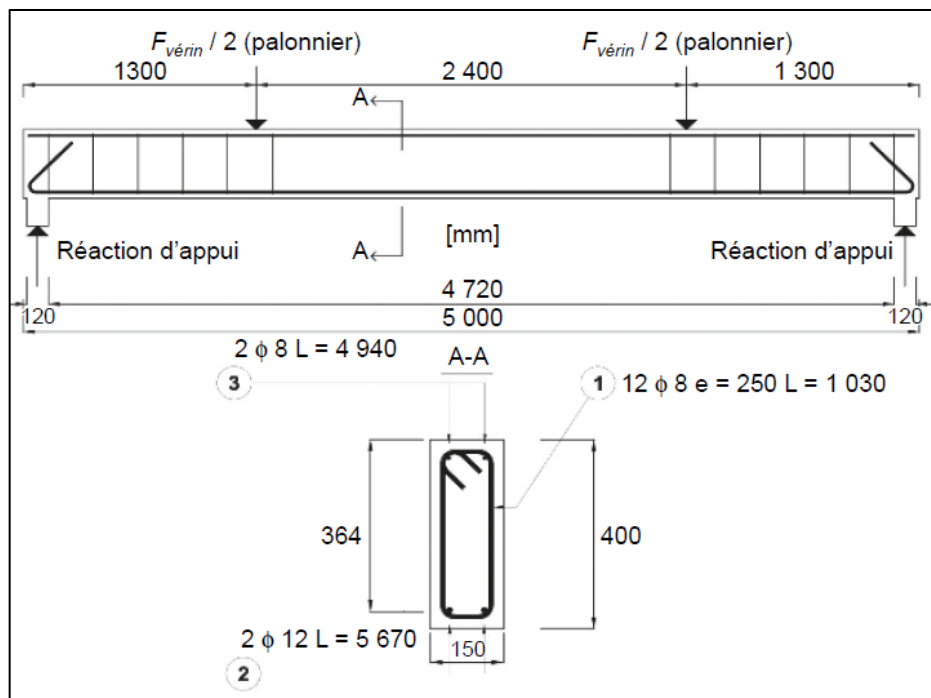


Figure I.17 : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage [21].

Les résultats expérimentaux présentés par cette étude montrent que l'incorporation des GBR a bien un impact sur la déformation des poutres considérées. En effet, une augmentation de la flèche, globalement proportionnelle à la teneur en GBR, a été constatée, en raison d'une altération du module d'élasticité du béton. Cependant, les quatre poutres testées se comportent de manière très similaire au stade de leur ruine, indépendamment de leur teneur en GBR.

D'autre part, l'espacement entre les fissures diminue lorsque la teneur totale en GBR augmente. Les deux types de béton ont apparemment une adhérence similaire, mais les bétons des GBR ont une résistance à la traction un peu plus faible. L'ouverture des fissures le long des poutres diminue également avec la teneur totale en GBR. La flèche à mi-portée augmente avec la teneur totale en GBR [21].

S. OMARY et al. (2014) [50] ont réalisés des essais de flexion quatre points sur deux poutres en béton BN(0SG0) et deux en BR100(100S100G) ont été mises en œuvre. La section transversale est de 20x25 cm et la longueur totale de ces poutres est de 1,70 m pour une portée entre appuis de 1,50 m. La figure 1.18 présente les propriétés géométriques des poutres.

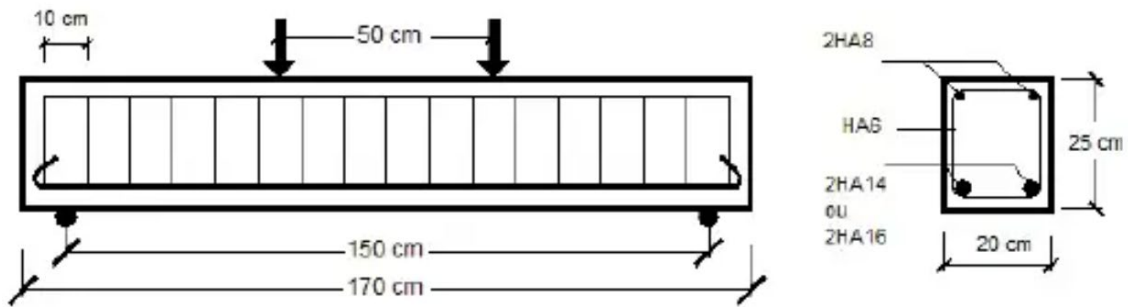


Figure I.18 : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage [50].

Le comportement à la flexion des poutres fabriquées avec un béton à graviers naturels (BN) et d'un béton à 100% graviers recyclés (BR100) a été étudié. Les deux bétons ont été formulés sur la base d'une résistance mécanique à la compression C35/45. En se basant sur les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du présent travail les conclusions suivantes peuvent être établies :

- A une résistance mécanique égale, le béton de graviers recyclés à une résistance à la traction et un module d'élasticité inférieurs à ceux du béton de graviers naturels.
- Les poutres en béton de graviers recyclés ont montré une résistance ultime légèrement inférieure aux poutres fabriquées en béton de graviers naturels et une flèche plus importante.

Wenhui Bai et al. (2010) [49] ont réalisés des essais de flexion quatre points sur quatre poutres fabriquées avec des bétons différents. Trois d'entre eux contenaient des GBR (50S50G, 70S70G, 100S100G), le quatrième était un béton témoin ne contenant que des granulats naturels (GN) (0S0G). La figure 1.19 présente les propriétés géométriques des poutres.

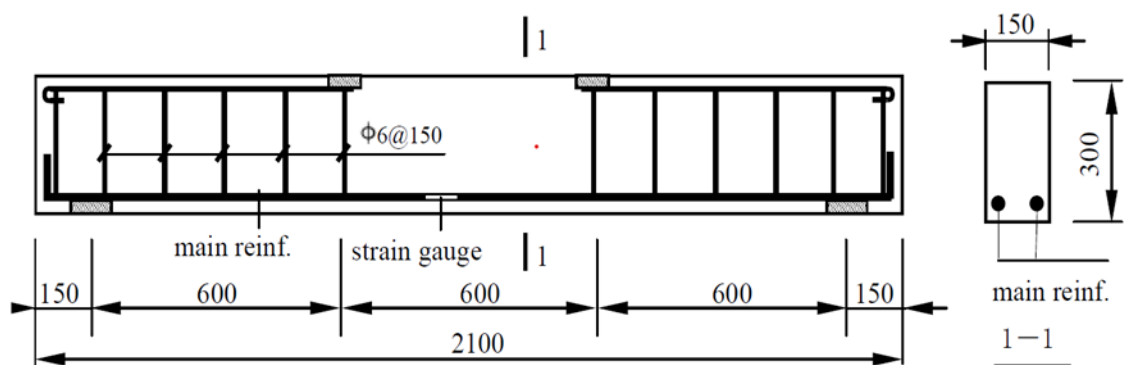


Figure I.19 : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage [49].

Les processus de flexion et de rupture des quatre poutres d'essai sont à peu près les mêmes, avec des caractéristiques évidentes de plasticité, de fissuration, de limite d'élasticité et de contrainte ultime. Toutes appartiennent à des poutres renforcées équilibrées à la rupture, c'est-à-dire que la section normale a une limite élastique en traction avant l'écrasement du béton dans la zone de compression. Après traitement des données expérimentales, les principaux résultats montrent que les granulats recyclés ont peu affecté le moment de fissuration et le moment fléchissant ultime des poutres. Le moment de flexion tend à diminuer lorsque le taux de substitution augmente [49].

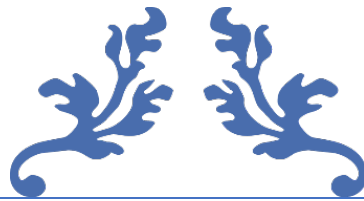
6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de déchets, y compris ceux qui peuvent être utilisés dans le secteur du génie civil par des procédés de démolition et de tri qui améliorent la qualité des déchets et les rendent réutilisables comme granulats.

L'idée actuelle de recycler les déchets de démolition de béton est une priorité très motivante d'un point de vue environnemental et économique. Certes, GBR est un gaspillage fastidieux, mais il peut être très utile. Le génie civil offre donc de nombreuses possibilités d'utiliser le béton pour les déchets de démolition, en le recyclant comme matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Les principales remarques issues de l'étude bibliographique sur les caractéristiques des GBR et les propriétés du béton de GBR sont :

- La principale caractéristique des granulats de démolition est la présence aléatoire du vieux mortier collé aux granulats ce qui complique leur caractérisation exacte. Cette présence est inévitable et les propriétés physico-mécaniques des granulats recyclés seront dépendantes du volume de ce mortier.
- Le fort taux d'absorption d'eau des granulats recyclés pourrait influencer le comportement mécanique des bétons.
- Les caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels, roulés ou concassés.
- Concernant le comportement de flexionnel des éléments en béton recyclé, il y a que peu de recherches dans ce domaine. Par conséquent des études expérimentales et théoriques sur le comportement des poutres en béton armé de granulats recyclées sont nécessaires afin de pouvoir prédire le dimensionnement normalisé de ces éléments.



**CHAPITRE II : MATERIAUX
ET METHODES
EXPERIMENTALES**



1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous décrivons le programme expérimental qui est devisé en trois volets. Le premier est consacré aux essais de caractérisation réalisés pour identifier les matériaux utilisés dans notre étude (ciment, sable alluvionnaire, sable recyclé, gravier naturel, gravier recyclé). Différents tests expérimentaux ont ensuite été réalisés. A l'état frais, caractérisé par l'essai d'affaissement du cône d'Abrams, et à l'état durci, caractérisé par les essais mécaniques de compression et de traction par flexion, et aussi par les essais non destructifs de scléromètre et d'ultrason. Le deuxième volet concerne la formulation du béton, à partir duquel les proportions de différents constituants du béton ont été déterminés pour l'ensemble des mélanges étudiés. Le troisième volet décrit la confection des poutres en béton armé, et la réalisation des essais de flexion à quatre points afin d'examiner le comportement flexionnel de ces poutres.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

L'étude expérimentale effectuée à portée sur une variété de bétons (07 mélanges au totale) pour lesquels les paramètres variables étaient le pourcentage de remplacement de gravier et de sable naturels par le gravier et le sable recyclé. Le tableau suivant regroupe les différents mélanges du béton étudiés.

Tableau II.1 : Désignation des mélanges du béton et le pourcentage de substitution de granulats recyclés.

N°	Désignation	Substitution volumique (%)	
		Sable de GBR	Gravillons de GBR
01	BT1.S0G0	0	0
02	BT2.S0G0	0	0
03	BS0G100	0	100
04	BS100G0	100	0
05	BS0G50	0	50
06	BS30G50	30	50
07	BS15G30	15	30

Pour le béton témoin (à base de gravier et de sable naturels seuls) on a utilisé deux mélanges : T1.0S0G et T2.0S0G. En plus de ciment et de sable naturel, le mélange T1.0S0G est composé de gravier naturel de la classe 8/15 seul. Cependant, le mélange T2.0S0G est composé de deux classes de gravier naturel 3/8 et 8/15.

Afin d'examiner l'effet de granulats recyclés sur le comportement du béton, on a utilisé deux mélanges avec un taux de substitution de 100%. Le mélange 0S100G avec 100% de gravier recyclé, et le mélange 100S0G avec 100% de sable recyclé. Pour les trois autres mélanges, on a choisi des taux de substitution de 30% et 50% pour le gravier recyclé. Et pour le sable recyclé, on a préféré d'utiliser juste la partie fine issue de concassage, qui représente juste 30% de la totalité de la masse broyée (voir Tableau II.2), sachant que ce pourcentage dépend de la méthode et des moyens de broyage.

Tableau II.2 : Pourcentage des masses en fonction des diamètres provenant de 5 kg d'agrégats recyclés.

Les diamètres	16-8 mm	8-5 mm	5-0 mm
Quantité (g)	2869.7	770.8	1515.4
Pourcentage (%)	55	15	30

3. IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

L'étude de la composition de béton consiste à définir le mélange optimal de ces différents constituants (ciment, gravier, sable, eau). Dans notre étude deux types de granulats sont utilisés (granulats naturels et granulats recyclés). Pour le renforcement de béton les aciers de ferrailage sont aussi utilisés.

3.1. Ciment

Le ciment utilisé est de type CEM II / 42,5 (Figure II.1) qui convient pour les travaux de toute nature d'éléments en béton armé. Il est certifié, conforme à la norme Algérienne [NA4422013].



Figure II.1: ciment utilisé.

Les propriétés chimiques et minéralogiques sont présentées aux tableaux II.3 ; II.4 et II.5.

Tableau II.3 : Analyse chimique du ciment utilisé.

Les composants	SiO ₂	AlO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	P à F
Valeur%	20.77	4.41	5.19	64.81	1.97	0.293	1.27	1.29

Tableau II.4 : Composition minéralogique du clinker.

Composants	Valeur %
Silicates tricalciques C3S	63.33
Silicates bicalciques C2S	11.80
Aluminates tricalciques C3A	2.91
Alumino ferritestetra calciques C4AF	15.79

Tableau II.5 : Essais physiques sur le ciment utilisé.

Finesse Cm ² /g	Consistance normal (%)	Début de prise (heure : min)	Fin de prise (heure : min)
4050	27	2 :40	3:45

3.2. Gravier naturel

Dans notre étude, deux classes de graviers sont utilisées : gravier 3/8 et 8/15. Ce gravier est provenu de la station de concassage Ouazzane à Laghouat, et dénoté GN.



Figure II.2: gravier naturel 8/15 utilisé.

3.3. Granulats recyclés

Se sont de gravier et de sable recyclés produit par la réutilisation des éprouvettes cylindriques de dimensions 16/32 (D=16cm et H=32cm) de béton ordinaire récupérées après les essais de compressions effectués par le CTC (Contrôle Technique de Construction de Laghouat) en utilisant un concasseur à mâchoire. Le gravier de béton recyclé dénoté GBR est de granulométries 5/15. Le sable de béton recyclé dénoté SBR est de granulométries 0/5.

Dans notre étude, deux types de sables sont utilisés :

3.3.1. Production des granulats recyclés

Pour la production de granulats recyclés de béton on utilise un ensemble de techniques conventionnelles de production de granulats naturels (concassage, criblage, lavage, etc.). Les étapes de production des granulats recyclés se résument comme suit :

- Récupérer les éprouvettes après les essais d'écrasement qui utilisent une presse hydraulique (Figure II.3).
- On utilise le marteau pour réduire la taille des gravats.
- Concassage à l'aide d'un concasseur à mâchoire pour produire des agrégats recyclés de différentes tailles (Figure II.4).
- Le granulat recyclé est tamisé pour obtenir deux grades de particules : le gravier 5/15, et sable 0/5 (Figure II.5 et II.7).
- Lavage et séchage du gravier recyclé. Il est recommandé de ne pas laver le sable recyclé, car il conduit à la perte des éléments fins de ciment durcie.



Figure II.3: Récupération des éprouvettes testées au laboratoire.



Figure II.4: Concassage du béton recyclé à l'aide d'un concasseur à mâchoire.



Figure II.5: gravier recyclé 5/15 utilisé.

3.4. Sables :

Dans notre étude, deux types de sables sont utilisés :

- Sable alluvionnaire : est un sable de granulométrie 0/5 dénoté SN provenant de la rivière d'Oued M'zi de Laghouat (Figure II.6).
- Sable de béton recyclé : est un sable de granulométrie 0/5 dénoté SBR produit par tamisage de gravier recyclé (comme expliqué dans la section précédente).



Figure II.6: Sable naturel utilisé.



Figure II.7: Sable recyclé utilisé.

3.5. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée c'est l'eau potable du réseau public de la ville de Laghouat.

3.6. Aciers de ferrailage :

Deux types d'armatures sont utilisées :

- Des armatures longitudinales de haute adhérence de diamètre de 8 mm, nuance Fe E400.
- Les cadres des armatures transversales en rondes lisses de diamètre de 6mm, nuance Fe E235.

4. LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX

4.1. Masses volumiques :

4.1.1. Masse volumique apparente : (selon la norme NF P18-555)

C'est la masse du matériau par unité de volume, qui combine grains et vides. Elle est exprimée en kg/m³, notée γ_{ap} , et est donnée par :

$$\gamma_{ap} = \frac{M}{V}$$

Avec : M : Masse du matériau (kg).

V : volume du récipient utilisé pour la masse (L).

Principe de l'essai :

Remplir un récipient d'un volume connu (Figure II.8), et en déterminer la masse.

$$M = M_T - M_R$$

Où M_R est la masse du récipient (kg).

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai des masses volumiques apparentes par la méthode de récipient pour les différents granulats utilisés :

Tableau II.6 : Masse volumique apparente des granulats utilisés.

N° d'essai	M_R (Kg)	V(l)	SN		SBR		GN		GBR	
			M_T (kg)	γ_{ap}	M_T (kg)	γ_{ap}	M_T (kg)	γ_{ap}	M_T (kg)	γ_{ap}
1	2,325	1	3,805	1480	3,471	1146	3,769	1445	3,513	1188
2			3,798	1473	3,473	1148	3,777	1452	3,521	1196
3			3,804	1479	3,479	1154	3,773	1448	3,514	1189
Moy			3,804	1477	3,474	1149	3,773	1448	3,516	1191



Figure II.8 : Essai masse volumique apparent par la méthode de récipient.

4.1.2. Masse volumique absolue : (selon la norme NF P18-555)

C'est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les Grains. Elle est exprimée en km/m^3 , notée γ_{ab} et donnée par :

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

Avec : M_s : Masse des grains solides (kg).

V_1 : Volume de l'eau initial (m^3).

V_2 : Volume total (eau + grains solides) (m^3).

Principe de l'essai :

À l'aide d'une éprouvette graduée on peut facilement déterminer cette valeur :

- On remplit l'éprouvette de liquide inerte vis-à-vis de l'échantillon étudié jusqu'au niveau V_1 .
- On rajoute une masse M_s de l'échantillon à étudier.
- Après déplacement de niveau de liquide, on lit le nouveau volume, soit V_2 .

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai des masses volumiques absolue par la méthode de l'éprouvette graduée pour les différents granulats utilisés :

Tableau II.7 : Masse volumique absolue des granulats utilisés

N° d'essai	M (Kg)	V_1 (l)	SN		SBR		GN		GBR	
			V_2 (l)	γ_{ab}	V_2 (l)	γ_{ab}	V_2 (l)	γ_{ab}	V_2 (l)	γ_{ab}
1	0.40	0.30	0,451	2649	0,461	2484	0,460	2500	0,464	2439
2			0,456	2564	0,459	2515	0,468	2380	0,468	2380
3			0,446	2740	0,463	2454	0,452	2631	0,472	2325
Moy			0,451	2651	0,461	2484	0,460	2504	0,468	2381

Les résultats, résumés dans le tableau II-7, montrent que les granulats de béton recyclé (GBR, SBR) ont des densités plus faibles que les granulats naturels (GN ; SN). Cela peut être dû à la porosité relativement élevée des granulats de béton recyclé.



Figure II.9: essai masse volumique absolue par la méthode d'éprouvette gradué.

4.2. Compacité et porosité :

La compacité (**C**) est le rapport de la masse volumique apparente à la masse volumique absolue.

La porosité (**P**) est complémentaire de la fraction dense et définit le pourcentage volumique des vides par rapport au volume total :

$$C(\%) = \frac{\gamma_{ap}}{\gamma_{ab}} * 100 \quad \text{et} \quad P = 100 - C(\%)$$

Tableau II.8: Compacité et porosité des granulats.

Les caractéristiques	Symbole	Granulats			
		SN	SBR	GN	GBR
Compacité	C(%)	59	49	50	47
Porosité	P(%)	41	51	50	53

Les résultats présentés dans ce tableau indiquent que les granulats recyclés sont plus poreux que les granulats naturels.

4.3. Analyse granulométrique :(selon la norme NF P94-056)

L'analyse granulométrique nous a permis de classer les tailles de particules qui composent les agrégats et les proportions approximatives de chaque espèce.

Les tableaux II.9 a II.13 représentent les résultats d'analyse granulométrique pour les différents granulats étudiés.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains consistant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé dans le tamis supérieur, et le tamisage des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis.



Figure II.10: Analyse granulométrique par tamisage.

Tableau II.9 : Analyse granulométrique de gravier naturel 3/8.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
10	3.93	3.93	0.262	99.738
8	67.54	71.47	4.76	95.24
6.3	267	338.47	22.56	77.44
5	452.08	790.55	52.70	47.3
3.15	597	1387.55	92.60	7.4
2.5	90.88	1478.43	98.66	1.34
Fond	20.08	1498.51	100	0.0

Tableau II.10 : Analyse granulométrique de gravier naturel 8/15.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	49	49	0.963	99.037
12.5	1143.5	1192.5	23.44	76.56
10	2173	3365.5	66.14	33.86
8	1104	4469.5	87.84	12.46
6.3	486	4955.5	97.4	2.6
5	102	5057.5	99.4	0.6
Fond	30.5	5088	100	0.0

Tableau II.11: Analyse granulométrique de gravier recyclé 5/15.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	22	22	0.577	99.423
12.5	979	1001	26.27	73.73
10	1321.5	2322.5	60.96	39.96
8	1045	3367.5	88.42	11.58
6.3	359	3726.5	97.79	2.21
5	49	3775.5	99.08	0.92
Fond	35	3810.5	100	0.0

Tableau II.12 : Analyse granulométrique de sable naturel.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
5	00.00	00.00	00.00	100
4	3.5	3.5	0.875	99.125
2	12.5	16	4	96
1	23	39	9.75	90.25
0.5	69	108	27	73
0.250	178	286	71.5	28.5
0.125	91	377	94.25	5.75
0.08	15	392	98	2
Fond	8	400	100	0.0

Tableau II.13 : Analyse granulométriques de sable recyclé.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
5	00.00	00.00	00.00	100
4	4.5	4.5	0.149	99.85
2.5	9	13.5	0.449	99.55
1.6	515	528.5	17.59	82.41
1.0	780	1308.5	43.54	56.46
0.5	645	1953.5	65.00	35.00
0.315	290	2243.5	74.66	25.34
0.250	187.5	2431	80.89	19.11
0.200	115	2546	84.72	15.28
Fond	459	3005	100.0	0.00

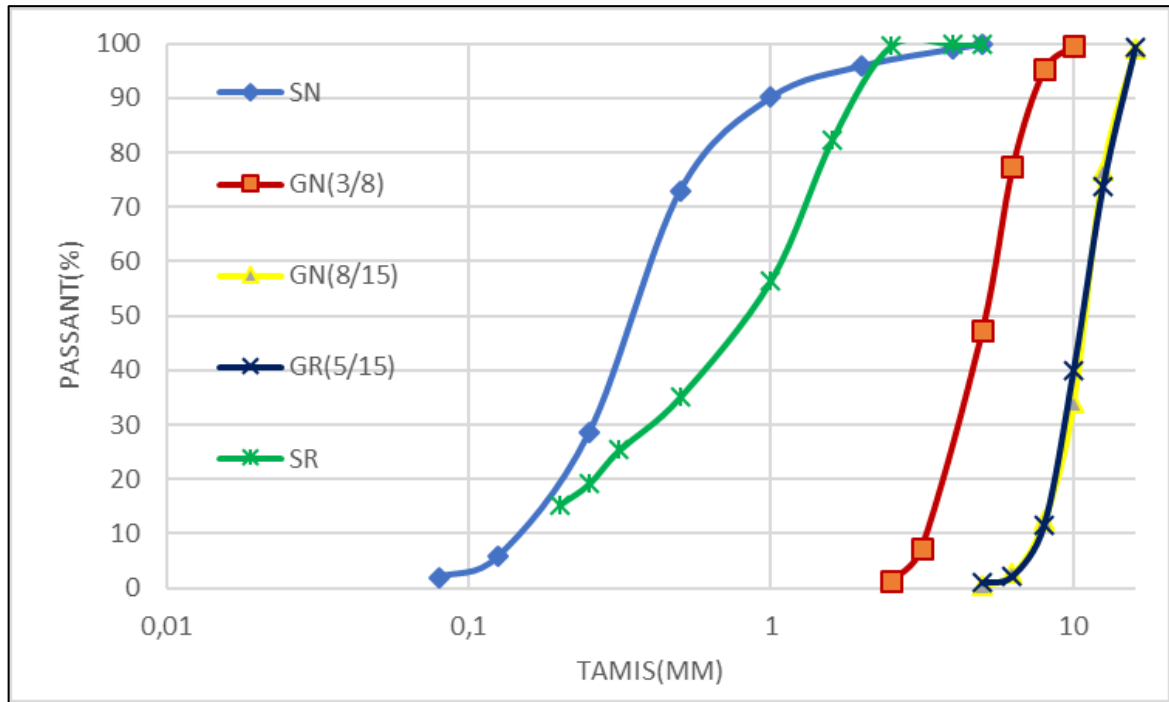


Figure II.11 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.

L'analyse des courbes granulométrique permet également de connaître certaines propriétés des granulats à savoir :

Le coefficient d'uniformité (Cu) : $Cu = D_{60}/D_{10}$

Le coefficient de courbure (Cc) : $Cc = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$

Avec : D_{60} : Diamètre approprié pour le passant 60%.

D_{30} : Diamètre approprié pour le passant 30%.

D_{10} : Diamètre approprié pour le passant 10%.

Si : $Cu > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée.

$Cu < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée

$1 < Cc < 3 \rightarrow$ matériau bien gradué (la continuité est bien répartie).

$Cc < 1$ ou $Cc > 3 \rightarrow$ matériau mal gradué (la continuité est mal répartie).

Tableau II.14 : Coefficients d'uniformité et de courbure des granulats

Granulats	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Cu	Cc	Observation
SN	0,17	0,25	0,4	2,35	0,92	Granulométrie étalée et mal graduée.
SBR	0,17	0,4	1,2	7,06	0,78	Granulométrie étalée et mal graduée.
GN 3/8	3,4	4	5,6	1,65	0,84	Granulométrie uniforme et mal graduée
GN 5/15	8	9,5	10,2	1,28	1,11	Granulométrie uniforme et bien graduée
GBR	8	9,5	10,2	1,28	1,11	Granulométrie uniforme et bien graduée

A partir de la Figure II.11 et le tableau II.14 on constate que les courbes granulométriques du gravier 8/15 naturel et recyclée sont proches. Leur granulométrie est uniforme et bien graduée.

Cependant, le sable naturel et recyclée représente une granulométrie étalée et mal graduée.

❖ **Module De Finesse (selon la norme NF P18-360) :**

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : (0.125 – 0.250 – 0.50 – 1.00 – 2.0 – 4mm.)

$$M_f = \frac{\sum \text{refus}(\%)}{100}$$

Lorsque M_f est compris entre :

$1.5 \leq M_f \leq 3.5$: → La proportion d'éléments répartis régulièrement et son utilisation donne un mélange cohérent.

$M_f > 3.5$ → La majorité des éléments sont rugueux et leur utilisation provoque un déséquilibre dans la plasticité.

- Pour le sable naturel : $M_f = 2.07$
- Pour le sable recyclé : $M_f = 2.85$

→ La proportion d'éléments répartis régulièrement et son utilisation donne un mélange cohérent.

4.4. Coefficient d'Absorption d'eau des granulats : NF P18-555

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon à la masse sèche de l'échantillon après immersion pendant 24 heures, et déterminé par la relation :

$$C_{AB} = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

Avec : M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

M_h : Masse de l'échantillon Saturé.



Figure II.12 : Essai d'absorption d'eau pour les granulats naturels (sables et graviers)

Tableau II.15: Résultats de l'essai d'absorption d'eau.

N° d'essai	M _a (g)	SN		SBR		GN		GBR	
		M _s (g)	C _{Ab}	M _s (g)	C _{Ab}	M _s (g)	C _{Ab}	M _s (g)	C _{Ab}
1	500	496,65	0,76	442	13.12	496.5	0.70	466	7,30
2		496,2	0,77	448	11.61	496	0.81	472	5.93
3		495.8	0,85	451	10.86	495	1,01	469	6.61
Moy		496.17	0,76	447	11.86	495.83	0.84	469	6.61

D'après les résultats présentés dans le tableau II.15, on constate que l'absorption d'eau des granulats recyclés (GBR et SBR) est supérieure à celle des granulats naturels, conformément à la littérature. Cela dû à la présence d'ancien mortier dans les granulats de béton recyclés.

4.5. Equivalent de sable : (selon la norme NF P18-597)

Le but de cet essai est de mettre en évidence la propreté du sable. L'équivalent de sable est le pourcentage de hauteur du précipité par rapport à la hauteur totale du liquide lave-glace.

On distingue l'équivalent sable visuel (E_{SV}) :

$$E_{SV} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \times 100$$

Et distingue l'équivalent sable du piston (E_{SP}) :

$$E_{SP} = \left(\frac{h'_2}{h_1} \right) \times 100$$

Avec : h₂ : La hauteur de sable pur mesurée par une règle.

h'₂ : La hauteur de sable pur mesurée par un piston.

h₁ : La hauteur de l'impureté plus la hauteur de sable pur

Le tableau II.16 présente la classification de sable selon leur degré de propreté.



Figure II.13 : essai de l'équivalent de sable

Tableau II.16: Classification des sables

Esv (%)	Esp (%)	Nature et qualité du sable
Esv<65	Esp<60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65≤Esv<75	60≤Esp<70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
75≤Esv<85	70≤Esp<80	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
Esv≥85	Esp≥80	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II.17 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.

N° d'essai	Equivalent de sable	SN	SBR
01	Esv(%)	91,2	79,56
	Esp (%)	82,5	72,70
02	Esv(%)	92.5	81.50
	Esp(%)	80.5	70.85
Moyen	Esv(%)	91.85	80.53
	Esp(%)	81.5	71.77

Sur la base des résultats obtenus expérimentalement et présentés dans le tableau II.17 et de la classification du sable donnée dans le tableau II.16, on peut conclure que le sable naturel (SN) utilisé est un sable très propre et que le sable recyclé (SBR) est un sable propre à faible proportion de fines. Ces fines représentent des particules de l'ancien ciment durci.

4.6. Essai Los Angeles :(selon la norme NF P18-573)

Chaque composant du béton affecte sa résistance en fonction de ses propriétés. L'une des propriétés les plus importantes du gravier qui a un effet direct sur la résistance du béton est sa dureté, qui est quantifiée par le test de Los Angeles.

Nous avons effectué le test de Los Angeles pour mesurer la différence entre la dureté ou la résistance à l'érosion des granulats naturels et granulats recyclés.

Le coefficient de Los Angeles est calculé selon la relation suivante :

$$C_{LA} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Avec : M_1 : Poids primaire (avant de le placer dans une machine de LA).

M_2 : Poids refus sur tamis 1,6 mm (lavé et séché le teste LA).

On choisit le nombre des boules à partir du tableau II.18 selon la classe granulaire de gravier. Pour notre cas la classe de gravier est 10-14 alors il faut utiliser 11 boulets. Le Tableau II.19 présente le classement de granulats selon leur degré de dureté (Coefficient LA).



Figure II.14 : essai de Los Angeles.

Tableau II.18 : Paramètres de l'essai Los Angles

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre des boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 – 6		7	3080±20	5000±2
6,3 – 10		9	3960±25	5000±2
10 – 14		11	4840±25	5000±2
10 – 25	10 – 16	11	4840±25	3000
	16 – 25	11	4840±25	2000
16 – 31,5	16 – 25	12	5280±25	2000
	25 – 31,5	12	5280±25	3000
25 – 50	25 – 40	12	5280±25	3000
	40 – 50	12	5280±25	2000

Tableau II.19 : Classification des granulats selon le coefficient Los Angles.

C_{LA}	Observation
$C_{LA} \leq 15$	Les granulats sont très résistants
$15 < C_{LA} \leq 25$	Les granulats sont bons
$25 < C_{LA} \leq 40$	Matériau utilisable
$C_{LA} > 40$	Les granulats sont peu résistants au choc

Tableau II.20 : Résultats de l'essai Los Anglos

	GN	GBR
Diamètre des granulats (mm)	8-16	8-16
Poids primaire M_1 (g)	5000	5000
Nombre de pellets	11	11
Poids refus M_2 (g)	3492	3237
Facteur de LA (%)	30	35

Il ressort des tableaux **II.19** et **II.20** que le coefficient de Los Angeles (C_{LA}) du gravier recyclé (GBR) est supérieur à celui du gravier naturel (GN). Cela est toujours dû au fait que le coulis durci adhère à l'agrégat naturel. En raison de sa grande porosité, la résistance de la pâte de ciment est inférieure à celle du granulat naturel. Cependant, les deux types de granulats sont de la même classe et peuvent être utilisés pour le béton.

Tableau II.21 : Récapitulation des résultats de caractérisation physiques des matériaux utilisés.

Essais de caractérisations		SN	SBR	GN	GBR
Masse volumique NF P18-555	γ_{ap} (kg/m ³)	1477	1149	1448	1191
	γ_{ab} (kg/m ³)	2651	2484	2504	2381
Compacité	C (%)	59	49	50	47
Porosité	P(%)	41	51	50	53
Analyse granulométrique NF P94-056	D_{max} (mm)	5	5	16	16
	Cu	2,35	7.06	1.28	1.28
	Cc	0.92	0.78	1.11	1.11
Module de finesse (M_f) NF P18-360	M_f	2.07	2.85	-	-

Coefficient d'Absorption NF P18-555	C_{Ab} (%)	0,76	11,86	0,84	6,61
Equivalent de sable (Es) NF P18-597	Esv (%)	91,85	80,53	-	-
	Esp (%)	81,5	71,77	-	-
Essai Los Angeles NF P18-573	C_{LS}	-	-	30	35

Le tableau II.21 récapitule les résultats obtenus de caractérisation des matériaux. Il ressort que les propriétés physiques des granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels. Les granulats naturels sont plus denses de 20% et plus durs de 33%. Cette modification des propriétés est due à la porosité des granulats recyclés nettement plus élevée que celle des granulats naturels (plus de 20% pour le sable et 6% pour le gravier). Cette porosité est due au mortier résidu de l'ancien béton adhérant aux graviers et les particules fines du ciment présentent dans le sable recyclé.

5. FORMULATION DU BETON

❖ Méthode de calcul de la composition du béton :

Dans notre étude on a utilisé la méthode de **DREUX GORISSE**, cette méthode consiste à définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Les quatre critères de base de cette méthode sont :

- L'ouvrabilité ou la plasticité désirée est fixée par l'affaissement au cône d'Abrams. Elle dépend :de la nature de l'ouvrage, de la difficulté de bétonnage, des moyens de serrage, etc...
- La résistance souhaitée (rupture en compression à 28 jours) est prise égale pour la valeur moyenne visée à la résistance caractéristique demandée majorée de 15%.
- La dimension maximale D_{\max} des granulats doit être fixée en premier lieu.
- La nature du ciment à utiliser doit tenir compte de l'agressivité du milieu ambiant.

a) Résistance visée :

Par sécurité, la résistance visée est majorée de 15% par rapport à la résistance que nous souhaitons obtenir. Ainsi, la résistance visée est obtenue comme suit :

La résistance désirée pour le béton à 28 jours est :

$$\sigma_{28} = 25 \text{ MPa}$$

La résistance visée vaut alors :

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times \sigma_{28} = 1.15 \times 25 = 28.75 \text{ MPa}$$

b) Consistance désirée :

Bien que le but soit l'étude d'un béton ordinaire de structures de bâtiments, on a opté pour un béton plastique d'affaissement au cône d'Abrams de 6 cm. Vu la disponibilité des moyens de vibration (vibration courante).

c) Dimensions maximales des granulats :

D'après l'analyse granulométrique des différents matériaux utilisés : granulats naturel et granulats recyclé, la dimension maximale choisie pour les différents mélanges est :

$$D_{\max} = 16 \text{ mm}$$

d) Détermination du rapport C/E :

$$\sigma'_{28} = G \times \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec : σ'_{28} : résistance moyenne en compression visée à 28 jour en MPa.

σ'_c : classe vraie du ciment à 28 jour en MPa.

E : dosage en eau en l/m³.

C : dosage en ciment en kg/m³.

G : coefficient granulaire donné par le tableau II.22.

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28}}{G \times \sigma'_c} + 0.5$$

Tableau II.22 : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}

Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	$D_{max} < 20$ mm	$20 < D_{max} < 31.5$	$D_{max} < 50$ mm
Excellent	0.55	0.6	0.65
Bonne	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

- Pour une qualité des granulats bonne et un diamètre maximal égale à $16\text{mm} < 20\text{mm} \rightarrow$
Le coefficient granulaire **G = 0.45**
- La classe vraie de ciment $\sigma'_c = 42.5 \times 20\% = 51$ MPa

Donc Le rapport :

$$\frac{C}{E} = 1.75$$

e) Dosage en ciment (C) :

L'abaque de la figure II.15 est utilisé pour estimer la quantité de ciment nécessaire en fonction du rapport C/E et de la maniabilité désirée.

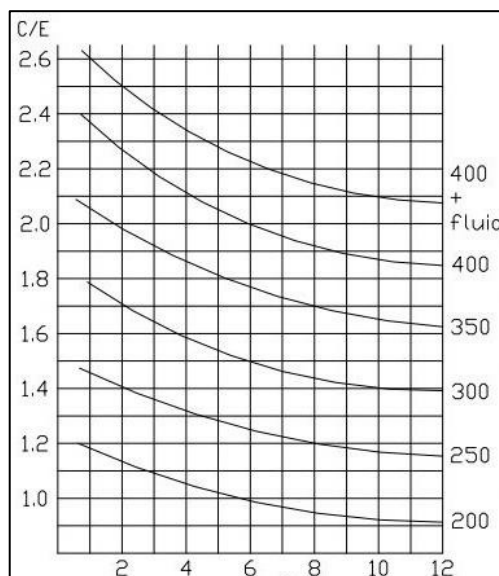


Figure II.15 : dosage en ciment en termes de C/E et l'affaissement.

La quantité de ciment optimale C est estimée à **375 kg/m³** de béton.

f) Détermination de la quantité d'eau (E) :

Une première estimation de la quantité d'eau E est dérivée du rapport C/E et de la quantité de ciment C. Cette quantité est ensuite corrigée en fonction de la taille de l'agrégat maximal D_{\max} à l'aide du tableau II.23.

$$\frac{C}{E} = 1.75 \rightarrow E = \frac{C}{1.75} \rightarrow E = 214.29 [l/m^3].$$

Si la taille maximale de l'agrégat ne dépasse pas 25 mm, le dosage d'eau doit être corrigé. Dans cette étude $D_{\max} = 16$ mm. Selon le tableau ci-dessous, la correction à apporter est +4% de l'eau ajoutée, soit :

$$E = 214.29 \times 1.04 = 222.86 [l/m^3].$$

Tableau II.23 : Correction sur le dosage en eau (%).

Dimension maximale des granulats D (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le Dosage en eau (%)	15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Donc :

$$C = 375 \text{ kg/m}^3, E = 222,86 \text{ L/m}^3 \text{ et } C/E = 1,68.$$

g) Courbe granulatoire de référence :

Sur le graphique d'analyse granulométrique, la composition de granulatoire de référence **OAB** est tracée. Où le point **O** est placé à l'origine du graphique. Le point **B** correspond à la dimension D_{\max} du plus gros granulat en ordonnée **100%**. Le point d'arrêt **A** à des coordonnées ainsi définie :

- En abscisse (à partir de la dimension D tamis) :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20\text{mm} : \text{L'abscisse est } X = D_{\max}/2 \rightarrow D_{\max} = 16\text{mm} < 20\text{mm} \rightarrow \mathbf{X = 8mm}$$

- En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_S + K_P$$

Dans cette étude, les granulats sont roulés, la puissance de la vibration est normale et le dosage en ciment C est de 375, on aura donc **K = 0**.

$K_S = (6 M_f - 15)$ avec M_f le module de finesse du sable : $M_f = 2.074 \rightarrow K_S = -2.556$.

$K_p = 0$ si béton non pompable.

Donc :

$$Y = 50 - \sqrt{16} + 0 - 2.556 + 0 \rightarrow Y = 43.44$$

Tableau II.24 : Valeur de terme correcteur K en fonction du dosage en ciment.

Vibration		Faible		Normal		Puissant	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+fluid ^t	-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

h) Coefficient de compacité :

Le coefficient de compacité γ estimé à l'aide du tableau II.25 permet de déduire la quantité des différents autres composants de la formulation. La compacité γ est définie comme le rapport entre le volume de solide et le volume total du béton.

Tableau II.25: les valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	serrage	Coefficient de compacité γ						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=10$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,780	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Pour une consistance plastique et vibration normale on aura par interpolation :

$$\gamma = 0.820$$

Cette valeur s'applique aux granulats roulés. Étant donné que notre sable est roulé et que le

gravier est concassé, il est nécessaire de corriger la compacité de l'ordre de -0,01.

Donc :

$$\gamma = 0.819$$

i) Dosage des granulats :

On trace les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire de premier, au point de 5% de la courbe du granulat suivant, d'ordonnée sont la figure suivante :

On lit alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la droite de partage. Les pourcentages en volume absolu de chacun des granulats G_1 pour le sable naturel et G_2 pour le gravier naturel sont :

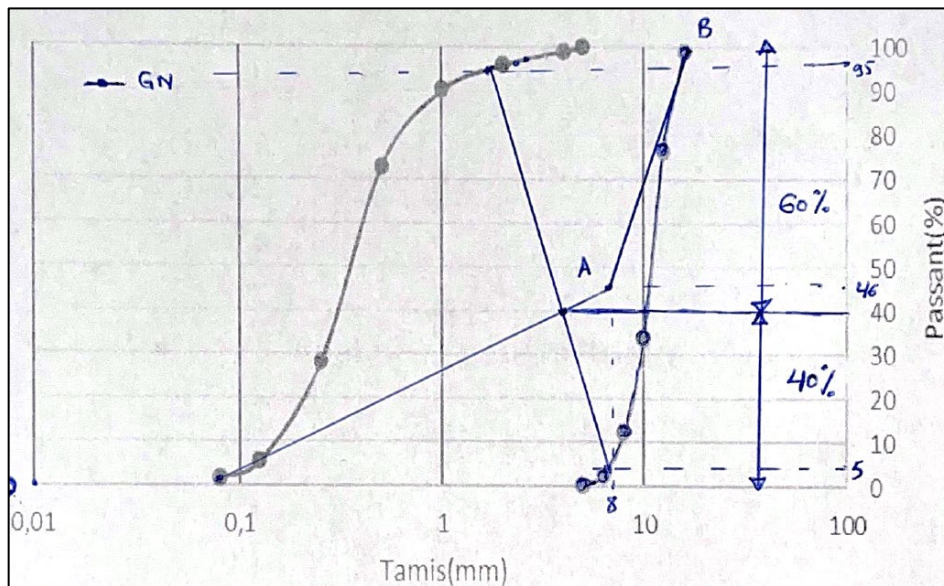


Figure II.16 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.

- $G_1 = 40\%$
- $G_2 = 60\%$
- Le volume absolu des grains de ciment (c) :

$$C = \frac{c}{\gamma_c}$$

Avec : C : le dosage en ciment = 375 kg/m^3

γ_c : Masse volumique absolu des grains de ciment = 3.1 g/cm^3

Donc :

$$C = \frac{375}{3.10} = 120.96 \text{ l}$$

- Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - c \rightarrow V = (1000 \times 0.819) - 120.96 \rightarrow V = 698.04 \text{ l}$$

D'où, les volumes absolus de chacun des granulats sont :

$$\text{Pour le sable naturel : } V_s = G_1 \times V = 40\% \times 698.04 = 279.2 \text{ l}$$

$$\text{Pour le gravier naturel : } V_G = G_2 \times V = 60\% \times 698.04 = 418.82 \text{ l}$$

Notons : γ_{abs1} et γ_{abs2} les masses volumiques absolues du sable et du gravier naturel respectivement.

Donc la masse de chacun des granulats sont :

$$M_s = G_1 \times \gamma_{\text{abs1}} = 279.2 \times 2.587 = 722.29 \text{ kg}$$

$$M_G = G_2 \times \gamma_{\text{abs2}} = 418.82 \times 2.587 = 1083.48 \text{ kg}$$

D'après ces résultats les principaux rapports des composants sont alors :

$$\frac{C}{E} = 1.68 \qquad \frac{E}{C} = 0.59 \qquad \frac{G}{S} = 1.5$$

Cette étude visait à préparer des compositions de béton avec six pourcentages différents d'agrégats recyclés. Le dosage des différentes matières sèches pour chaque formulation de béton est indiqué dans le tableau II.26 :

Tableau II.26: Le dosage des différentes matières sèches pour chaque formulation des bétons témoins

Matériaux	Composition / m ³			
	BT1SOGO		BT2SOGO	
	Volume (L)	Masse (Kg)	Volume (L)	Masse (Kg)
Ciment	120,97	375,0	120,97	375,0
VG	691,53		691,53	
Sable 0/5	276,61	713,7	276,61	713,7
Gravier 3/8	0,00	0,0	82,98	214,1
Gravier 8/15	414,92	1073,4	331,94	858,7
Eau totale	211,4	211,4	211,4	211,4
Eau absorbée	23,9	23,9	23,9	23,9
Eau efficace	187,5	187,5	187,5	187,5
Volume total	1000		1000	
G/S	1,50		1,50	
Eeff/C	0,50		0,50	
Etot/C	0,56		0,56	
Affaissement (cm)	6,5		7	

Tableau II.27: Le dosage des différentes matières sèches pour chaque formulation des bétons recyclés

Matériaux	Composition / m ³										
	BS15G30		BS100G0		BS0G100		BS0G50		BS30G50		
	Volume (L)	Masse (Kg)	Volume (L)	Masse (Kg)	Volume (L)	Masse (Kg)	Volume (L)	Masse (Kg)	Volume (L)	Masse (Kg)	
Ciment	121,0	375,0	121,0	375,0	121,0	375,0	121,0	375,0	121,0	375,0	
VG	691,5		691,5		691,5		691,5		691,5		
Sable 0/5	Naturel	235,1	606,6	0,0	0,0	276,6	713,7	276,6	713,7	193,6	499,6
	Recyclé	41,5	102,9	276,6	686,0	0,0	0,0	0,0	0,0	83,0	205,8
Gravier	Naturel	290,4	751,4	414,9	1073,4	0,0	0,0	207,5	536,7	207,5	536,7
Gravier	Recyclé	124,5	296,3	0,0	0,0	414,9	987,5	207,5	493,8	207,5	493,8
Eau totale		226,8	226,8	272,1	272,1	250,4	250,4	226,0	226,0	247,2	247,2
Eau		39,3	39,3	84,6	84,6	62,9	62,9	38,5	38,5	59,7	59,7
Eau efficace		187,5	187,5	187,5	187,5	187,5	187,5	187,5	187,5	187,5	187,5
Volume		1000		1000		1000		1000		1000	
G/S		1,48		1,56		1,38		1,44		1,46	
Eeff/C		0,50		0,50		0,50		0,50		0,50	
Etot/C		0,60		0,73		0,67		0,60		0,66	
Affaissement (cm)		6		6		6		6		6	

6. METHODE D'ESSAI

6.1. A l'état frais

L'essai que nous avons suivi permettant la mesure de l'ouvrabilité de béton c'est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme **NF P 18-451**.

L'essai porte le nom de son inventeur Duff Abrams. Pour le réaliser une plaque, un cône, et une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm sont utilisés. L'essai se déroule en suivant les étapes

suivantes :

Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque. Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige. Le cône est arasé avec une tige, et levé immédiatement verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler. L'affaissement du béton frais est en suit mesurer ;

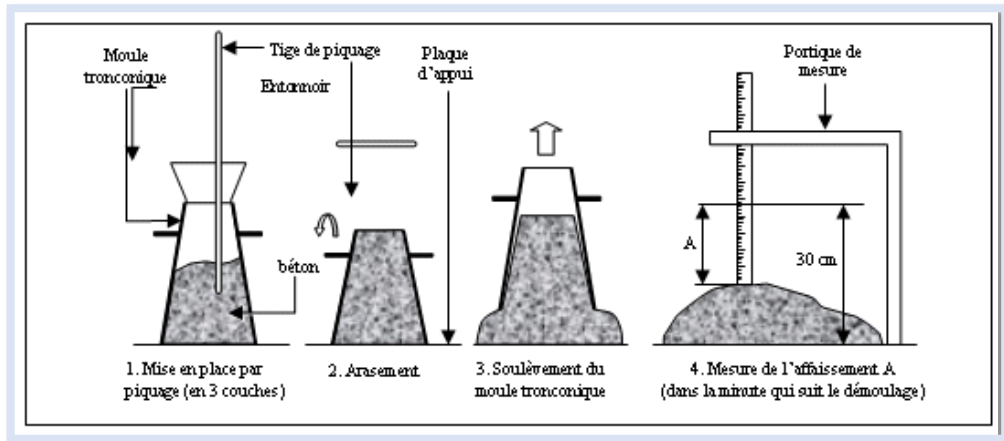


Figure II.17 : Essai de l'affaissement au cône d'Abrams



Figure II.18 : mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Les valeurs mesurées de l'affaissement était autour de $6,5 \pm 0,5$ mm.

6.2. A l'état durci

Afin de vérifier la qualité de béton formulé il est nécessaire de vérifier sa résistance mécanique à 28 jours, pour cela on a confectionné pour chaque gâché : 03 éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$), 02 éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$), et 03 éprouvettes cylindriques ($16/32 \text{ cm}$) (Figures II.19 à 21).

- Les éprouvettes cylindriques sont utilisées pour déterminer le module de Young et la résistance à la compression à 28 jours en utilisant les essais de scléromètre, de l'ultrason et l'écrasement par compression.
- Les éprouvettes cubiques sont utilisées pour les essais de compression à 7 jours.
- Les prismes sont utilisés pour les essais de traction par flexion et de compression à 28 jours.



Figure II.19 : les moules des prismes ($7*7*28\text{cm}^3$).



Figure II.20 : les moules des éprouvettes cylindrique (D=16cm, H=32cm).



Figure II.21 : les moules des éprouvettes cubique ($10*10*10\text{cm}^3$).

6.2.1. Confection des éprouvettes

- Les moules utilisés pour confectionner les différentes éprouvettes ont été huilé afin de faciliter le décoffrage.
- Le béton est mis dans des moules adéquats aux essais projetés et soumis à deux séries de vibration afin d'homogénéiser les constituants du mélange.
- On procède à la conservation de ces éprouvettes au laboratoire à une température de 25°C pendant 24 heures. Après le décoffrage, on les conserve dans l'eau jusqu'au jour du test (Figure II.25).



Figure II.22 : les éprouvettes cubique ($10*10*10\text{cm}^3$) après décoffrage.



Figure II.23 : les éprouvettes cylindrique (D=16cm, H=32cm) après décoffrage.



Figure II.24 : éprouvette prismatique ($7*7*28\text{cm}^3$) après décoffrage.



Figure II.25 : cure des éprouvettes.

6.2.2. Confection des poutres

Le but de ce travail est d'étudier l'effet de la substitution des granulats naturels GN par des granulats de béton recyclé (GBR) sur le comportement flexionnel des poutres. Les poutres en béton armé ont les dimensions de (10x15x140) cm. L'ensemble des poutres ont été ferrailé par 02 barres HA8 dans la zone tendue, 02 barres HA8 dans la zone comprimée, et des cadres $\varnothing 6$ espacées par 10cm. Cette section de ferrailage a été adoptée pour avoir un mode de rupture de flexion par traction.

Au totale, sept poutres ont été préparées. Après le coulage, les poutres ont été conservées 24 heures, puis décoffrées et déposées dans une chambre environnementale jusqu'à le jour de teste. La figure II. 26 présente la géométrie et le schéma de ferrailage des poutres.

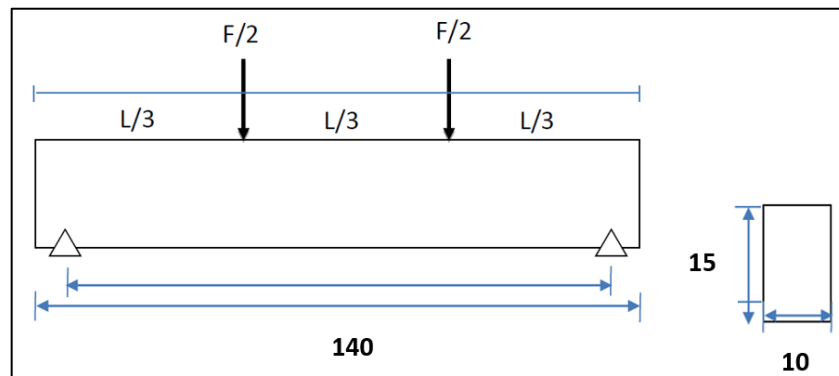


Figure II.26 : Géométrie de la poutre.

Afin de mesurer les déformations les poutres ont été instrumentées par quatre jauges de déformations : deux placées dans les barres d'acier, et deux dans le béton comprimé (Figures II.29 et 31).



Figure II.27 : Coffrage métallique des poutres.



Figure II.28 : Ferrailage des poutres.

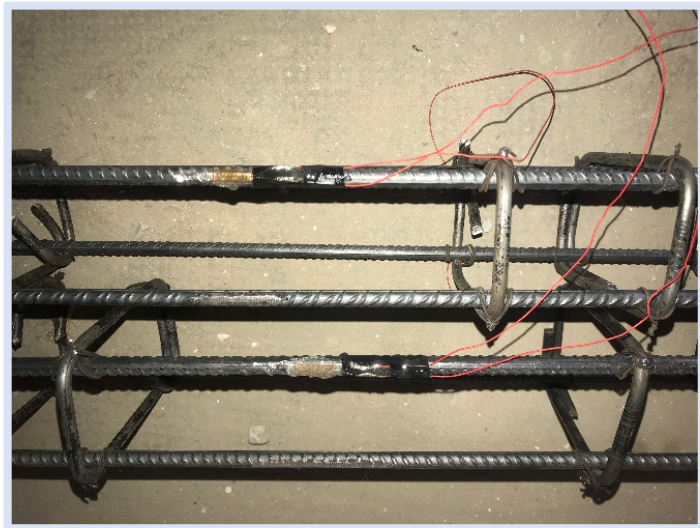


Figure II.29 : Instrumentation des barres d'acier par les jauges de déformations.



Figure II.30 : Décoffrage des poutres.

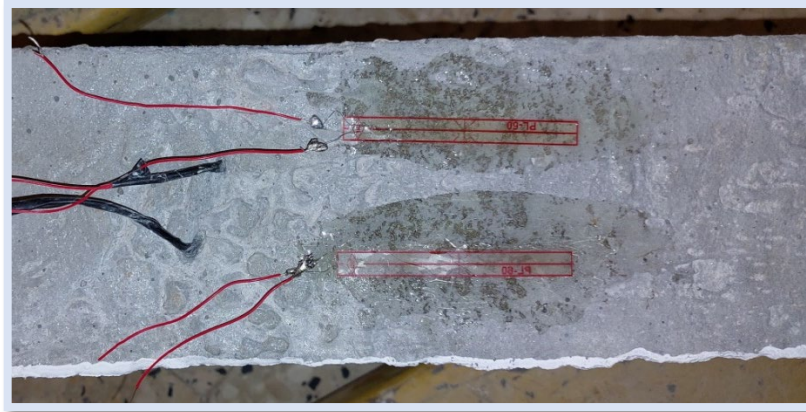


Figure II.31 : Instrumentation du béton par les jauges de déformations.

6.2.3. Essai de traction par flexion

Les éprouvettes prismatiques de section (7x7x28) cm sont soumises jusqu'à la rupture à l'essai de flexion par trois points. L'essai est réalisé au moyen d'une machine d'essais conformément à la norme l'EN 12390-4. La presse utilisée est menée d'un système d'acquisition. La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée, et la résistance de traction par flexion est calculée par :

$$f_r = \frac{3PL}{2a^3}$$

P : Force concentrée ;

a : côté de la section transversale de l'éprouvette (a=7 cm)

L : distance entre appuis (L = 3a).



Figure II.32 : Essai de traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm.

6.2.4. Essais de compression (Selon la NF EN 1290-3)

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes. Les éprouvettes étudiées sont chargées jusqu'à la rupture moyennant d'une presse hydraulique muni d'un affichage digital qui permet d'entrer la section de l'éprouvette et d'afficher la valeur de la charge de rupture. La résistance à la compression est calculée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Où :

F_c : Résistance en compression, elle doit être exprimée à 0,5 MPa près (N/mm²) ;

F : Charge maximale, exprimée en Newtons.

A : L'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, (A= 100 cm² pour les éprouvettes cubiques ; A= 200,96 cm² pour les éprouvettes cylindriques ; A= 7x7 cm² pour les moitiés des éprouvettes prismatiques préalablement écrasées par flexion)



Figure II.33 : Essai de compression sur les éprouvettes cubiques 10*10*10cm³.



Figure II.34 : Essai de compression sur les moitiés des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm

6.2.5. Essai scléromètre :

Cet essai permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive par la mesure de sa dureté au choc. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité. Elle permet de contrôler rapidement la régularité des bétons d'un ouvrage.

La mesure de la dureté de surface d'un béton est basée sur l'étude du rebondissement d'une bille d'acier projetée sur sa surface à l'aide d'un ressort taré. La hauteur du rebond qui augmente avec la dureté de surface du béton sollicité, est caractérisée par un indice sclérométrique. Une valeur peut aussi être obtenue en fonction de la différence d'énergie ou de vitesse avant et après l'impact de la masse, avec les nouveaux matériels. Il est possible de réaliser une cartographie des pièces auscultées afin de déterminer l'homogénéité de la surface. La norme NF EN 13791/CN permet d'évaluer des résistances en compression à partir de mesures d'indices sclérométriques à condition de procéder à un étalonnage sur des éprouvettes prélevées dans la structure et soumises à des essais de compression jusqu'à la rupture selon des règles précises.

En utilisant un abaque, l'indice sclérométrique est converti à une résistance à la compression. Cette dernière représente la résistance à la compression à 28 jours des éprouvettes 15x15x15cm. Dans notre étude, l'essai a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques 16/32. Les éprouvettes ont été fixées entre les plateaux de la presse en appliquant une légère force de compression (environ 10 kN) (voir figure suivante).



Figure II.35 : Essai de scléromètre réalisé sur des éprouvettes cylindriques (16/32).

6.2.6. Essai ultrason (essai d'auscultation dynamique) :

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à travers un élément en béton. La mesure de la vitesse du son dans le béton permet d'évaluer sa résistance de manière non destructive. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. Le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques en utilisant des capteurs (émetteur et récepteur) montés de part et d'autre des surfaces opposées de l'éprouvette testée. Plus la vitesse de son est grande, plus la qualité du béton est bonne (Tableau II.27).

Dans notre étude, on a utilisé les éprouvettes cylindriques pour cet essai (comme le montre la figure suivante).



Figure II.36 : Essai ultrason sur des éprouvettes cylindrique 16/32.

Tableau II.28 : Qualité de béton selon la vitesse de son

Vitesse de son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

La valeur de la vitesse permet de déterminer le module d'élasticité du matériau et sa résistance en compression grâce aux équations suivantes :

$$E_d = V^2 \times \gamma \times \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \text{et} \quad f_{C28} = 16,7e^{(E_d/122500)}$$

Avec :

E_d = Module d'élasticité du béton (MPa).

V = vitesse d'onde (Km/s)

ν = Coefficient de Poisson (= 0.2)

γ = Masse volumique du béton (Kg/m³)

6.2.7. Essai de flexion des poutres :

L'ensemble des poutres ont été soumises à l'essai de flexion à quatre points jusqu'à la rupture en utilisant le bâti montré dans la figure II.38. Deux LVDTs (Linear Variable Differential Transformer) de 50mm ont été utilisés afin de mesurer la flèche au milieu de la poutre et la largeur de la première fissure progressée avec l'augmentation progressive de la charge.

L'objectif de cet essai est d'investiguer l'influence des agrégats recyclés sur le comportement flexionnel et la capacité ultime des poutres en béton armé. La charge mécanique a été appliquée sous contrôle de déformation jusqu'à la rupture des poutres avec une vitesse de chargement de 7%. Après l'apparition de la première fissure, le test a été arrêté et mis à zéro afin d'installer le capteur des fissures. La presse est munie d'un système d'acquisition qui enregistre numériquement la charge, la flèche, la largeur des fissures et les déformations longitudinales des barres d'aciers et du béton comprimé.

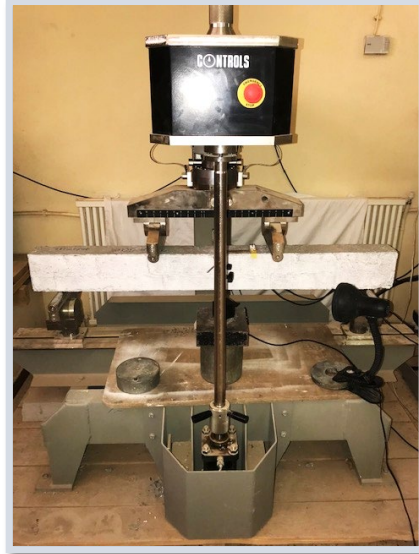


Figure II.37 : Essai de flexion simple quatre points sur les poutres 10*15-140cm³.



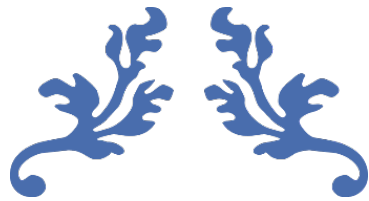
Figure II.38 : Emplacement des LVDTs.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons effectué les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette recherche à l'aide des essais les plus connues (Masse volumique, Analyse granulométrique, Absorption d'eau, Equivalent de sable, Los angeles. Ainsi, que la méthode de formulation, la détermination de la composition du béton, la confection des éprouvettes, la confection des poutres et la présentation des essais de caractérisation à l'état frais et durci.

On remarque que les propriétés du GBR diffèrent significativement des propriétés de l'agrégat naturel, en particulier la densité, la résistance à l'usure et l'absorption d'eau. En règle générale, les GBR ont une absorption d'eau plus élevée et une masse volumique plus faible que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la PCD.

La mesure de l'absorption d'eau est particulièrement importante car elle détermine la quantité d'eau efficace (E_{eff}) dans le béton (cette quantité se référant à l'eau présente dans la pâte fraîche de ciment, à l'exclusion de l'eau absorbée par les granulats) et influe aussi sur l'ouvrabilité du béton frais et la formation de réseaux poreux du béton. Par conséquent, elle influe aussi sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci.



CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS



1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les résultats de l'étude expérimentale sont présentés et analysés. En premier lieu, on a présenté les résultats de caractérisation du béton durci effectués par les essais destructifs et non destructifs en tenant compte le taux de substitution des granulats recyclés. On seconde lieu, on a présenté les résultats des essais de flexion à quatre points des sept poutres présentant les sept mélanges étudiés. Le comportement flexionnel est étudié en termes de la flèche, ouverture des fissures, déformations du béton comprimé, et déformations des aciers tendus. A la fin le mode de fissuration de différentes poutres est examiné.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Résistance à la compression :

2.1.1. Résultats à la compression à jeune âge :

L'essai de compression a été effectué sur des éprouvettes cubiques 10x10x10. Cet essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton à 7jours. Deux éprouvettes ont été testées pour chaque mélange. Les résultats obtenus sont présentés au tableau III.1.

Tableau III.1: Résultats de l'essai de compression à 7jours.

Béton	f_{c7} [MPa]	%
BT1S0G0	21,28	
BT2S0G0	28,38	33%
BS0G100	19,42	-9%
BS100G0	17,7	-17%
BS0G50	21,23	0%
BS30G50	18,71	-12%
BS15G30	19,64	-8%

D'après les résultats présentés dans la figure III.1 et tableau III.1, on remarque que la résistance à la compression du béton à 7jours a diminué par rapport à celle du béton témoin (**BT1S0G0**). Cette réduction est de l'ordre de $10\pm 2\%$ pour l'ensemble de mélanges selon le taux de substitution en gravier de GBR. Cependant, le mélange avec de sable recyclé à 100% (**BS100G0**) cette résistance a diminué par 17%. Par conséquent, l'impact d'incorporer le sable recyclé dans le béton avec des taux de substitution majeur sur la résistance du béton a jeune âge est considérable.

Les mélanges **BS0G50** et **BS15G30** donnent des résultats comparatifs au béton témoin **BT1**.

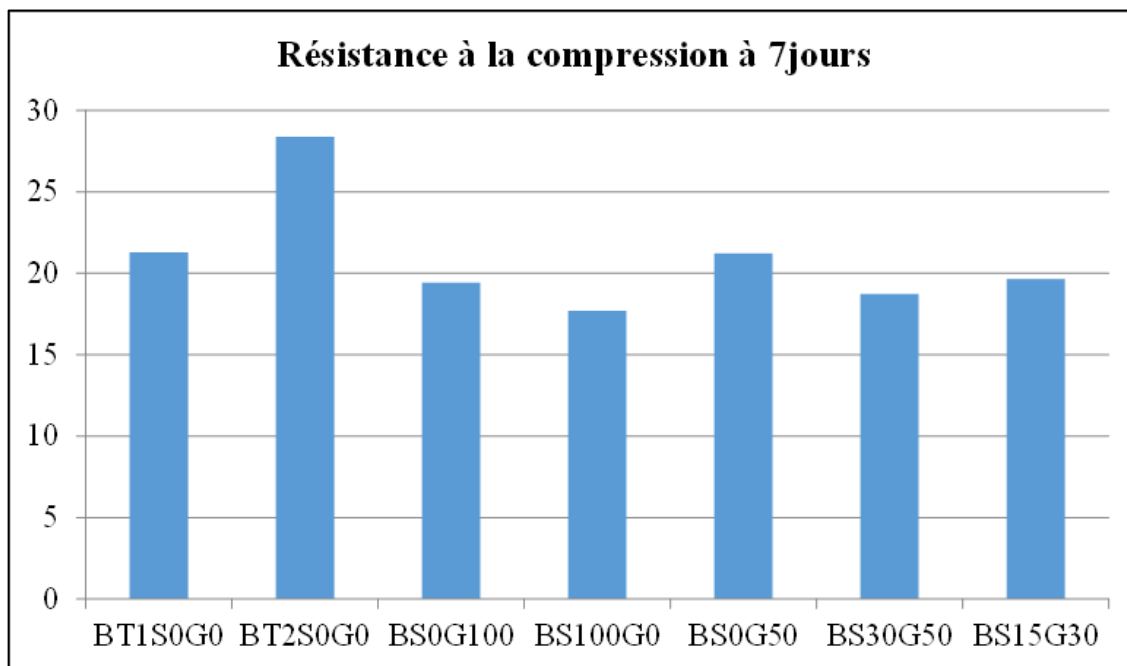


Figure III.1: Résistance à la compression de béton à base de GBR à 7 jours.

2.2. Résistance mécanique à 28 jours :

La résistance mécanique à 28 jours est caractérisée par la résistance à la compression et la résistance à la traction. Deux types d'essais ont été réalisés :

a) Essai de traction par flexion :

Cet essai a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ à 28 jours. Ces essais ont pour but d'évaluer la résistance à la traction du béton (σ_{bt}). Trois éprouvettes ont été testées pour chaque mélange. Les résultats obtenus sont présentés au tableau III.2.

b) Essai de compression :

Cet essai a été réalisé à 28 jours sur les moitiés des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$. Cet essai a pour but d'évaluer la résistance à la compression du béton (σ_{bc}). Les résultats obtenus sont présentés au tableau III.2

Tableau III.2: Résistance à la compression et à la traction par flexion à 28jours.

Béton	σ_{bt} [MPa]	%	σ_{bc} [MPa]	%
BT1S0G0	4,69		32,14	
BT2S0G0	4,72	1%	36,41	13%
BS0G100	3,88	-17%	29,33	-9%
BS100G0	3,65	-22%	26,73	-17%
BS0G50	3,71	-21%	30,79	-4%
BS30G50	2,52	-46%	29,75	-7%
BS15G30	3,8	-19%	30,95	-4%

Les résultats présentés dans la figure III.2 et le tableau III.2 montrent en premier lieu, que le béton témoin 2 (**BT2S0G0**) est plus performant que le béton témoin 1 (**BT1S0G0**), ceci grâce à la présence de gravier 3/8 qui a améliorée la compacité du béton. On seconde lieu, on constate que la présence des granulats recyclés conduit à la réduction de la résistance à la compression du béton à 28 jours proportionnellement au taux de substitution. Cette réduction est de l'ordre de 9% pour un taux de substitution de gravier de 100%. Cependant, elle est de l'ordre de 4% pour les mélanges (**BS0G50**) et (**BS15G30**). D'autre part, on remarque que la présence de sable recyclés dans le béton a un effet remarquable sur la réduction de sa résistance. Cette réduction est de l'ordre de 17% pour un taux de substitution de sable de 100%. Il est évident que la résistance à la compression du béton dépend de la dureté de ses graviers. Vu que les graviers de GBR ont une dureté plus faible que le gravier naturel, leur emploi dans le béton conduit à la réduction de sa résistance mais elle est acceptable.

Pour la résistance à la traction, la substitution des granulats naturels par les granulats GBR conduit généralement à une réduction de 20%. Ceci est expliqué par la présence des particules fines dans le sable recyclé ayant une absorption importante. Par conséquent, le malaxage demande une quantité d'eau totale considérable. L'évaporation de cette quantité après le durcissement du béton le rendre poreux, ce qui conduit à la diminution de sa résistance à la traction.

On conclut que les taux de substitution choisis pour les mélanges (**BS0G50**) et (**BS15G30**) semblent être appropriés.

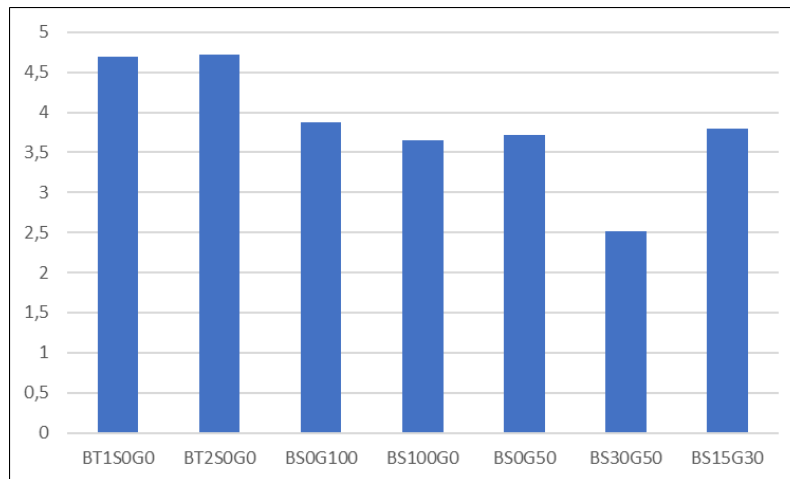


Figure III.2: Résistances à la traction à 28jours du béton à GBR.

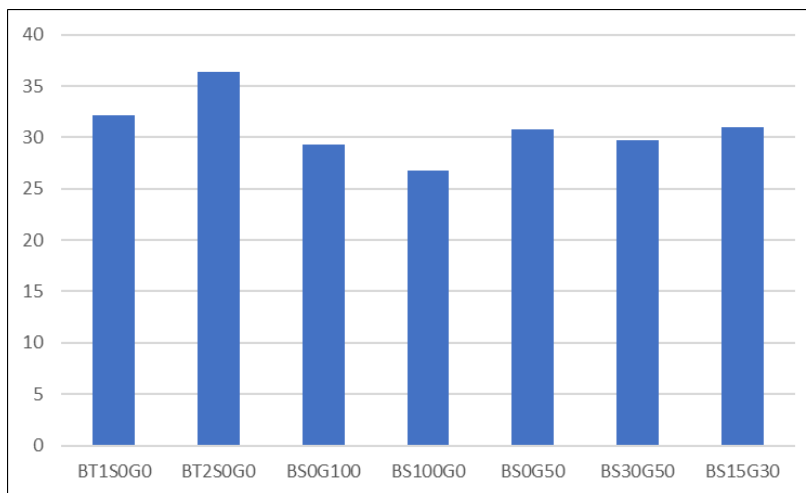


Figure III.3: Résistances à la compression à 28jours sur les moitiés des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm.

2.3. Essai aux ultrasons :

L’essai aux ultrasons a été effectué à 28jours sur des éprouvettes cylindriques (16/32cm). Cet essai a pour but de déterminer la vitesse de propagation d’ondes sonores longitudinales à travers les cylindres pour estimer la résistance à la compression du béton et son module d’élasticité (module de Young) selon les équations suivantes :

$$E_d = V^2 \times \gamma \times \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \text{ et } f_{C28} = 16,7e^{(E_d/122500)}$$

Avec :

E_d = Module d’élasticité dynamique (MPa).

V = vitesse d’onde (Km/s)

ν = Coefficient de Poisson (0.2)

γ = Masse volumique du béton (Kg/m^3), évaluée après avoir pesé les éprouvettes cylindriques.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant.

Tableau III.3: Résultats de l'essai ultrasonique à 28jours.

Béton	Éprouvette	V[Km/S]	M[Kg]	γ [Kg/m ³]	E _a [MPa]	f _{c28} [MPa]
BT1S0G0	1	4,460	14,751	2293,83	41065,21	23,35
	2	4,480	15,115	2350,44	42456,78	23,62
	3	4,500	15,236	2369,25	43179,63	23,76
	Moyenne			2337,84	42233,88	23,57
BT2S0G0	1	4,550	14,966	2327,27	43362,21	23,79
	2	4,510	15,089	2346,39	42953,29	23,71
	3	4,480	14,969	2327,73	42046,68	23,54
	Moyenne			2333,80	42787,40	23,68
BS0G100	1	3,950	14,439	2245,32	31529,29	21,60
	2	4,060	14,460	2248,58	33358,25	21,93
	3	4,020	14,409	2240,65	32588,84	21,79
	Moyenne			2244,85	32492,13	21,77
BS100G0	1	4,040	14,165	2202,71	32356,55	21,75
	2	3,950	14,111	2194,31	30813,06	21,48
	3	3,990	14,012	2178,92	31219,71	21,55
	Moyenne			2191,98	31463,11	21,59
BS0G50	1	4,350	14,696	2285,28	38918,9	22,95
	2	4,290	14,709	2287,30	37886,16	22,75
	3	4,370	14,674	2281,86	39218,80	23,00
	Moyenne			2284,81	38144,97	22,80
BS30G50	1	4,230	14,486	2252,62	36275,39	22,46
	2	4,190	14,558	2263,82	35769,48	22,36
	3	4,090	14,490	2253,25	33923,29	22,03
	Moyenne			2256,56	35322,72	22,28
BS15G30	1	4,180	14,848	2308,92	36308,09	22,46
	2	4,320	14,839	2307,52	38757,44	22,92
	3	4,300	14,921	2320,27	38611,60	22,89
	Moyenne			2312,23	37892,37	22,75

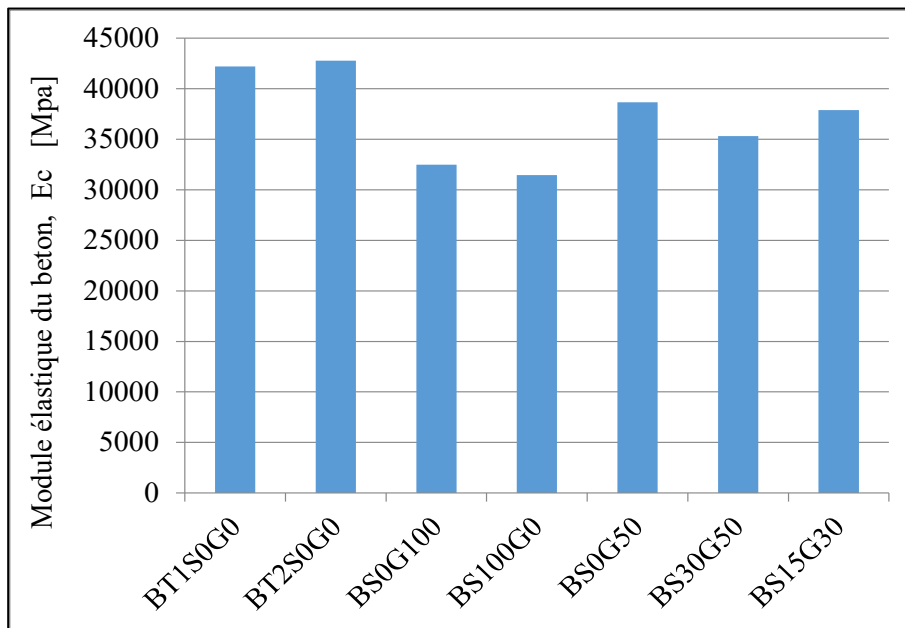


Figure III.4 : Module élastique du béton évalué par l'essai aux ultrasons à 28jours.

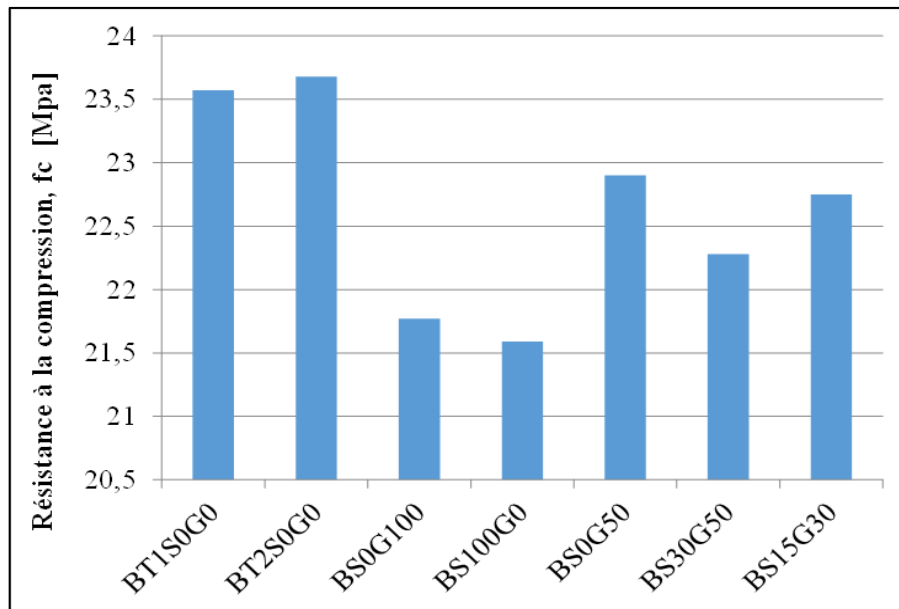


Figure III.5 : Résistance à la compression du béton évaluée par l'essai aux ultrasons à 28jours.

Les résultats de la figure III.3 montrent que module d'élasticité du béton à base de granulats recyclée est inférieur à celui de granulats naturels. Ce qui signifie que la déformabilité de ce nouveau béton est plus grande. Ceci est probablement dû à la fragilité des GBR à cause de la présence de la pâte de ciment durci.

2.4. Essai au scléromètre :

Des essais au scléromètre à 28jours ont été effectués sur les éprouvettes cylindriques (16/32cm). Ces essais ont pour but de trouver une estimation à la résistance de compression du béton. À la fin de ces essais on a réalisé les essais destructifs par écrasement d'éprouvette sous une charge appliquée jusqu'à la rupture pour déterminer la résistance à la compression.

Le tableau III.4 regroupe les résultats de l'indice sclérométrique I_s , les valeurs de résistance déduit par les abaques de scléromètre, et les résistances obtenues par les essais d'écrasement.

Tableau III.4: Résultats de l'essai de scléromètre et de l'essai de compression à 28jours.

Béton	Éprouvette	I_s	f_{c28} [MPa] par scléromètre	f_{c28} [MPa] par écrasement
BT1S0G0	1	29,8	23±6,25	21,31
	2	31,5	26.5±6,25	23,28
	3	30,5	25±6,25	28,16
	Moyenne		24.83±6,25	24,25
BT2S0G0	1	29,9	24±6,25	32,65
	2	30	24±6,25	31,42
	3	29,7	23±6,25	32,40
	Moyenne		23,67±6,25	32,15
BS0G100	1	28,5	21,6±6,25	18,00
	2	30,6	25,5±6,25	23,35
	3	27,5	20±6,25	21,10
	Moyenne		22,37±6,25	20,77
BS100G0	1	28,4	21,5±6,25	23,63
	2	26	18±6,25	21,23
	3	27,1	19,5±6,25	23,90
	Moyenne		19,67±6,25	22,92
BS0G50	1	29,5	23±6,25	28,57
	2	30,1	24±6,25	17,90
	3	29,9	23,5±6,25	18,97
	Moyenne		23,50±6,25	21,81
BS30G50	1	28,1	21±6,25	19,31
	2	30,2	24,5±6,25	19,07
	3	30	24±6,25	20,30
	Moyenne		23,17±6,25	19,56
BS15G30	1	29,8	23±6,25	25,97
	2	29,2	22,5±6,25	22,70
	3	31,2	26±6,25	29,15
	Moyenne		23,83±6,25	25,94

La figure III.5 présente une comparaison entre les résultats obtenus de trois types d'essais. On constate que les essais non destructifs donnent des résultats très proches à la résistance caractéristique du béton obtenue par l'essai normalisé d'écrasement, et ceci pour presque l'ensemble des mélanges. Par conséquent, les essais non destructifs peuvent être aussi utilisés pour trouver une estimation de la résistance à la compression du béton à granulats recyclés à 28 jours.

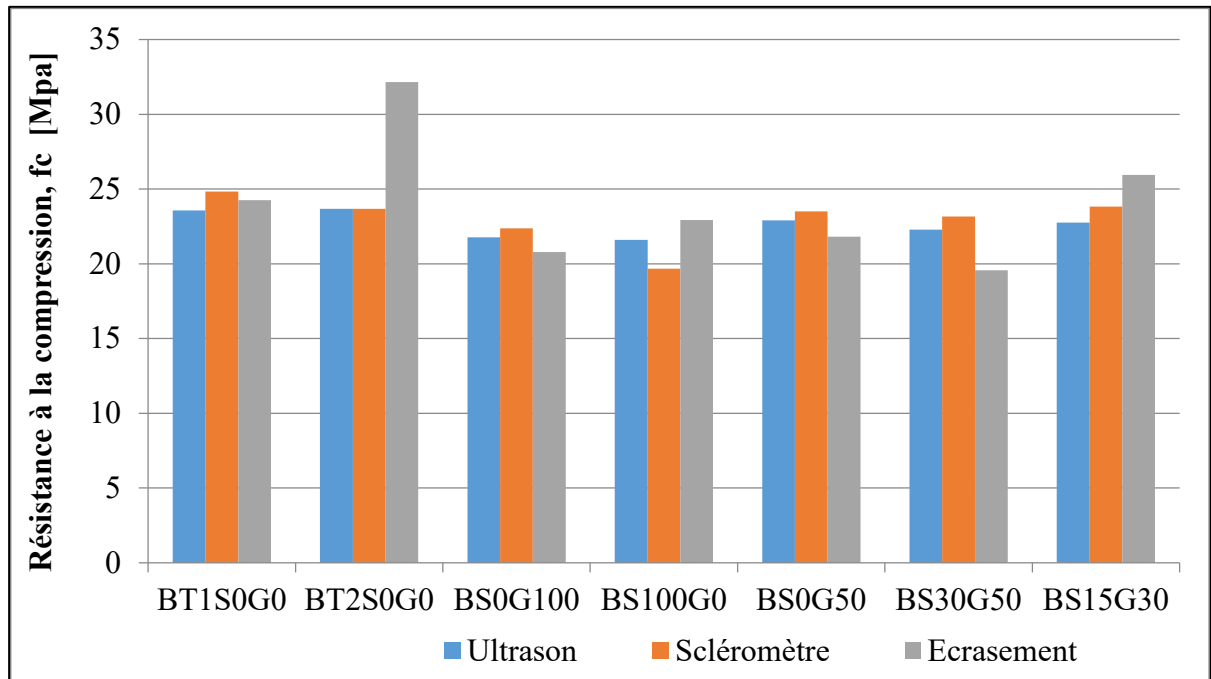


Figure III.6 : Résistance à la compression du béton évaluée par les essais aux ultrasons, scléromètre, et par écrasement à 28 jours sur les cylindres 16/32.

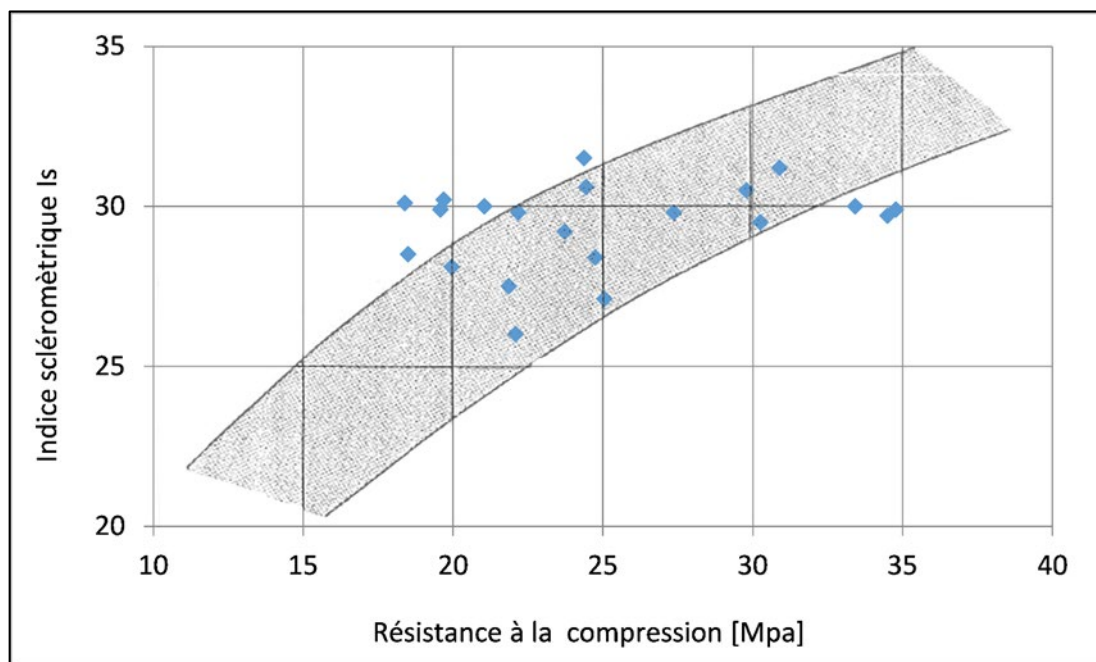


Figure III.7 : Corrélation Indice de rebondissement – Résistance à la compression

La figure III.6 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement de scléromètre correspondants. On peut constater que l'ensemble des points de mesure se trouve dans le fuseau du graphe de contrôle de corrélation de l'appareil scléromètre. Il faut signaler que, plus le nombre de points de mesure est grand, plus la corrélation est bonne.

2.5. Comportement flexionnel des poutres :

L'essai de flexion simple à quatre points a été réalisé sur des poutres en béton armé de dimension 10x15x140cm. Ces essais ont pour but d'étudier l'effet de granulats recyclés sur le comportement flexionnel de ces poutres. Ces granulats ont été incorporés dans la masse du béton avec des taux de substitution variables. La charge mécanique a été augmentée jusqu'à la rupture des poutres. Le tableau III.5 présente l'ensemble des résultats obtenus par ces essais.

On peut constater que la teneur en granulats recyclés n'a pas trop affectée la capacité portante flexionnelle des poutres. Une légère réduction se produit à cause de la diminution de la résistance à la compression du béton.

Tableau III.5 : Résultats expérimentaux de comportement flexionnel des poutres.

Poutre	Charge max [kN]	Flèche max [mm]	Charge de première fissure [kN]	Déformation comprimé	Déformation tendu
BT1S0G0	36,99	18,2	8,45	5745	-
BT2S0G0	36,53	24,5	11,26	1531	-18710
BS0G100	35,94	22,5	6.63	4700	-16364
BS100G0	36,52	11,5	8,05	1567	-18890
BS0G50	36,63	23,4	7.00	3000	-11036
BS30G50	35,67	22,1	10.60	3599	-17595
BS15G30	34,31	21,4	8.40	2047	-18986

2.5.1. Analyse de la flèche

La figure III.8 présente la variation de la flèche en fonction de la charge mécanique, à mi-portée des poutres, obtenue à partir de l'essai de flexion à quatre-points. La figure montre que le comportement flexionnel de l'ensemble des poutres est similaire à celui des poutres témoins. Ce comportement est caractérisé par un modèle élastique parfaitement plastique avec écrouissage. La totalité des courbes montre un palier de ductilité important. A l'exception de la poutre (BS100G0), où la flèche maximale est limitée. Ceci est probablement dû à la porosité élevée causée par la quantité importante des particules fines présentes dans le sable recyclé constituant le béton de cette poutre. On constate aussi que la rigidité flexionnelle, la limite d'élasticité et la capacité portante des poutres ont légèrement affecté par la présence des granulats recyclés.

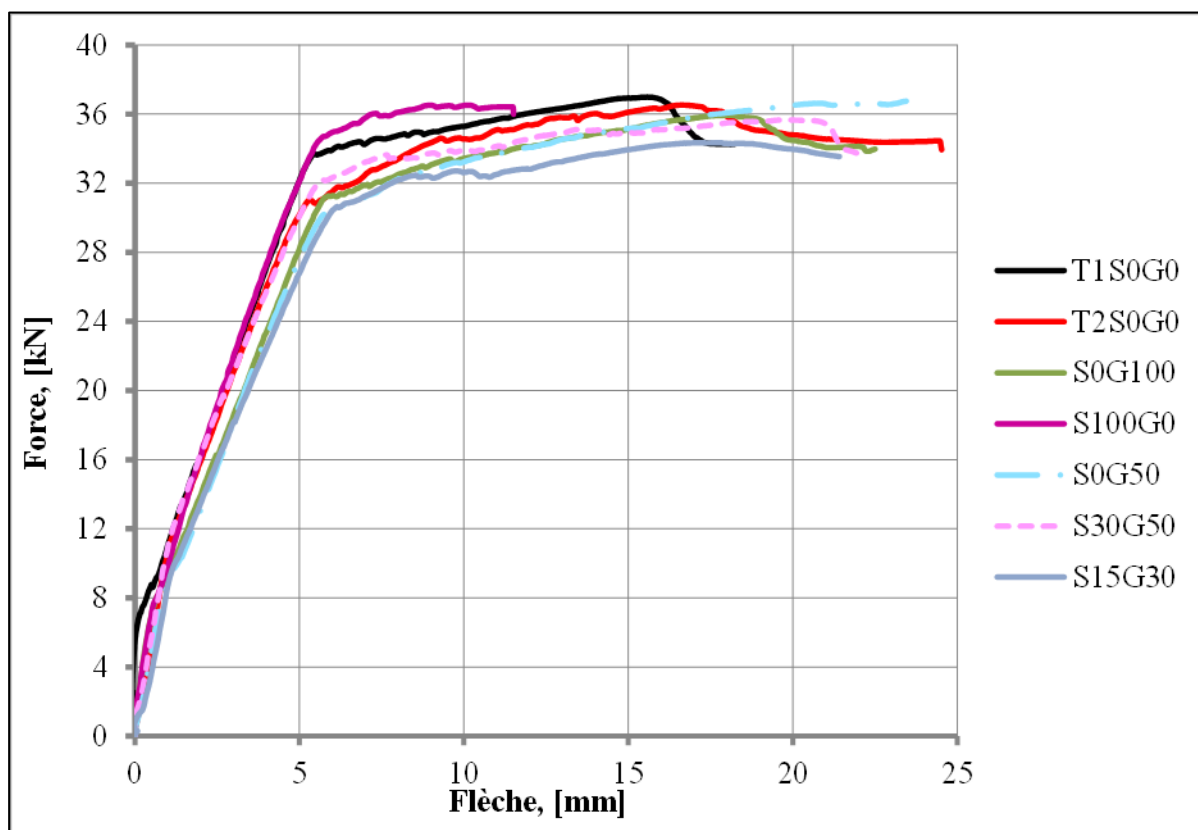


Figure III.8 : Courbe charge – flèche à mi- travée des poutres.

2.5.2. Analyse du largeur des fissures

La figure III.9 présente la variation de l'ouverture de fissure en fonction de la charge mécanique de la première fissure apparaît au milieu de la poutre pendant l'essai de flexion à quatre-points. Il est à noter que les fissures ont été enregistrées juste pour les poutres BT2S0G0, BS0G50, BS30G50, BS15G30. Nous signalons que les mesures de l'ouverture des fissures présentent certaine fluctuation. La figure montre que la largeur des fissures des poutres BS0G50 et BS30G50 sont supérieures à celle de la poutre témoin BT2S0G0. Ceci est peut-être expliqué par le fait que la résistance à la traction du béton a GBR est inférieure à celle du béton témoin. Ainsi que l'adhérence des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels. Il a noté que la flèche et l'ouverture des fissures sont limitées par les conditions de serviabilité des éléments en béton armés.

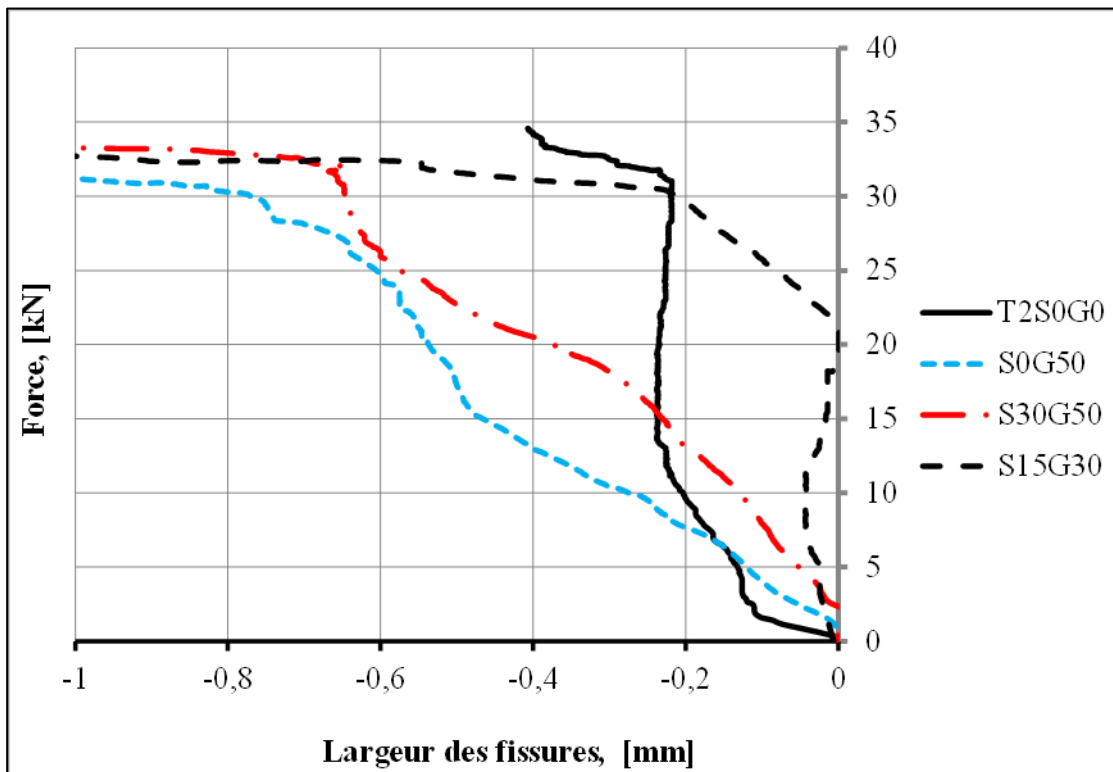


Figure III.9 : Courbes de la largeur des fissures en fonction de la charge.

2.5.3. Déformations du béton comprimé

La figure III.10 présente la variation de déformations des fibres extrêmes du béton comprimé en fonction de la force mesurée au milieu des poutres soumises à l’essai de flexion à quatre-points. Le béton de ces poutres contient différents pourcentages des granulats recyclés. On constate que la teneur en granulats recyclés n’a pas trop affecté la déformation du béton comprimé.

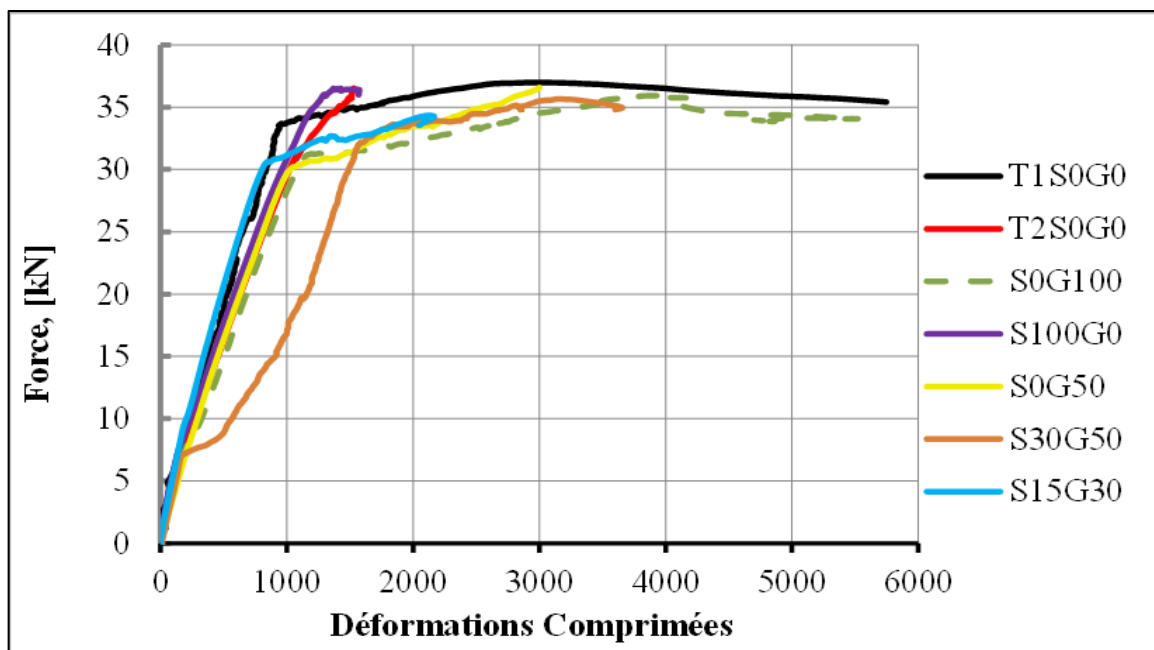


Figure III.10 : Déformation du béton comprimé.

2.5.4. Déformations des aciers tendues

La figure III.11 présente la variation de déformations des armatures tendues en fonction de la force mesurée au milieu des poutres soumises à l'essai de flexion à quatre-points. Le paramètre d'étude est le taux de substitution des granulats recyclés. On constate que les granulats recyclés n'ont pas affecté la déformation des aciers tendues. Cependant, la capacité portante a été légèrement affectée.

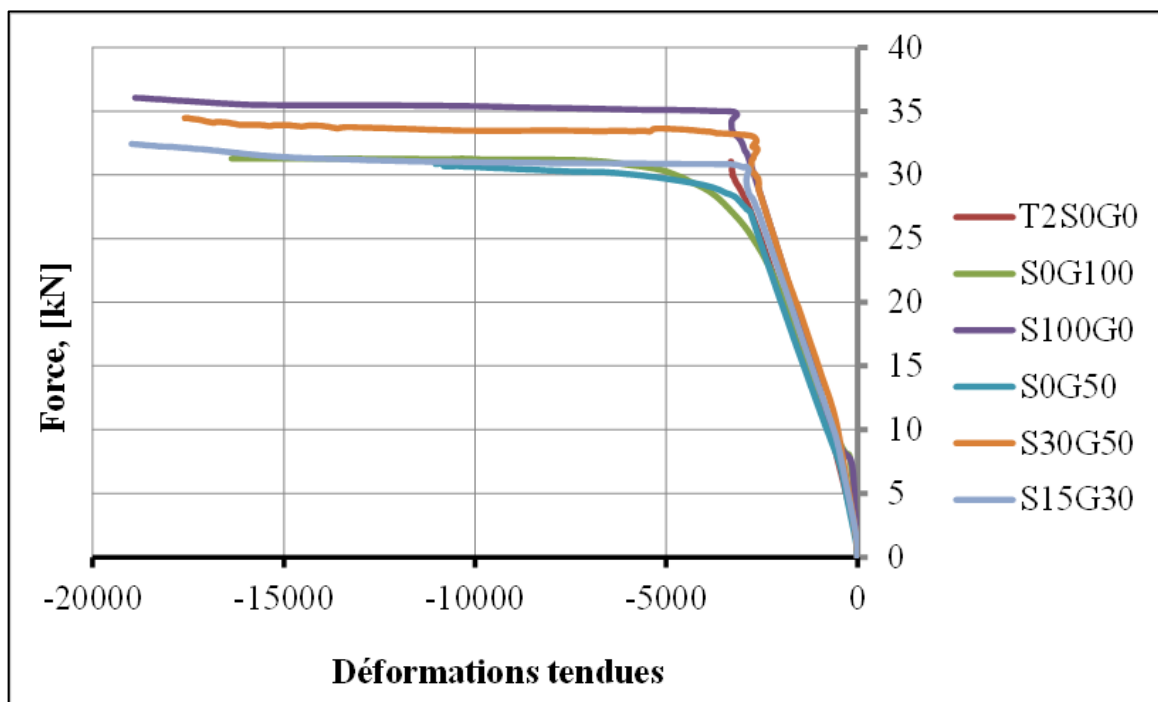


Figure III.11 : Déformation des aciers tendus.

2.5.5. Fissuration et mode de rupture

La fissuration est initiée à mi-portée des poutres où le moment de flexion est maximum, puis elle se propage le long de la poutre avec l'augmentation de la charge comme le montre les figures III.12 à III.18. Les fissures ont été retracées par un marqueur durant l'essai. La rupture de toutes les poutres était par traction avec écrasement du béton comprimé. Ce mode de rupture est justifié par la section des armatures choisies. L'espacement entre les fissures est presque le même pour l'ensemble des poutres. On peut conclure le comportement des poutres testées est similaire au stade de rupture indépendamment aux taux de substituants.



Figure III.12 : Schémas de fissuration de la poutre témoin 1 (BT1S0G0).

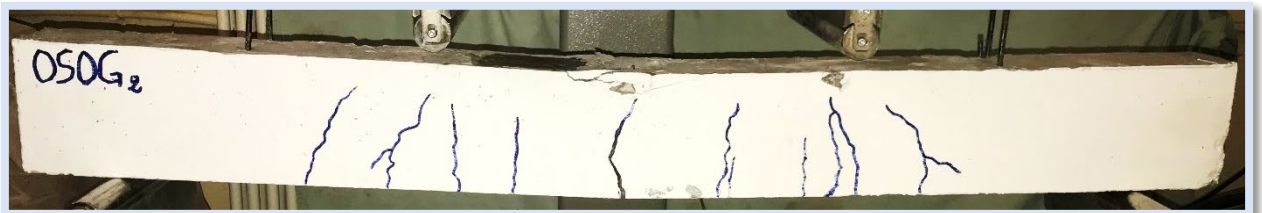


Figure III.13 : Schémas de fissuration de la poutre témoin 2 (BT2S0G0).



Figure III.14 : Schémas de fissuration de la poutre (BS0G100).



Figure III.15 : Schémas de fissuration de la poutre (BS100G0).



Figure III.16 : Schémas de fissuration de la poutre (BS0G50).

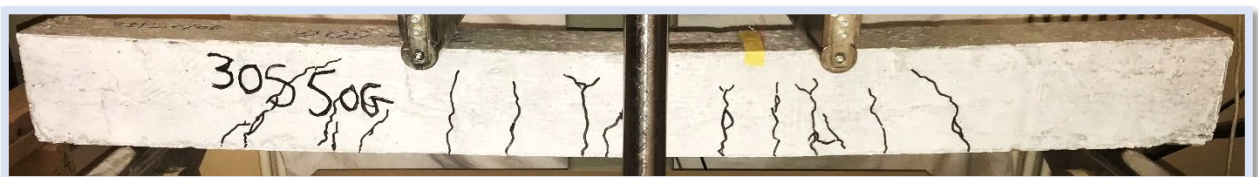


Figure III.17 : Schémas de fissuration de la poutre (BS30G50).



Figure III.18 : Schémas de fissuration de la poutre (BS15G30).

3. CONCLUSION :

On se basant sur les résultats expérimentaux obtenue dans le cadre du présent travail on peut conclure que :

- Des taux de substitution de 30 à 50 % de gravier donnent des résultats comparatifs au béton témoin en termes de résistance de compression de béton à jeune âge et à 28 jours. Une réduction de 10% a été constatée pour un taux de substitution de 100% de gravier, et 17% pour un taux de substitution de 100% de sable.
- Le comportement flexionnel des poutres à base de granulats recyclés est similaire à celui des poutres à granulats naturels. La teneur en granulats recyclés n'a pas trop affecté la capacité portante, la rigidité flexionnelle, et la limite d'élasticité des poutres.
- La largeur des fissures des poutres à base de granulats recyclés est supérieure à celle de la poutre à granulats naturels.
- Le comportement des poutres en GBR au stade de rupture est similaire à celui des poutres en béton armé conventionnelle. L'espace entre les fissures est presque le même pour l'ensemble des poutres.
- Les essais aux ultrasons montrent que le module d'élasticité du béton à base de granulats recyclée est légèrement inférieur à celui de granulats naturels.

CONCLUSIONS GENERALES

Conclusions générales

L'objectif de ce projet de master est d'examiner le comportement des poutres en béton armé contenant des proportions en granulats recyclés (graviers et sables) avec des pourcentages variables. L'objectif de ce projet de master est de contribuer à la valorisation des déchets de construction afin de préserver les ressources naturelles, contribue à la protection de l'environnement et réduire les coûts de construction.

Le programme expérimental consiste à confectionner et tester 07 poutres en béton armé. Cinq entre eux sont à base de granulats recyclés. Des essais de caractérisation des matériaux utilisés ont été effectués préalablement afin de déterminer les paramètres nécessaires à la formulation du béton. La méthode de formulation utilisée est celle de Dreux Gorisse.

Les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude sont comme suit :

- Les granulats recyclés sont plus légers et plus poreux que les granulats naturels.
- La dureté et la propreté, respectivement, du gravier et du sable recyclé permet leur utilisation dans le domaine de construction.
- Des taux de substitution de 30 à 50 % de gravier donnent des résultats comparatifs au béton témoin en termes de résistance de compression de béton à jeune âge et à 28 jours. Une réduction de 10% a été constatée pour un taux de substitution de 100% de gravier, et 17% pour un taux de substitution de 100% de sable.
- Bien que la résistance à la traction du béton est considéré négligeable pour le dimensionnement des éléments en béton armé, mais les granulats recyclés affectent cette propriété du béton considérablement. Une réduction de la résistance à la traction de 20% est observée pour des taux de remplacement allant jusqu'à 50% de granulats recyclés.
- Les essais aux ultrasons montrent que le module d'élasticité du béton à base de granulats recyclés est légèrement inférieur à celui de granulats naturels.
- L'utilisation des essais non destructifs peuvent donner une estimation proche à la résistance de compression à 28 jours du béton à granulats recyclés.
- Le comportement flexionnel des poutres à base de granulats recyclés est similaire à celui des poutres à granulats naturels. La teneur en granulats recyclés n'a pas trop affecté la capacité portante, la rigidité flexionnelle, et la limite d'élasticité des poutres.
- La largeur des fissures des poutres à base de granulats recyclés est supérieure à celle de la poutre à granulats naturels.
- La teneur en granulats recyclés n'a pas trop affecté la déformation du béton comprimé et la déformation des aciers tendues.

CONCLUSIONS GENERALES

- Le comportement des poutres en GBR au stade de rupture est similaire à celui des poutres en béton armé conventionnelle. L'espace entre les fissures est presque le même pour l'ensemble des poutres.

De façon générale, on peut conclure que les taux de substitution de granulats naturels (gravier et sable) par des granulats recyclés de 15 à 50% n'affecteront pas le comportement flexionnel des poutres à base de granulats recyclés.

Recommandations pour les futures recherches :

Dans cette étude, notre connaissance et notre compréhension des phénomènes régissant le comportement flexionnel des poutres en béton armé contenant des granulats de béton recycle ont progressé. Néanmoins certains points restent à éclaircir ou à étudier :

- ❖ Lors du concassage de déchets de béton, des quantités importantes de fraction fine sont générées et inévitable. L'utilisation du sable recyclé est indispensable dans les bétons de sable comme granulat de base ou comme fillers.
- ❖ La meilleure méthode de démolition est la déconstruction sélective, qui est plus coûteuse, mais assure des granulats de bonne qualité.
- ❖ Confronter les résultats obtenus en laboratoire avec ceux de chantier à grand échelle.
- ❖ Large investigation concernant d'autres paramètres de composition.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : González-Taboada, I.; González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F.; Carro-López, D.; (2016). Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. *Mater. Construcc.*; 66 [323]: e089.
 - [2] : L. J. Vicat, (2000). *Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.*
 - [3] : B.Badreddine ., L.Lahcen.(2020). Comportement flexionnel des poutres en béton arme contenant des granulats de béton recycle (Mémoire de master). Université Amar telidjilaghout.
 - [4] : B.Nassima., z.Akila.(2017). Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment (Mémoire de master). Université M'hamed Bougera-Boumerdes.
 - [5] A. CHAREF, "La problématique des granulats au Maroc", Push-Button Publishing, (2007).
 - [6] Berredjem Layachi. (2009). Le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et comportements physique et mécaniques des bétons a base de ces recycles. (Mémoire de magister). Université Badji Mokhtar-Annaba.
 - [7] R. MAILLOT, "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001).
 - [8] A. M. NEVILLE, "Propriétés des bétons", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p., (2000).
 - [9] J. ALEXANDRE & J. SEBILEAU, "Laitier de haut fourneau", Centre Technique et de Promotion des Laitiers, Paris édition, 340 p., (1988).
 - [10] H. DJELAL & V. NOUVEL, "Gestion des déchets de démolition et environnement", XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 8 p., (2008).
 - [11] de Larrard F. et Colina H. (Dir.), *Le béton recyclé.* Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.
 - [12] : L. Yacine., H. Kamilia (2017). Influence des agregats obtenus des betons demolis dans la fabrication des betons recycles sur les proprietes mecaniques de beton (Mémoire de master). Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
 - [13] : Laby, F., *Le recyclage des déchets de démolition pourrait être amélioré par la déconstruction sélective,* Actu-Environnement.com, 2007.
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [14] : S. Decreuse¹, N. Comte², C. Raillon³. 2018. Techniques et matériaux de démolition. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. *Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018*. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.
 - [15] : B. Cazacliu¹, L. Le Guen¹, E. Hamard¹, S. Roux², S. Braymand³. 2018. Élaboration des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. *Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018*. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.
 - [16] : S. Rémond¹, J.M. Mechling², E. Garcia-Diaz³, R. Lavaud⁴, R. Trauchessec², B. Cazacliu⁵. 2018. Caractérisation des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. *Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018*. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.
 - [17] : B.Faiza ., A.Nadjet.(2020). Etude expérimentale d'un béton à base de granulats recyclés (Mémoire de master). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
 - [18] : Mukai T., Kikuchi M., Properties of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate, In: Demolition and reuse of concrete and masonry, 2, 670-679, 1988.
 - [19] : Yagishita F., Sano M., Yamada M., Behavior of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate. In: Demolition and reuse of concrete & masonry RILEM proceeding, 23, 331-342, E&FN Spon, London, 1994.
 - [20] : E. Ghorbel, G. Wardeh, B. Fouré. 2018. Adhérence entre armatures et bétons de GBR. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. *Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018*. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.
 - [21] : H. Mercado-Mendoza, K. Apedo, P. Wolff, B. Fouré. 2018. Poutres soumises à la flexion. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. *Marne-la Vallée : Ifsttar, 2018*. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4
 - [22] : Fathifazl, G. (2007). Structural performance of Steel Reinforced Recycled Concrete. Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Carleton University,
 - [23] : Kou, S., Poon, C. et Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, volume 33, numéro 2, p. 286-291.
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [24] : Tabsh, S. W. et Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 1163-7.
 - [25] : Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220.
 - [26] : Kou, S. C., Poon, C. S. et Dixon, C. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 19, numéro 9, p. 709-717.
 - [27] : Kou, S. C., Poon, C. S. et Chan, D. (2008). Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 41, numéro 7, p. 1191-1201.
 - [28] : Rao, A., Jha, K. N. et Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 50, numéro 1, p. 71-81.
 - [29] : Yang, K., Chung, H. ET Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, volume 105, numéro 3, p. 289-296.
 - [30] : Abd Elhakam, A., Mohamed, A. E. et Awad, E. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, volume 35, p. 421-427.
 - [31] : Safiuddin, M., Alengaram, UJ., Salam, MA., Jumaat, MZ., Jaafar, FF., and Saad, HB. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Mater Res* 14(2):248–255
 - [32] : Yang, j., Du, Q., and Bao, y. (2011). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *constr build mater* 25(4):1935–1945.
 - [33] : Casuccio, M., Torrijos, MC., Giaccio, G., and Zerbino, R. 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 22(7):1500–1506.
 - [34] : Tavakoli, M., and Soroushian, P. 1996. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 182-190.
-
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [35] : De Oliveira, M. B. et Vazquez, E. (1996). Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, volume 16, numéro 1-3, p. 113-117.
 - [36] : Topcu, I. B. et Sengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 8, p. 1307-1312.
 - [37] : Martinez-Lage, I., Martinez-Abella, F., Vazquez-Herrero, C. et Perez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, volume 37, p. 171-176.
 - [38] : Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. et Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 5, p. 735-742.
 - [39] : A. AJDUKIEWICZ & A. KLISZCZEWICZ, "Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPC", *Cement & Concrete Composites*, 24(2), pp:269-279, (2002).
 - [40] : Y. MALIER, "Les bétons à haute performance, caractérisation, durabilité et applications", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 673p., (1992).
 - [41] : M. SANCHEZ de JUAN & P. A. GUTIERREZ, "Influence of recycled aggregate quality on concrete properties", laboratoire Central des Matériaux et Structures, Espagne.
 - [42] : M. J. ESTEFANO de OLIVEIRA, C. SILVEIRA de ASSIS & A. W. TERNI, "Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate", Université Estadual Paulista, Brazil.
 - [43] : E. WIRQUIN, R. HADJIEVA-ZAHARIEVA & 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*, 33(6), pp:403-408, (2000).
 - [44] : Norme Française EN 933-9, "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9: Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène", AFNOR, (1996).
 - [45] : R. N. SWAMY, "The Alkali-Silica Reaction in Concrete", Blackie and Son. Ltd, Glasgow, 336 p., (1992).
 - [46] : F.R. GOTTFREDSSEN & F. THOGERSEN, "Recycling of concrete in aggressive environment", 3rd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry Odense", Denmark, pp:362-370, (1993).
-
-

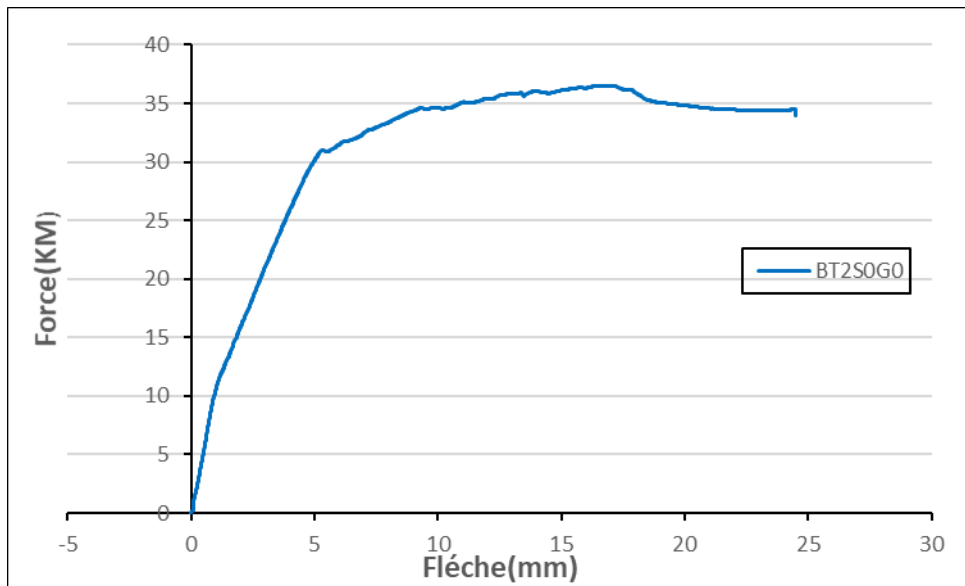
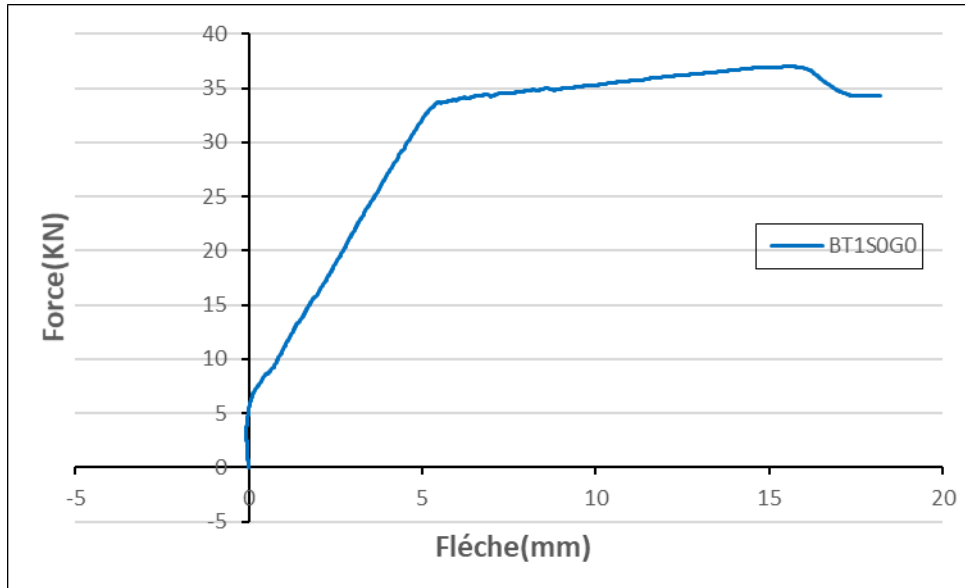
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [47] : R.M. SALEM & E.G. BURDETTE, "*Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete*", ACI Materials Journal, 95(5), pp:558-563, (1998).
 - [48] : M. Barra de Oliveira & E. VAZQUEZ, "*The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete*", Waste Management, 16(1-3), pp:113-117, (1996).
 - [49] : Wenhui Bai et Binxiang Sun. 2010. Experimental Study on Flexural Behavior of Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing.china
 - [50] : S. OMARY, G. WARDEH, E. GHORBEL, H. GOMART. 2014. Comportement à la flexion des poutres en béton armé à base de graviers recyclés. Université de Cergy Pontoise.Paris.France
-

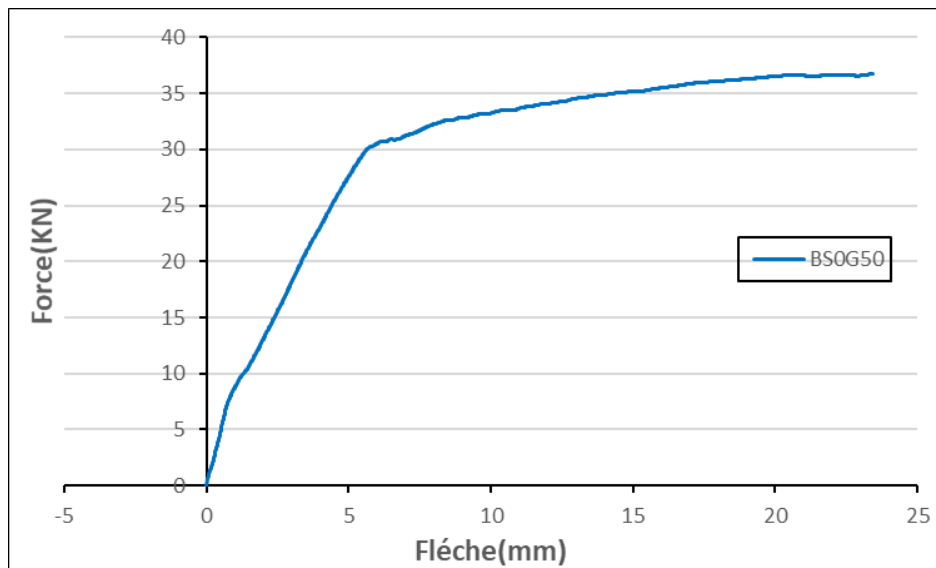
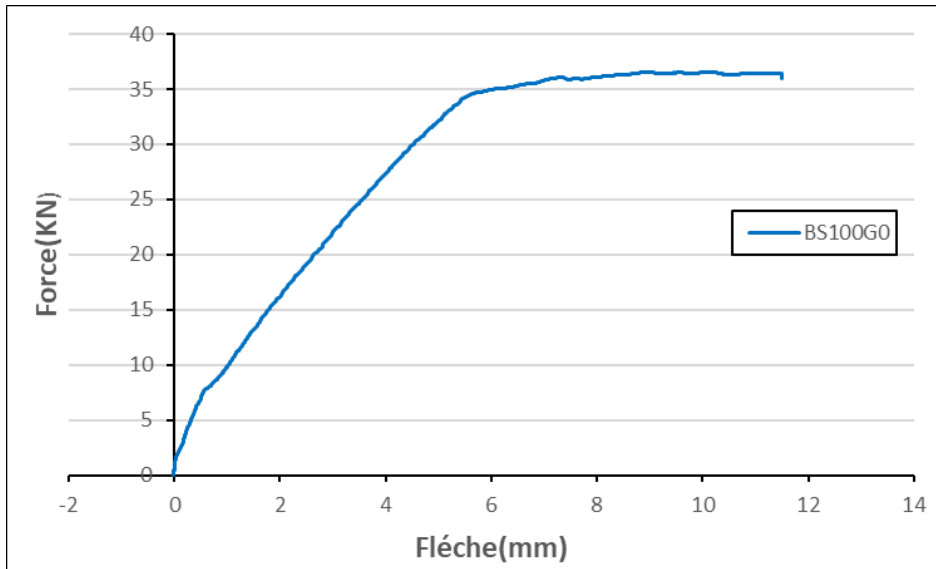
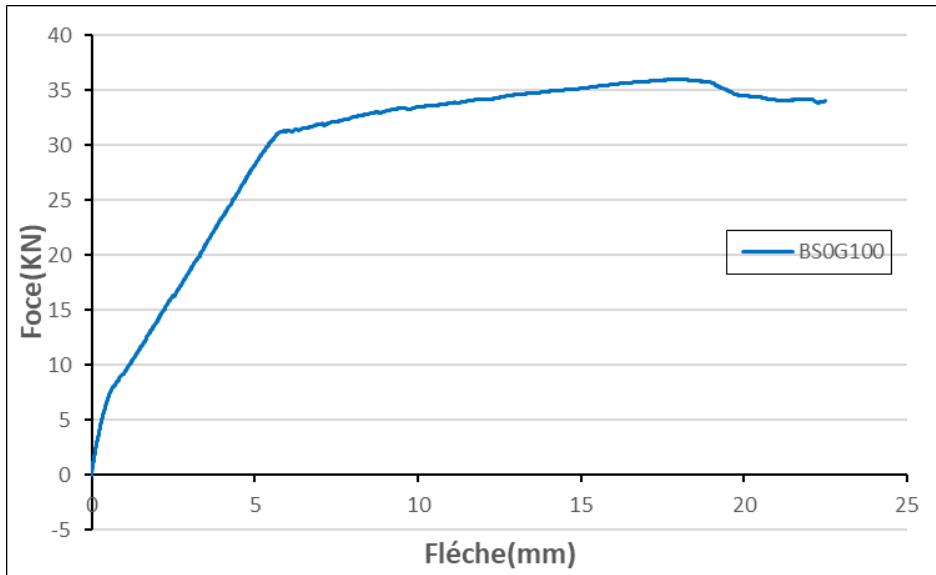
Annexe

Dans ce qui suit, nous présentons les graphes de la flèche, la largeur des fissures, la déformation du béton et la déformation de l'acier pour chaque poutre.

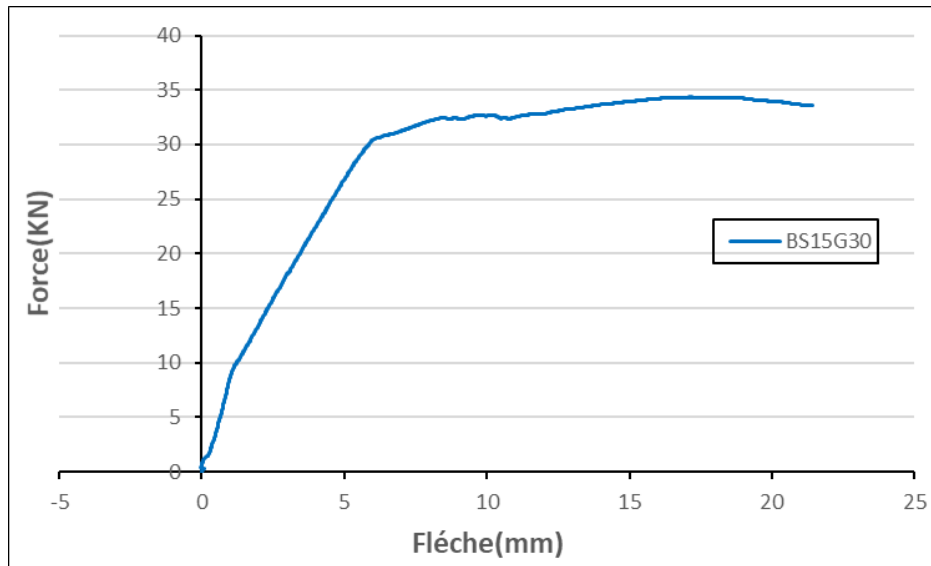
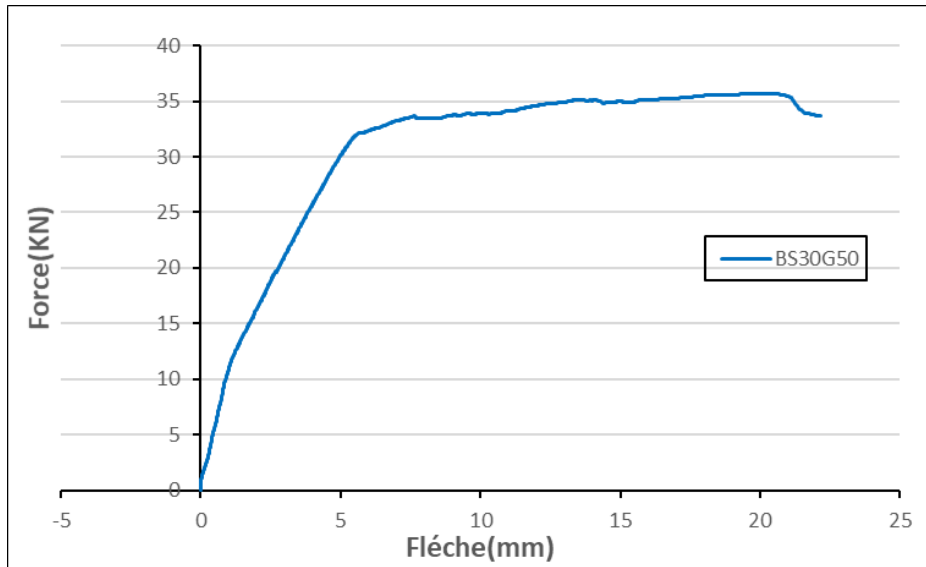
1. Flèche



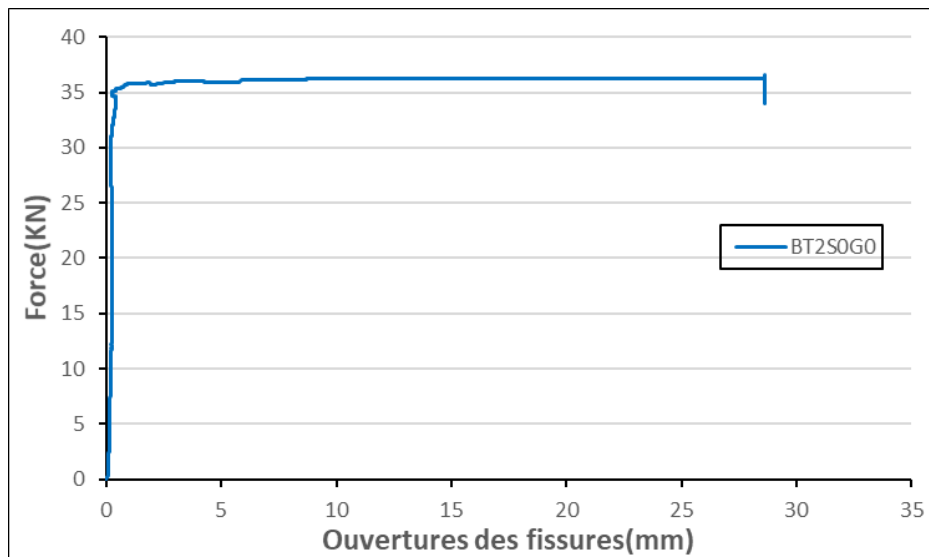
ANNEXE



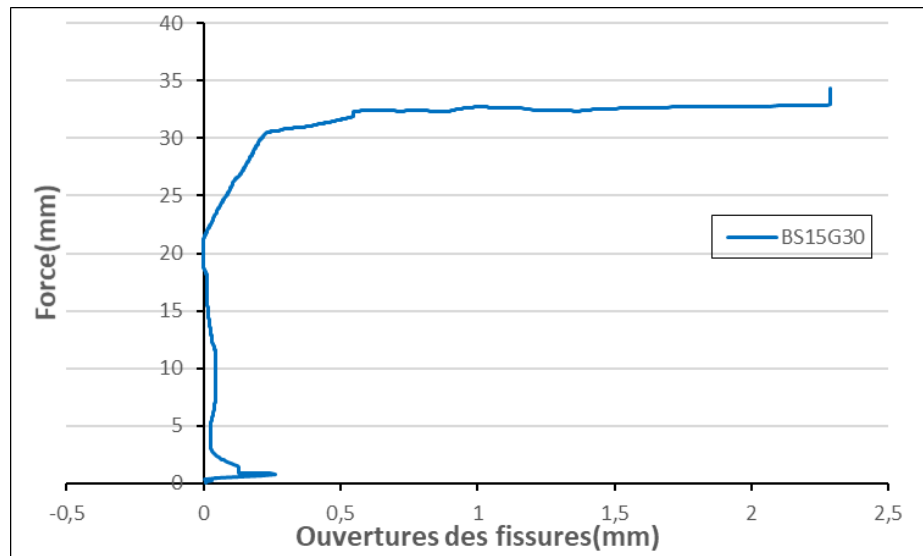
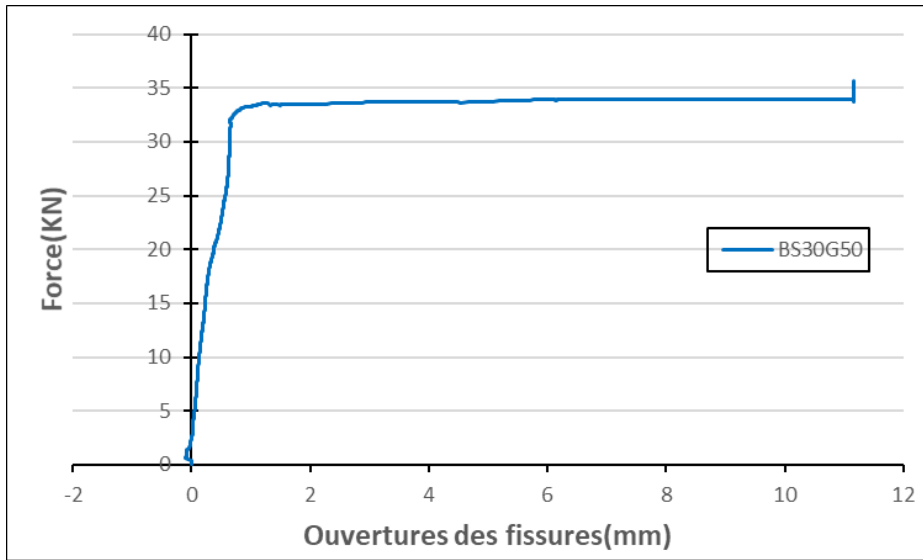
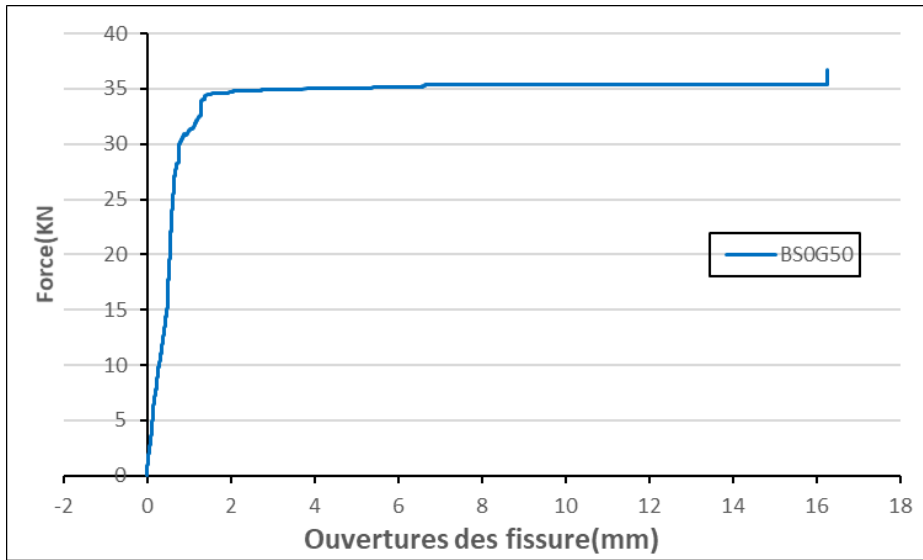
ANNEXE



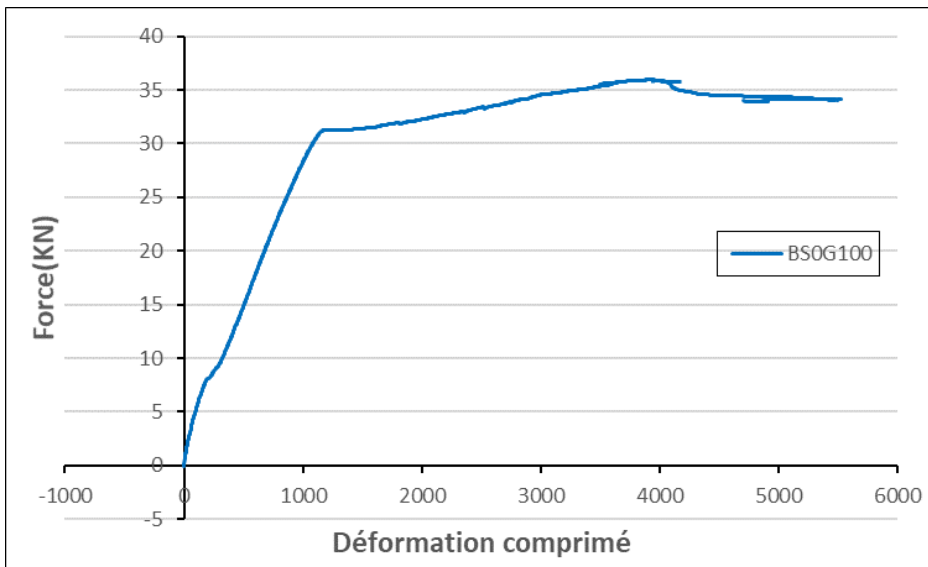
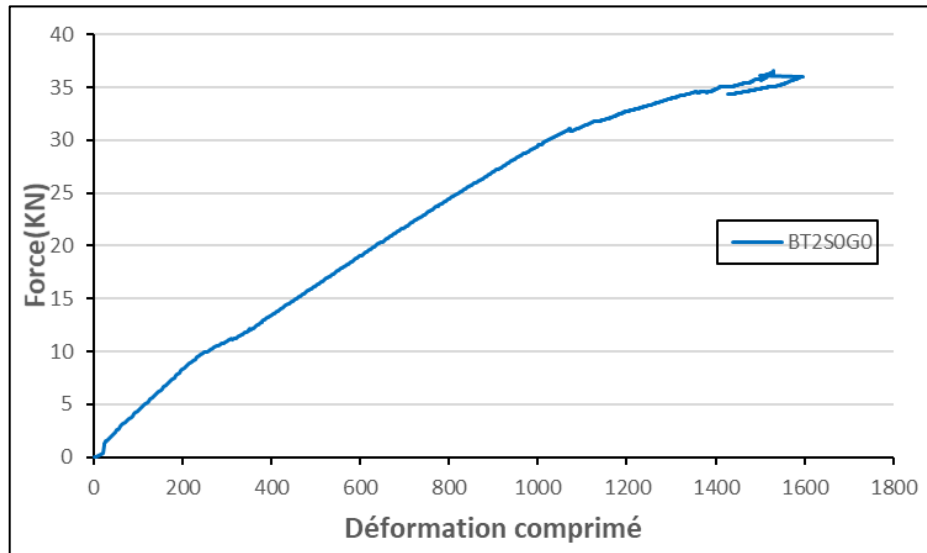
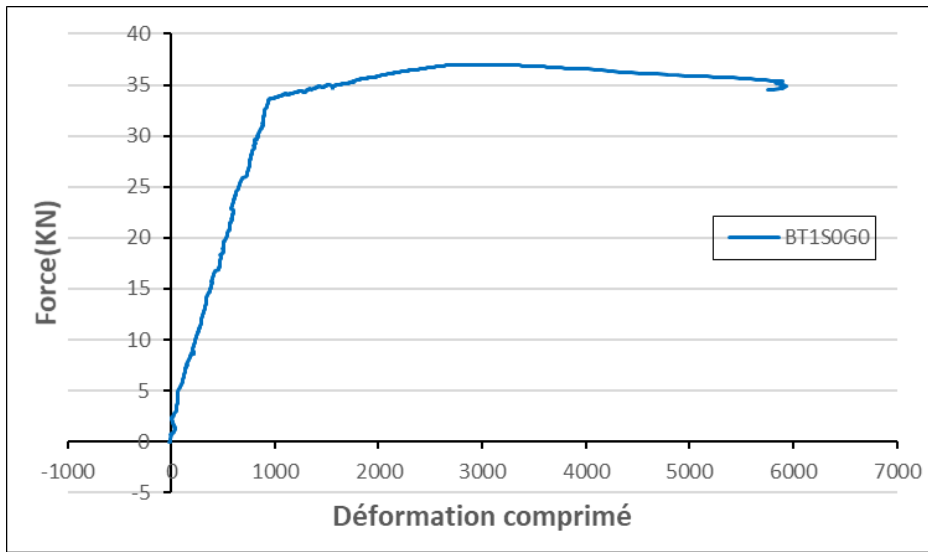
2. Largeur des fissures



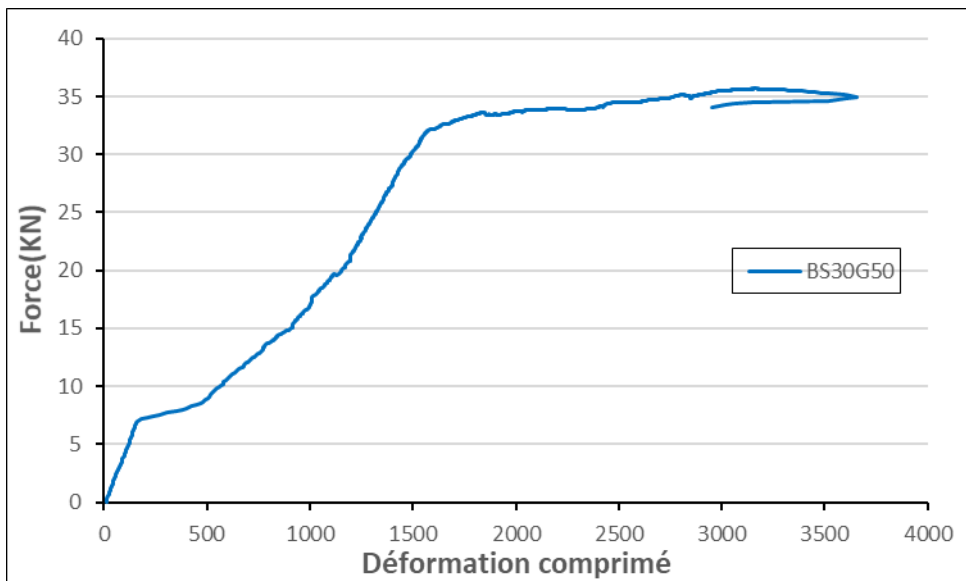
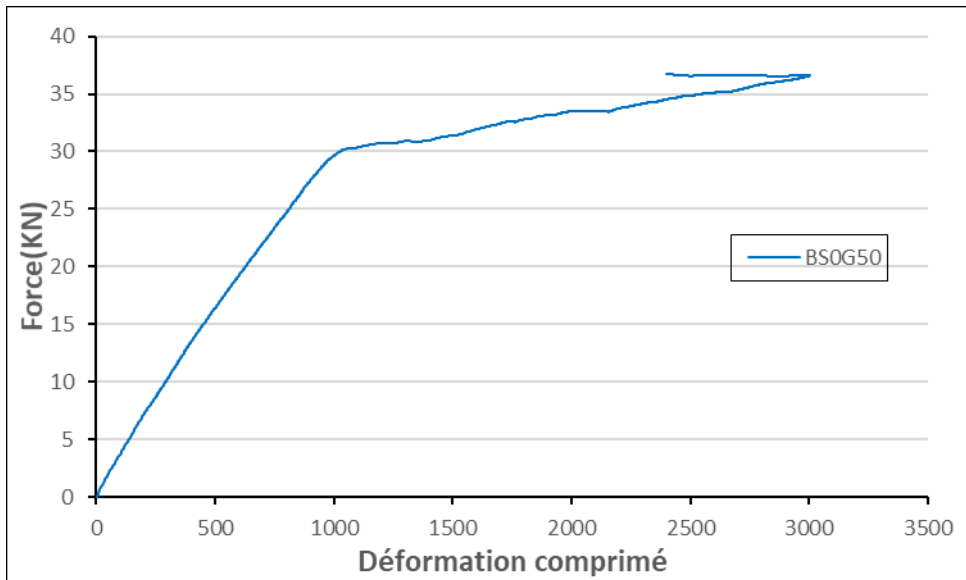
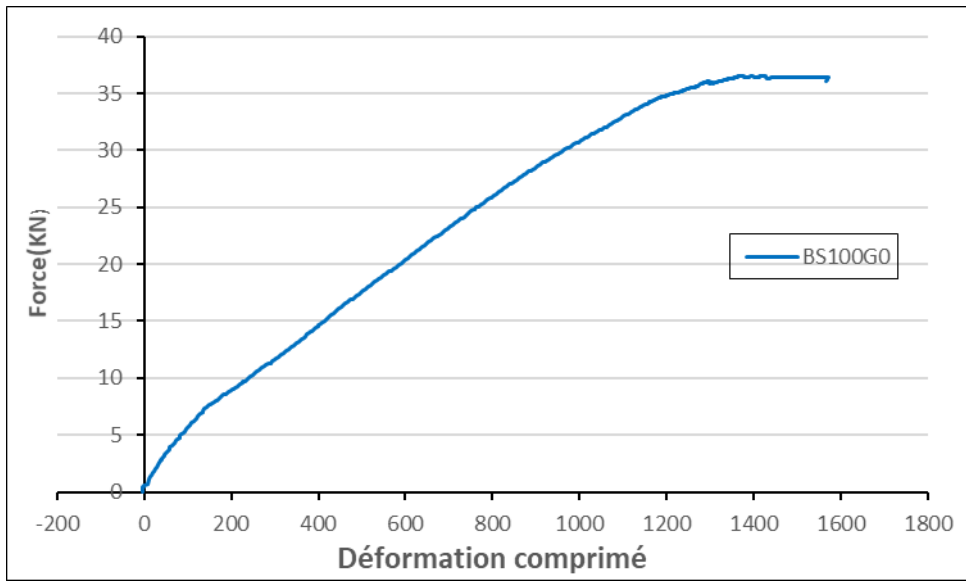
ANNEXE



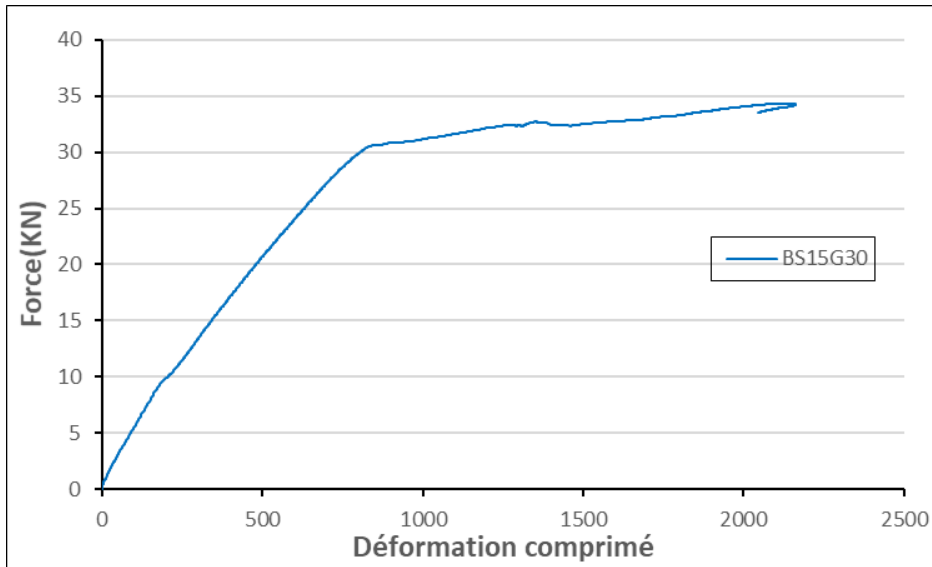
3. Déformation du béton comprimé



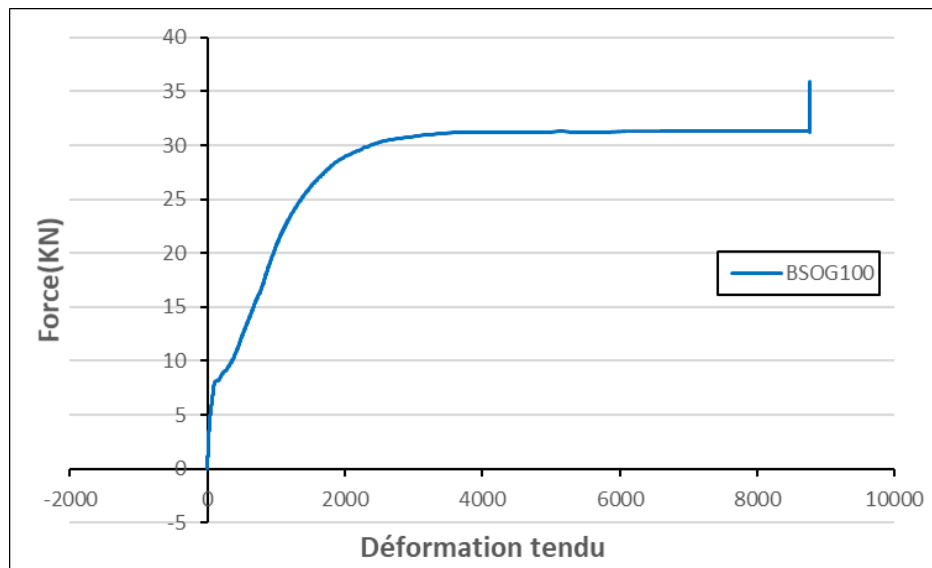
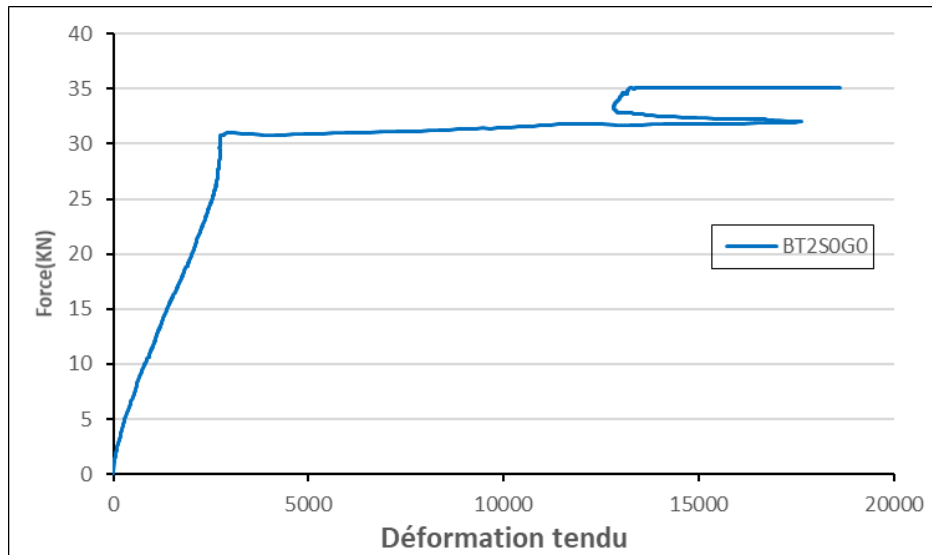
ANNEXE



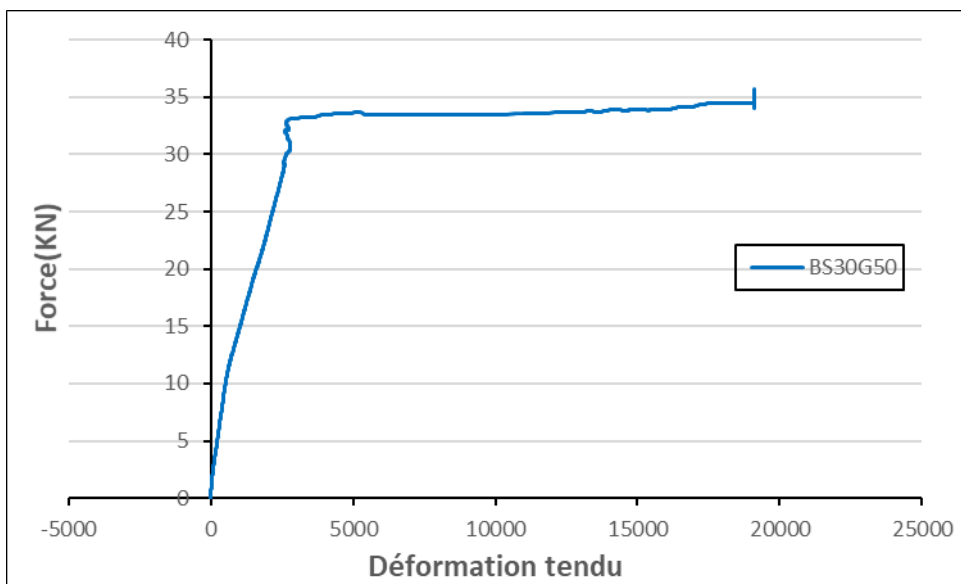
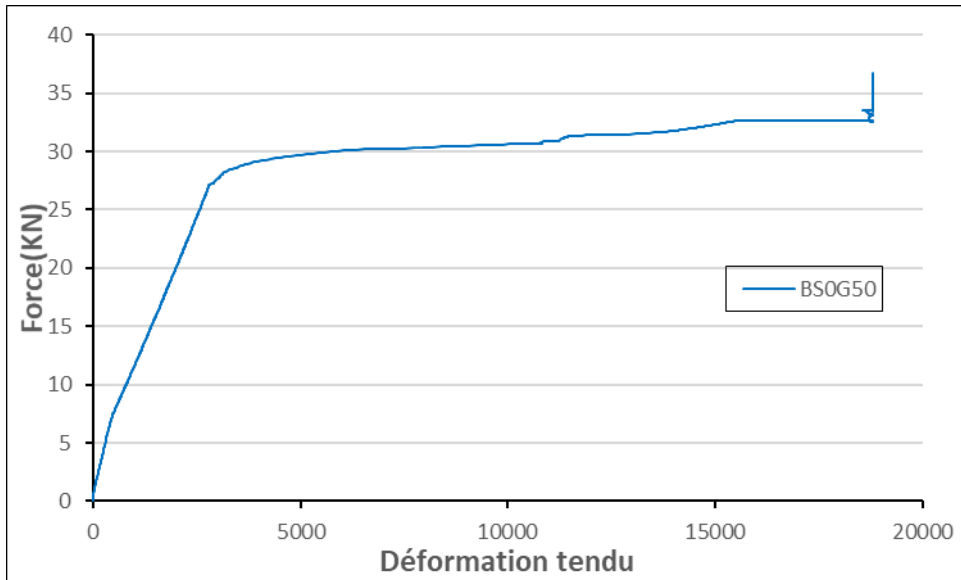
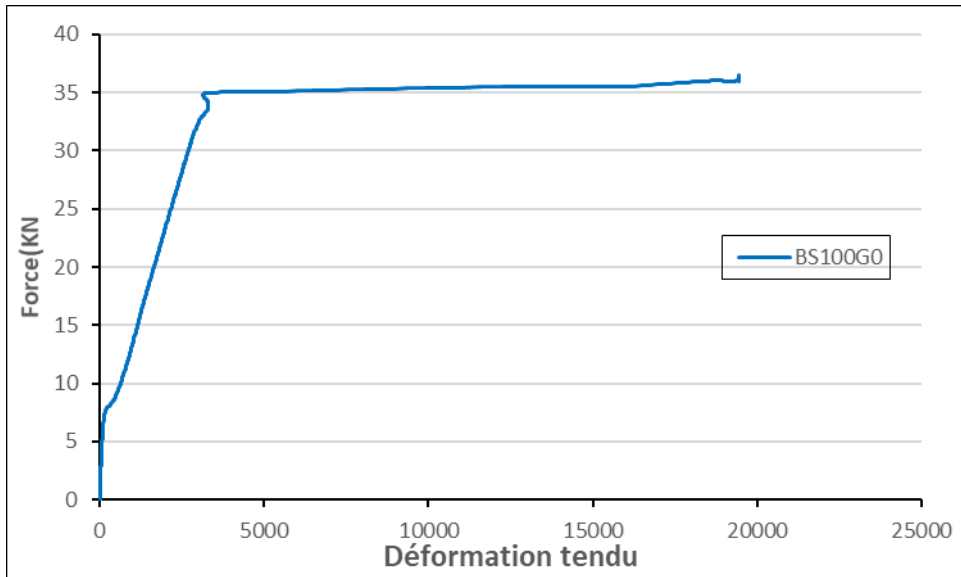
ANNEXE



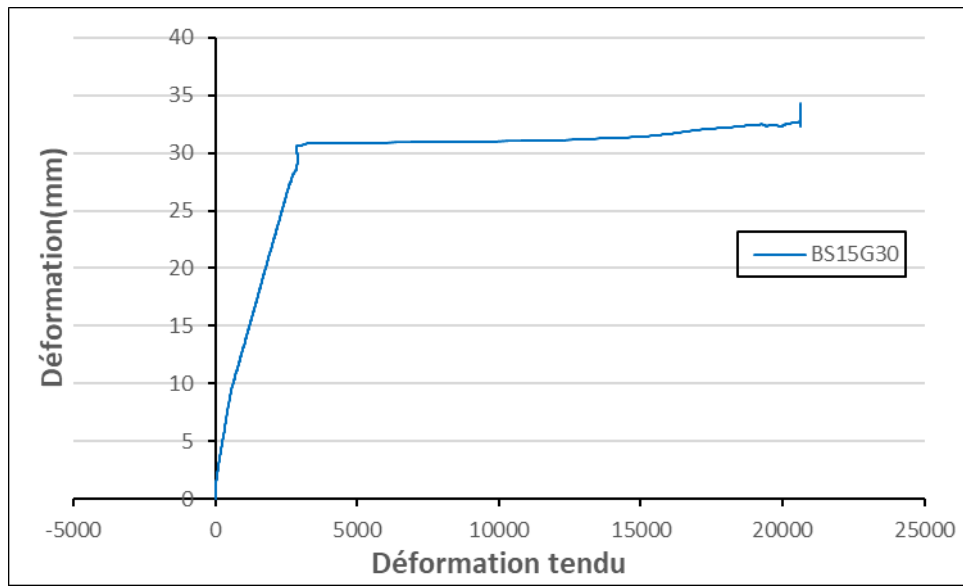
4. Déformations des aciers tendus



ANNEXE



ANNEXE



عنوان المذكرة: سلوك الانحناء لروافد الخرسانة المسلحة المحتوية على ركام خرساني معاد تدويره

المؤطر: بلكل حيزية

الاسم: سيدي حيبلا محمد

اللقب: عبد الرحمان

احمدو محمدو

سيدي اشريف

ملخص: يعد استنفاد الموارد الطبيعية تحديًا كبيرًا للإنتاج المستدام للخرسانة. إن استبدال جزء من الركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره سيكون له تأثير اقتصادي وبيئي ملحوظ. المركب المنتج عبارة عن خرسانة تم فيها استبدال الركام الطبيعي (الرمل والحصى) بالركام المعاد تدويره بالنسب التالية: 0%؛ 15%؛ 30%؛ 50%؛ 100%. تتكون هذه الدراسة التجريبية، بعد وصف جميع المواد المستخدمة وتقييم الخواص الفيزيائية في الحالة الطازجة وفي الحالة الصلبة للخرسانة، في صنع عوارض خرسانية مسلحة صغيرة الحجم تخضع للانحناء البسيط عند أربع نقاط. هذا لمقارنة تأثير الركام المعاد تدويره على سلوك الانحناء لهذه الحزم مقارنة بحزمة التحكم مع الركام الطبيعي (OS0G). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن محتوى الركام المعاد تدويره لم يؤثر بشكل كبير على قدرة تحمل الانحناء للحزم. يحدث انخفاض طفيف بسبب انخفاض مقاومة الانضغاط للخرسانة.

كلمات مفتاحية: الركام المعاد تدويره، الانحناء، خرسانة مسلحة، السهم، التشوهات

Memory title: Bending behavior of reinforced concrete beams containing concrete aggregates.

Name: Abderrahmane

First name: Sidi Hayballa Mohamed

Directed by: Bellakehal Hizia

Sidi cherif

Ahmedou mohamedou

Abstract: The depletion of natural resources is a major challenge for the sustainable production of concrete. Replacing part of the natural aggregates with recycled aggregates will have a marked economic and environmental impact. The composite produced is a concrete in which the natural aggregates (sand and gravel) have been replaced by recycled aggregates with the following percentages: 0%; 15%; 30%; 50%; 100%. This experimental study consists, after having characterized all the materials used and evaluated the physical properties in the fresh state and in the hardened state of the concrete, in making small-scale reinforced concrete beams subjected to simple bending at four points. This is to compare the influence of recycled aggregates on the bending behavior of these beams compared to a control beam with natural aggregates (OS0G). The results obtained show that the content of recycled aggregates did not affect the flexural bearing capacity of the beams too much. A slight reduction occurs due to the decrease in the compressive strength of the concrete.

Key words: Recycled aggregates, Bending, Reinforced concrete, deformation, strains.

Titre du mémoire : Comportement flexionnel des poutres en béton armé contenant des granulats du béton recyclé.

Nom : Abderrahmane

Prénom : Sidi Hayballa Mohamed

Encadreur : Bellakehal Hizia

Sidi cherif

Ahmedou Mohamedou

Résumé : L'épuisement des ressources naturelles constitue un défi majeur pour la production durable du béton. Le remplacement d'une partie des granulats naturels par des granulats recyclés aura un impact économique et environnemental marqué. Le composite élaboré est un béton dans lequel les granulats naturels (sable et gravier) ont été substitué par des granulats recyclés avec des pourcentages suivant : 0% ; 15% ; 30% ; 50% ; 100%. Cette étude expérimentale consiste, après avoir caractérisé tous les matériaux utilisés et évalué les propriétés physiques à l'état frais et à l'état durci du béton, à confectionner des poutres à échelle réduite en béton armé soumises à la flexion simple à quatre points. Ceci afin de comparer l'influence des granulats recyclés sur le comportement flexionnel de ces poutres par rapport à une poutre témoin à granulats naturels (OS0G). Les résultats obtenus montrent que la teneur en granulats recyclés n'a pas trop affectée la capacité portante flexionnelle des poutres. Une légère réduction se produit à cause de la diminution de la résistance à la compression du béton.

Mots clés : Granulats recyclés, Flexion, Béton armé, flèche, déformations