

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : BOUHAFARA Hamza

Sujet

**Etude de l'effet du traitement des granulats recyclés
au ciment et à la fumée de silice sur la performance
des bétons à base de granulats recyclés**

Présenté et soutenu publiquement, le 12 /06 /2022, devant le jury composé de :

M. MESSABHIA Ali

Professeur

Président

M. HAMIDANE H'mida

Docteur

Rapporteur

M. LABED Abderrahim

Maitre de conférence B

Examinateur 1

Promotion : 2021/2022



Dédicace



Je tien c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail A l'être le plus cher de ma vie, la prunelle de mes yeux, source de gentillesse et tendresse, *Yama.*

A celui qui m'a fait de moi un homme et combattu le monde pour se tenir sur cette chaire, *Mon père.*

A mes *chers frères* et la *plus belle Sœur.*

A tous mes *amis proches* de m'avoir aidé tout le temps,

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur,
Je dédie ce travail à mon âme qui ma tracée chemin du succès,

A tous membres de ma famille et toute personne qui le porte le nom *BOUHAFARA.*

Je dédie ce travail à tous qui ont participé à ma réussite.

Remerciements



Je remercie en premier lieu dieu le tout puissant pour m'avoir donné la
force, le
courage et là Volonté d'accomplir ce travail.

Au *DOCTEUR HMIDAN*, mon directeur de thèse, les mots me
manquent pour
vous exprimer ma gratitude.

Toutes ces années que j'ai passées à votre côté m'ont permis d'acquérir
un esprit

critique mieux orienté, une analyse plus claire, une vision de la vie
différente de

celle que j'avais il y a quelques années.

Du fond du cœur, je vous dis : Merci.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont pris de leur temps
précieux pour
porter un regard critique sur mon travail et suggérer de nouvelles pistes
de
réflexion :

Monsieur *MESSABHIA Aï*, professeur du département de génie
civile de
l'université de Tébessa,

Monsieur *LABED ABDERRAHIM*, professeur du Département de
génie civile de l'université de Tébessa,

Merci pour avoir accepté de faire partie de ce jury de mémoire.

Pour finir, je tiens à remercier profondément ma famille pour son soutien
sans

faillir au cours de ces années. Sans vous, je n'aurai peut-être pas réussi
à mener à

bien ce projet. *Je vous aime de tout mon cœur.*

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste d'abréviation

Introduction générale.....01

Chapitre I

1.1. Recyclage des déchets de construction	03
1.1.1. Recyclage des déchets de chantier.....	03
1.1.2. Origine de la production de déchets.....	03
1.1.3. Les types des déchets de chantier.....	03
1.1.3.1. Les déchets inertes.....	04
1.1.3.2. Les déchets non dangereux non inertes.....	04
1.1.3.3. Les déchets organiques	05
1.1.3.4. Les déchets spéciaux.....	05
1.1.4. Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition à l'étranger.....	06
1.2. Béton à base de matériaux recyclés.....	10
1.2.1. Intérêt du recyclage dans le génie civil.....	10
1.2.2. Recyclage des granulats de béton.....	10
1.2.3. Description d'un granulats recyclé de béton.....	11
1.3. Béton à base de granulats recyclés.....	12
1.3.1. Propriétés des bétons recyclés durcis.....	12
1.3.1.1. Microstructure, zones inter faciales des bétons recyclés.....	12
1.3.1.2. Propriétés mécaniques des bétons recyclés.....	14
1.3.1.3. La durabilité des bétons recyclés.....	16

1.3.1.4. Le retrait de dessiccation.....	16
1.3.1.5. Synthèse.....	17
1.3.2. Propriétés des bétons recyclés au jeune âge.....	17
1.3.2.1. Ouvrabilité	18
1.3.2.2. Ressuage et consolidation du béton frais.....	21
1.3.2.3. Retrait plastique.....	22
1.4. Amélioration des bétons à base de granulats recyclés.....	23

Chapitre II

2.1. Introduction	24
2.2. Matériaux utilisés	24
2.2.1. Le ciment	24
2.2.2. Les granulats	25
2.2.2.1. Le sable	25
2.2.2.2. Les granulats naturels.....	26
2.2.2.3. Les granulats recyclés.....	26
2.2.3. L'eau de gâchage	27
2.2.4. Ajouts minéraux	27
2.2.4.1. Les laitiers de hauts fourneaux.....	27
2.2.4.2. La fumée de silice	28
2.2.4.3. Superplastifiant.....	28
2.2.5. Le béton	28
2.2.5.1. Béton à base de granulats naturels	29
2.2.5.2. Béton à base de granulats recyclés.....	29
2.2.5.3. Béton à base de granulats recyclés traités.....	29
2.2.6. Composition des bétons.....	30
2.2.7. Confection des éprouvettes.....	30
2.3. Méthodes expérimentales.....	32
2.3.1. Affaissement au cône d'Abrahms.....	33
2.3.2. Résistance à la compression.....	33
2.3.3. Résistance à la traction par flexion.....	34

2.3.4. Absorption d'eau.....	35
2.3.5. Module d'élasticité.....	35
2.3.6. Traitement des granulats recyclés	36

Chapitre III

3.1. Introduction.....	38
3.2. Effet du granulat recycle et pourcentage de substitution.....	38
3.2.1. Résistance à la compression.....	38
3.2.2. Résistance à la traction.....	39
3.2.3 Absorption d'eau.....	40
3.2.4. Module d'élasticité.....	41
3.3. Effet du traitement des granulats recyclés.....	42
3.3.1. Résistance à la compression.....	43
3.3.2. Résistance à la traction.....	44
3.3.3 Absorption d'eau.....	45
3.3.4. Module d'élasticité.....	46
3.4. Effet de la méthode de malaxage.....	48
3.4.1. Résistance à la compression.....	48
3.4.2. Résistance à la traction.....	49
3.4.3. Module d'élasticité.....	50
Conclusion générale.....	52

Référence

Annexe

ملخص :

أصبحت التنمية المستدامة ذات أهمية قصوى في صناعة البناء بسبب الاحتياجات المتزايدة للمجتمعات من حيث البناء وإعادة التأهيل وتجديد المرافق المختلفة. ونتيجة لذلك ، زاد استهلاك الموارد الطبيعية لإنتاج مواد البناء وتولدت كميات كبيرة من نفايات البناء والهدم. يمكن أن تعمل إعادة تدوير وإعادة استخدام هذه النفايات ضد استنفاد الموارد الطبيعية والحفاظ على البيئة. في هذا العمل ، من خلال دراسة تجريبية ، أثر المعالجة بالأسمت وأبخرة السيليكا وأفران الخبث عالية الجودة على أداء الخرسانة القائمة على الركام المعاد تدويره. للقيام بذلك ، تم إجراء تحليل مقارنة بين الخرسانة بناءً على الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره غير المعالج والركام المعاد تدويره الذي تمت معالجته بواسطة تقنيات مختلفة. بالإضافة إلى ذلك ، تم التحقق من تأثير طريقة الخلط الخرساني من خلال اعتماد تقنيتين: الخلط العادي والخلط المزدوج. تم فحص تأثير التقنيات المختلفة التي تمت دراستها من خلال قياس امتصاص الماء ، ومعامل المرونة ، وقوة الانضغاط والشد لمختلف الخلطات الخرسانية المصنعة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها فائدة وفعالية طرق العلاج المختلفة على أداء الخرسانة على أساس الركام المعاد تدويره.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ، الركام المعاد تدويره ، المعالجة ، الأسمت ، دخان السيليكا ، خبث الأفران العالية.

Résumé :

Le développement durable est devenu d'une importance primordiale dans l'industrie de construction à cause des besoins croissant des sociétés en termes de construction, de réhabilitation et de rénovation des différentes facilités. En conséquence, la consommation des ressources naturelles pour la production des matériaux de construction a augmenté et de grandes quantités de déchets de construction et de démolition sont générées. Le recyclage et la réutilisation de ces déchets peuvent agir contre la déplétion des ressources naturelles et préserver l'environnement. Dans ce travail, à travers une étude expérimentale, l'effet du traitement au ciment, à la fumée de silice et aux laitiers de hauts fourneaux sur la performance des bétons à base de granulats recyclés est investigué. Pour ce faire, une analyse comparative a été menée entre des bétons à base de granulats naturels, granulats recyclés non traités et granulats recyclés traités par différentes techniques. De plus, l'effet de la méthode de malaxage du béton a été investigué par l'adoption de deux techniques : malaxage normal et malaxage double. L'impact des différentes techniques étudiées a été examiné à travers la mesure de l'absorption d'eau, le module d'élasticité, la résistance à la compression et à la traction des différents mélanges de bétons confectionnés. Les résultats obtenus montrent l'utilité et l'efficacité des différentes méthodes de traitement sur la performance des bétons à base de granulats recyclés.

Mots clés : béton, granulats recyclés, traitement, ciment, fumée de silice, laitiers de hauts fourneaux.

Abstract:

Sustainable development has become of paramount importance in the construction industry due to the growing needs of societies in terms of construction, rehabilitation and renovation of different facilities. As a result, the consumption of natural resources for the production of building materials has increased and large amounts of construction and demolition waste are generated. The recycling and reuse of this waste can act against the depletion of natural resources and preserve the environment. In this work, through an experimental study, the effect of treatment with cement, silica fume and blast furnace slag on the performance of concretes made with recycled aggregates is investigated. A comparative analysis was carried out between concretes made with natural aggregates, untreated recycled aggregates and recycled aggregates treated with different techniques. In addition, the effect of the concrete mixing method was investigated by adopting two techniques: normal mixing and double mixing. The impact of the different techniques studied was examined through measurements of water absorption, the modulus of elasticity, the compressive and tensile strength of the different concrete mixes made. The results obtained show the usefulness and effectiveness of the different treatment methods on the performance of concretes made with recycled aggregates.

Keywords : concrete, recycled aggregates, treatment, cement, silica fume, blast furnace slag.

Liste des figures

Chapitre 01		
Figure1.1	Procédure de préparation des granulats recyclés.	06
Figure1.2	Schéma d'une installation de production de granulats recyclés.	11
Figure1.3	Schématisation d'un granulats recyclé de béton.	12
Figure1.4	Section de béton recyclé et zones inter faciales (ITZ).	13
Figure1.5	Caractéristiques d'ITZ pour des mortiers réalisés à base de sables recyclés sables pré saturés à l'état SSS ; 2 : sables introduits secs dans le malaxeur.	14
Figure1.6	retrait de dessiccation de bétons recyclés (0 / 20 / 50 / 100 % de gravillons recyclés) en fonction du temps.	16
Figure1.7	Evolution des affaissements au cours du temps.	19
Figure1.8	Evolution du ressuage en fonction du temps de réalisation de la mesure.	22
Chapitre 02		
Figure2.1	Apparence d'un sac de ciment d'ElmaLabiod.	24
Figure2.2	Courbe granulométrique du sable utilisé.	25
Figure2.3	Courbes granulométriques des graviers naturels (8/15) et (15/25) utilisés.	26
Figure2.4	Courbes granulométriques des graviers recyclés (8/15) et (15/25) utilisés.	27
Figure2.5	Malaxeur à béton utilisé.	31
Figure2.6	Schéma de méthode de malaxage.	31
Figure2.7	Moule cubique.	32
Figure2.8	Moule prismatique.	32
Figure2.9	Essai d'affaissement au cône d'Abrahms.	33
Figure2.10	Essai de compression.	34
Figure2.11	Essai de flexion 4 pointe.	34
Figure 2.12	Essai ultrasonique (controls).	36
Figure2.13	Traitement des granulats recyclés.	37
Chapitre 03		
Figure 3.1	Résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés.	38
Figure 3.2	Résistance à la traction par flexion des bétons à base de granulats recyclés.	39
Figure 3.3	Absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés.	40
Figure 3.4	Module d'élasticité dynamique des bétons à base de granulats recyclés.	41

Figure 3.5 Module d'élasticité statique des bétons à base de granulats recyclés.	42
Figure 3.6 Effet du traitement sur la résistance à la compression du béton.	43
Figure 3.7 Effet du traitement sur la résistance à la traction par flexion du béton.	45
Figure 3.8 Effet du traitement sur l'absorption d'eau du béton.	46
Figure 3.9 Effet du traitement sur le module d'élasticité dynamique du béton.	47
Figure 3.10 Effet du traitement sur le module d'élasticité statique du béton.	47
Figure 3.11 Effet de la méthode de malaxage sur la résistance à la compression du béton.	49
Figure 3.12 Effet de la méthode de malaxage sur la résistance à la traction du béton.	50
Figure 3.13 Effet de la méthode de malaxage sur le module d'élasticité dynamique du béton.	50
Figure 3.14 Effet de la méthode de malaxage sur le module d'élasticité statique du béton.	51

Liste des tableaux

Chapitre 01	
Tableau 1.1 Pourcentages de débris générés selon le type de matière, lors de travaux de C&D	07
Tableau 1.2 Quelques caractéristiques mécaniques de bétons recyclés	15
Tableau 1.3 Effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton durci (ACI555R-01, 2001)	17
Tableau 1.4 Effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton frais et son Comportement (ACI555R-01, 2001)	18
Tableau 1.5 Récapitulatif des données expérimentales	19
Tableau 1.6 Influence de la saturation initiale des gravillons recyclés sur l'ouvrabilité des bétons.	20
Tableau 1.7 Mesures de ressuage effectuées sur des bétons recyclés avec 100 % de gravillons recyclés.	21
Chapitre 02	
Tableau 2.1 Propriétés physiques du sable utilisé.	25
Tableau 2.2 Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés.	26
Tableau 2.3 propriétés physiques et mécaniques des graviers recyclés utilisés	27
Tableau 2.4 la description du produit viscocrete tempo 12 sika.	29
Tableau 2.5 Composition des différents mélanges de béton.	30
Tableau 2.6 Désignation des différents mélanges de béton et proportions des différents granulats en (%).	32
Tableau 2.7 Le dosage en matériau cimentaire.	36

Liste d'abréviation

C & D	Construction et de démolition
CO ₂	Dioxyde de carbone
DI	Déchets inertes
DIB	Les déchets industriels banals
DIS	Les déchets industriels spéciaux
DD	Les déchets dangereux
D	Double malaxage
E/C	eau/ciment
ES	L'équivalent de sable
FS	Fumée de silice
GN	Le granulat naturel
GND	Granulats naturels double malaxage
GR	Les granulats recyclés
GR10%	Granulats recyclés 10%
GR20%	Granulats recyclés 20%
GR30%	Granulats recyclés 30%
GRB	Le granulat recyclé de béton
GRC	Les granulats recyclés traités au Ciment
GRCD	Granulats recyclés traités au ciment double malaxage
GRCF	Granulats recyclés traités au ciment et à la Fumée de silice
GRCFD	Granulats recyclés traités au ciment et à la Fumée de silice double malaxage
GRF	Granulats recyclés traités à la Fumée de silice
GRFD	Granulats recyclés traités à la Fumée de silice double malaxage
GRFL	Granulats recyclés traités à la Fumée de silice et aux Laitiers de hauts fourneaux
GRG	Granulats recyclés grossiers
GRL	Granulats recyclés traités aux Laitiers de hauts fourneaux
GRT	granulats recyclés traités
ITZ	l'interface de transition
LHF	Laitiers de hauts fourneaux
MF	Module de Finesse
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions
UIOM	Usine d'incinération d'ordures ménagères
(E_s)	Module d'élasticité dynamique
(E_d)	Module d'élasticité statique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction :

L'augmentation du taux d'industrialisation et d'urbanisation due à la croissance économique et au développement démographique a fait du béton le matériau de construction le plus utilisé dans la construction des ouvrages de génie civil. Cela est dû à la disponibilité de ses différents constituants, la facilité de sa confection et sa mise en œuvre, ses très bonnes propriétés mécaniques, sa bonne tenue à long termes, son coût réduit par comparaison aux autres matériaux de construction. Cela a engendré une production massive du béton qui a atteint 26 milliards de tonnes en 2012. En conséquence, l'augmentation des besoins en granulats et l'épuisement des granulats de bonne qualité rendent la disponibilité des matières premières plus rare. De plus, les matériaux ont tendance à devenir plus chers en raison de l'augmentation des coûts de transport dans certaines régions. La recherche d'autres alternatives aux constituants conventionnels du béton est devenue primordiale.

Le recyclage des déchets dans le domaine de génie civil, et surtout ceux de construction et de démolition, a été l'objet de beaucoup de recherches afin de protéger l'environnement et s'intégrer ainsi au concept de développement durable. Parmi les possibilités les plus prometteuses, le béton à base de granulats recyclés. L'utilisation du béton concassé comme granulats recyclés sert à réduire les espaces de décharge publique et minimiser la consommation des granulats naturels. Cependant, tel qu'il est, le béton à base de granulats recyclés présente des propriétés physiques et mécaniques moins intéressantes que le béton à base de granulats naturels. Pour rivaliser avec les granulats naturels, les granulats recyclés doivent être traités afin d'améliorer leur performance. Plusieurs techniques de traitement des granulats recyclés visant l'amélioration de leurs caractéristiques physiques et mécaniques ont été explorées ces dernières années. Les traitements au ciment, à la fumée de silice (FS) et aux laitiers de hauts fourneaux (LHF), connus pour leur effet positif sur la porosité et la résistance mécanique, présentent des techniques potentielles pour remédier aux lacunes des agrégats recyclés. Ces techniques sont intéressantes car elles sont peu coûteuses et peuvent être pratiquées facilement à une échelle industrielle.

L'objectif de ce travail est l'investigation, à travers une étude expérimentale, de l'effet du traitement au ciment, à la FS et aux LHF sur la performance des bétons à base de granulats recyclés. Pour ce faire, une analyse comparative va être menée entre des bétons à base de granulats naturels, granulats recyclés non traités et granulats recyclés traités par différentes techniques. De plus, l'effet de la méthode de malaxage du béton va être investigué par

l'adoption de deux techniques : malaxage normal et malaxage double. L'impact des différentes techniques étudiées va être examiné à travers la mesure de l'absorption d'eau, le module d'élasticité, la résistance à la compression et à la traction des différents mélanges de bétons confectionnés. Les résultats obtenus vont permettre le jugement de l'utilité et l'efficacité des différentes méthodes de traitement sur la performance des bétons à base de granulats recyclés.

Ce mémoire commence par une introduction générale visant l'éclaircissement de la problématique de cette étude, les objectifs principaux du travail et une description de l'organisation de ce mémoire. Ensuite, une revue bibliographique touchant les différents aspects relatifs au sujet d'étude est présentée dans le deuxième chapitre. Les différents types de déchets de construction et de démolition (C&D) et les possibilités de leur recyclage, les bétons à base de granulats recyclés, leurs propriétés à l'état frais et l'état durci et les techniques d'amélioration de leur performance sont tout bien décrit dans cette partie. Dans le troisième chapitre, une description de la méthodologie d'investigation est donnée. Les caractéristiques physiques des différents matériaux utilisés dans cette étude et le programme des essais entrepris sont bien détaillées. Dans le quatrième chapitre, les résultats de l'étude obtenus sont discutés. Une étude paramétrique a été menée touchant plusieurs critères influençant la performance des bétons à base de granulats recyclés. Les effets des granulats recyclés et du taux de substitution ont été examinés. L'utilité et l'efficacité du traitement au ciment, à la fumée de silice et aux laitiers HF sur la performance des bétons à base de granulats recyclés a été étudiée. De plus, l'effet de la méthode de malaxage a été investigué. Enfin, Ce mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant toutes les leçons tirées de cette étude.

**CHAPITRE I : RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE**

1.1. Recyclage des déchets de construction :

1.1.1 Recyclage des déchets de chantier:

Au début des années 80, les déchets de construction et de démolition aboutissaient généralement dans des décharges. À l'époque, approximativement, 80 millions de tonnes de déchets de la démolition surviennent de reconstruction dans les Communautés Européennes de l'Est chaque année. La quantité est supposée à être doublée à l'an 2000 et triplée à l'an 2020. Ce n'est qu'au cours des années 90, que de grands défis ont surgi, en Europe, quant à la façon d'éliminer ces déchets et que le recyclage est devenu un autre moyen d'évacuation des déchets. Dès lors, la politique de gestion des déchets de construction et de démolition a suivi une stratégie de réduire les déchets d'une manière rentable et dans le respect de l'environnement, tout en se conformant à des règlements et aux priorités de traitement des déchets qui se basent sur le principe de 3R-E

- Réduction de la quantité déchets à la source de sa production.
- Réutilisation directe de la matière ou du matériau récupéré.
- Recyclage, axé sur la fabrication de granulats, Élimination des déchets ultimes [1].

1.1.2. Origine de la production de déchets :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- **Biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- **Chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès qu'on veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- **Technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- **Economiques** : les produits ont une durée de vie limitée ;
- **Ecologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- **Accidentelles** : l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets [2].

1.1.3. Les types des déchets de chantier :

On y trouve aussi bien du béton armé, du ciment-mortier, de la céramique, de la terre recuite, de l'amiante, du plâtre, du bois, du verre, des métaux, des cartons, des plastiques...ainsi que des déchets liquides (huiles, fluides caloporteurs), des piles et accumulateurs, des tubes fluorescents...

Les tailles sont également très disparates.

Les déchets de chantier sont classés, selon leur dangerosité vis à vis de la santé et l'environnement, en trois catégories :

- Les déchets inertes ;
- Les déchets non dangereux et non inertes appelés aussi industriels banals (DIB), assimilables aux déchets ménagers ;
- Les déchets dangereux, appelés aussi déchets industriels spéciaux (DIS) ;

Auxquels s'ajoutent les déchets d'emballages, tels que des palettes, des cartons, des films plastiques, des fûts [3].

1.1.3.1. Les déchets inertes :

Les déchets inertes (DI) sont donc essentiellement des déchets minéraux ou assimilables au substrat naturel non pollués [4].

Les traitements des déchets inertes :

Les déchets inertes peuvent être :

- Réemployés sur le site ;
- Utilisés en remblais de chantier ou de carrière ;
- Recyclés en granulats ;
- Collectés par un centre de tri et de recyclage de déchets de chantier ;

Les déconstructions et les tris sélectifs de matériaux ne permettent pas toujours d'obtenir des déchets entièrement inertes. Aux Pays-Bas, où la valorisation est prioritaire, les décharges d'inertes sont très strictes et n'acceptent pas de déchets de démolition, même triés [4].

1.1.3.2 . Les déchets non dangereux non inertes:

Les déchets non dangereux non inertes par exemple : Emballages, bois, plastiques, métaux, quincaillerie, serrurerie, accessoires pour peinture et matériels souillés secs, isolants, produits mélangés issus de chantiers de réhabilitation, etc. [5]

Les traitements des déchets non dangereux non inertes:

Les DIB peuvent être :

- Réutilisés sur un autre chantier ;

- Collectés par un centre de tri et de recyclage de déchets de chantier ;
- Recyclés ;
- Brûlés dans une usine d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) et déchets assimilés [4].

1.1.3.3. Les déchets organiques :

Ces déchets sont composés de matière organique qui est issu d'organismes vivants végétaux ou animaux [6].

Les traitements des déchets organiques (déchets dangereux):

Les déchets dangereux peuvent être :

- Brûlés dans une usine d'incinération pour déchets dangereux, sauf ceux contenant de l'amiante,

Certains déchets dangereux peuvent être recyclés après avoir été décontaminés, notamment les mélanges de déchets de construction ou de démolition ou encore des déchets provenant d'équipements électriques et électroniques, déchets contenant du mercure.

La gestion du traitement des déchets dangereux est hautement contrôlée. Un bordereau de suivi réglementaire atteste du bon passage de chaque lot aux différentes étapes : production, transport, regroupement, élimination finale. La responsabilité du producteur n'est dérogée que lorsqu'il a reçu l'attestation de prise en charge par tous les maillons de la filière.

Les entreprises du bâtiment ont tout intérêt, sur les chantiers, à ne pas mélanger les déchets dangereux, les DIB et les inertes, car la catégorie de déchets la plus toxique ou polluante détermine la catégorie du mélange, et par conséquent exige le traitement le plus onéreux [4].

1.1.3.4. Les déchets spéciaux :

Ces déchets contiennent des éléments nocifs en quantités variables impliquant des précautions particulières d'élimination. Ce sont les solvants, les produits phytosanitaires... ; certains déchets spéciaux doivent être stabilisés avant stockage. Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable l'ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon à respecter certains seuils pour différents paramètres (pH, siccité, fraction soluble...) [6].

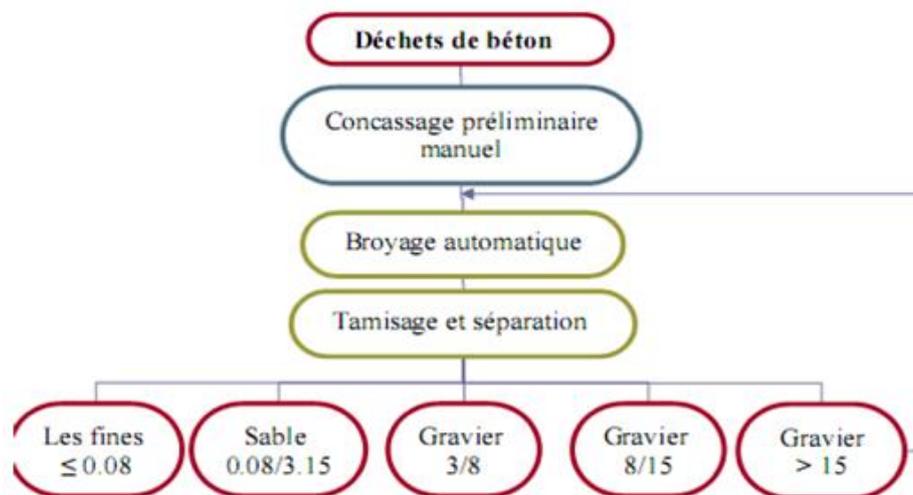


Figure 1-1 : Procédure de préparation des granulats recyclés [7].

1.1.4. Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition à l'étranger :

L'idée de recyclage des matériaux de démolition était envisagée depuis la seconde guerre mondiale ou les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient réemployés en Grande Bretagne et en Allemagne pour la reconstruction de différents ouvrages, les granulats obtenus par ce recyclage comportaient une forte proportion de brique compte tenu de la nature des constructions à cette époque.

Les travaux de recherche qui ont fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton démolé et déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton, connaissent actuellement une large application sur le terrain dans divers pays du monde [9].

Au Canada

Une estimation réalisée à partir de statistiques publiées par Environnement Canada. Quantifiait le volume total de débris de C&D générés au Canada à près de 12,5 millions de tonnes en 2005[10] (0,39 tonne per capita [10]). Selon cette estimation, 36,2 % de la matière était attribuable aux bétons et gravats et 34,6 % à l'asphalte [11]. Le taux de récupération global était estimé à 42,2 %.

L'asphalte présentait le plus haut pourcentage de recyclage avec 72,5 %, suivies des bétons et gravats avec 42 %. Les statistiques sur la production canadienne de débris de construction, de rénovation et de démolition varient selon la source des données. Les chiffres publiés par Statistique Canada pour l'année 2002 sont bien en dessous des estimations d'Environnement Canada : 3,3 et 3,4 millions de tonnes sont comptabilisés respectivement

pour 2000 et 2002. Le Québec était responsable de 18,4 % de ce volume, comparativement à 34,4 % pour l'Ontario.

Le Québec se démarque des autres provinces, par la disponibilité de données actualisées sur la production de ce type de débris. Au Québec en 2008, 4,6 millions de tonnes de matière ont été générées dans le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (0,59 tonne per capita). De ce volume, 3,2 millions de tonnes ont été récupérées, sur un potentiel de 4,3 millions de tonnes [12]. En appliquant la proportion des chiffres de Statistique Canada aux données québécoises, on obtiendrait, pour 2008, un total de 25 millions de tonnes de C&D générées à l'échelle canadienne, incluant 8,6 millions de tonnes pour l'Ontario.

Aux États-Unis

La quantité de débris globale produite annuellement, incluant ceux provenant des infrastructures comme les routes et les ponts, est estimée entre 325 et 350 millions de tonnes. Le béton pourrait représenter environ 60 % de ce tonnage [13].

Les débris de C&D provenant de bâtiments seulement totalisaient 170 millions de tonnes en 2003, selon l'EPA. Leur répartition est la suivante :

- 9 % des nouvelles constructions ;
- 42 % de la rénovation ; et
- 49 % de la démolition [13].

La composition, en poids, des débris provenant de la construction et de la démolition de bâtiments est estimée comme suit [14]:

Tableau 1-1 : Pourcentages de débris générés selon le type de matière, lors de travaux de C&D.

Matière	Pourcentage
Bois	27 %
Bétons, briques et asphalte	23 %
Gypse	14 %
Revêtements de toitures	12 %
Métaux	9 %
Matériaux divers	15 %
Total	100 %

Le taux de récupération des débris comptabilisé par l'EPA était de 48 % en 2003. Ce pourcentage varie selon les États. Les volumes de débris de C&D récupérés les plus importants, l'ont été dans les États de New York (6,3 millions tonnes/an), du Massachusetts (3,1 millions tonnes/an), de la Floride (2,3 millions tonnes/an) et de Washington (2,3 millions tonnes/an).

En France

Plus de 32 millions de tonnes de débris de chantiers de bâtiments et 100 millions de tonnes de débris de travaux publics sont produites chaque année en France [15] (2,06 millions de tonnes per capita). Ce volume atteindrait 309 millions de tonnes, lorsqu'on y comptabilise la récupération de sols. Le taux de recyclage des bétons atteindrait 63 % [16].

En Allemagne

En 2003, 223,4 millions de tonnes de débris de C&D ont été générées (2,7 tonnes per capita), comparativement à 240,8 millions de tonnes en 2002. Le volume produit en 2002 se répartit comme suit :

- 70 % Lors de travaux d'excavation ;
- 24 % Lors de travaux de démolition de bâtiments ;
- 8 % Lors de la démolition de routes ;
- 2 % Sur des sites de construction.

Le pourcentage de récupération, de réutilisation et de recyclage est estimé à 85,6 % en 2002 et 86,2 % en 2003 [17].

Les données sur la proportion des bétons et briques sont imprécises. Comptabilisés dans deux grandes régions, pour les débris provenant de la démolition de bâtiments seulement, ces derniers occupaient 75,7 % dans un cas et 59,1 % dans l'autre, pour une moyenne de 67,4 %.

Au Royaume-Uni

Au total, 89,6 millions de tonnes de débris de C&D ont été comptabilisées au Royaume-Uni en 2005 (1,48 tonne per capita). De ce volume, 51 % ont été recyclés et

16,7 % ont été utilisés pour la régénération de sites ou pour des projets d'infrastructures. Le 31,3 % restant a été enfoui comme déchet [9].

Aux Pays-Bas

Les débris de C&D générés annuellement aux Pays-Bas sont de 25 millions de tonnes (1,5 tonne per capita [9]). Le taux de récupération est le plus élevé de l'Union européenne, atteignant 95 %.

Le recyclage des bétons est présent dans ce pays depuis plusieurs années, favorisé par un manque de disponibilité d'agrégats naturels et d'espace pour les enfouir.

En Australie

Les débris de C&D y représentent 42,4 % de l'ensemble des déchets solides du pays. Ainsi, 13,7 millions de tonnes sont générées (0,64 tonne per capita). De ce volume, 7,8 millions de tonnes sont récupérées, représentant un taux de 57 %. Les bétons occupent 81,8 % du volume des débris de C&D et comptent un taux de récupération de 54 % [9].

Au Japon

Au Japon, 77 millions de tonnes de débris de C&D étaient générées en 2005 (0,6 tonne per capita). Le taux de récupération était de 80 %. Le béton compte pour 42 % de ce volume et l'asphalte %. Le taux de recyclage de ces deux matières est de 98 % [9].

Les chiffres sur les quantités de matières et les taux de récupération sont des indices révélateurs de la volonté des pays à gérer cette matière. On doit toutefois tenir compte, lors de l'analyse des données, des particularités géographiques, des méthodes de construction et des principaux matériaux utilisés [9].

En Algérie

Au cours des 10 dernières années, le taux de génération de débris de construction et de démolition en Algérie a connu une augmentation très remarquable suite aux déchets générés par les entreprises de bâtiments et travaux publics ainsi qu'au vieillissement des constructions et en grande partie au séisme de 2003 qui avait frappé les wilayas d'ALGER, BOUMERDES, TIZIOUZOU, BEJAIA et autres en produisant des millions de tonnes de matériaux secs (briques et béton en particulier) qui résultent de la démolition des bâtiments et des ouvrages d'art sinistrés, les quantités restent inconnues. Les matériaux de démolition sont rarement

recyclés en Algérie en matière d'agrégats pour béton de ciment ou béton bitumineux, malgré le déficit entre l'offre et la demande en granulats qui dépassera les 20% de la production.

1.2. Béton à base de matériaux recyclés

Différents types de déchets de construction et de démolition peuvent être recyclés. Ajouter ou remplacer certains ingrédients spécifiques. Déchets de béton frais ou durci, Démolition, Déchets de maçonnerie, Déchets de verre ou Déchets de plastique, peuvent être ajoutés à la production de béton.

Béton recyclé à base de déchets aux propriétés physiques et mécaniques inférieur par rapport au béton sans déchets. Ils nécessitent une manipulation ou des ajouts spéciaux pour améliorer leurs performances.

1.2.1. Intérêt du recyclage dans le génie civil:

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

Recycler des déchets dans une utilisation 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. Au niveau environnemental, Le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ; le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant [8]
- la récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries.

1.2.2. Recyclage des granulats de béton:

Le recyclage des granulats de béton provenant de la démolition des ouvrages de génie civil répond aux besoins économiques et environnementaux des zones urbanisées. Les

granulats recyclés sont principalement utilisés pour la réalisation de chantiers routiers ou de bétons hydrauliques.

- Ils permettent l'économie des ressources minérales naturelles non renouvelables.
- Ils donnent une seconde vie aux matériaux de déconstruction du bâtiment et des travaux publics et au béton non utilisé sur chantier.
- Ils sont traités et réutilisés en milieu urbain limitant ainsi la part du transport et donc l'impact CO₂.

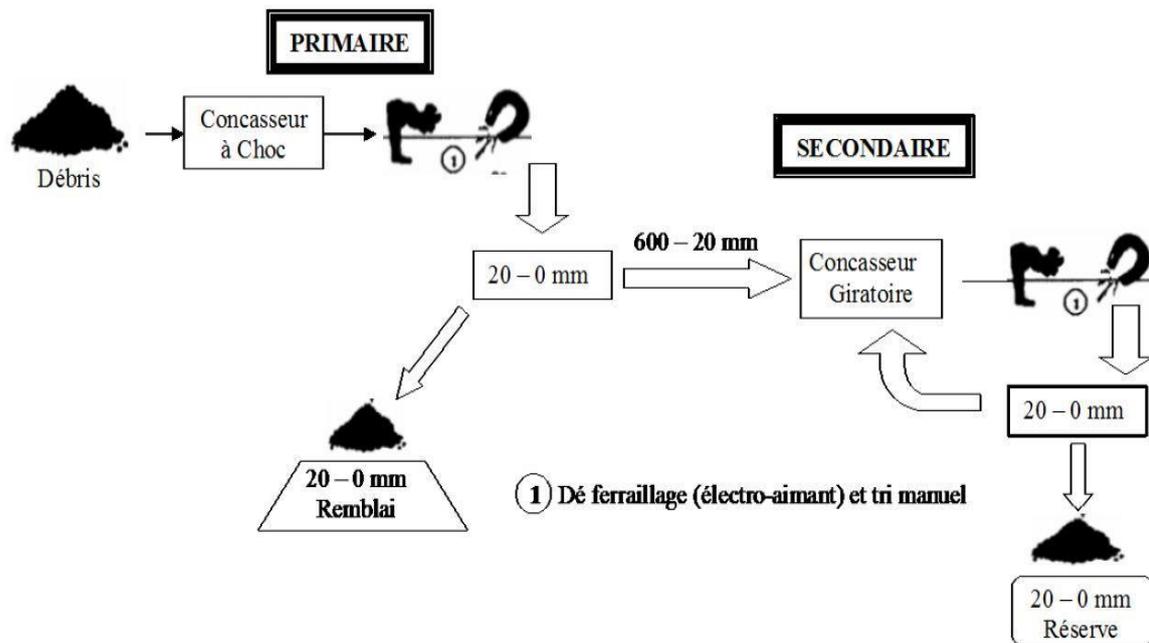


Figure 1-2 : Schéma d' une installation de production de granulats recyclés

1.2.3. Description d'un granulat recyclé de béton :

On entend par « granulat recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de béton de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Les granulats recyclés sont formés du granulat d'origine naturelle et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat original. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du GRB. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un GRB. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La schématisation du granulat recyclé est illustrée sur la figure (1.3).

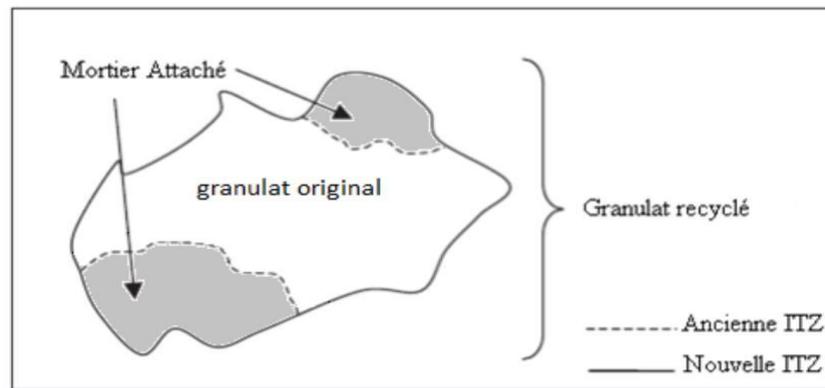


Figure 1.3 : Schématisation d' un granulats recyclés de béton [8]

1.3. Béton à base de granulats recyclés :

Les bétons recyclés ont pour particularité l'intégration de granulats issus de la démolition d'ouvrages en béton et du recyclage des matériaux qui en sont issus en tant que granulats à béton. Cette spécificité conduit à décrire le référentiel normatif spécifique des granulats et des bétons recyclés puis à passer en revue l'impact des gravillons recyclés sur les caractéristiques des bétons produits à l'état durci et à l'état frais.

1.3.1. Propriétés des bétons recyclés durcis

D'une manière générale, de nombreux auteurs ont démontré que l'insertion de granulats recyclés, en jouant sur le taux de substitution de 0 à 100 % ou bien sur la qualité des recyclés, va modifier les propriétés des bétons recyclés à l'état frais et à l'état durci. En effet, les performances du béton recyclé dépendent de la qualité et de la quantité de pâte ancienne [18] [19]; les modifications portent sur les caractéristiques du béton obtenu à l'état frais (affaissement), à l'état durci (masses volumiques, résistance mécanique) ou encore les caractéristiques microstructurales [20].

1.3.1.1. Microstructure, zones inter faciales des bétons recyclés

Pour un béton ordinaire, la zone d'interface entre pâte hydratée et gravillon est un point particulier du béton car cette interface doit assurer un transfert correct des contraintes de la pâte au gravillon [21]. Cette interphase (ITZ) de quelques microns est due à un effet paroi du grain et est le lieu de plusieurs phénomènes locaux de transport d'eau et d'hydrates [22].

Pour un béton recyclé, la présence de gravillons poreux avec de fortes capacités d'absorption, génère des capacités d'échange d'eau gravillons pâte plus importante ce qui influe sur les conditions de formation de l'ITZ [22].

D'autre part, la présence d'ancienne pâte dans les gravillons recyclés, cause la présence de deux interphases, la première qui est à l'interface entre les granulats d'origine et le mortier « parent » et la deuxième qui est l'interface entre le mortier d'origine du gravillon recyclé et la nouvelle pâte, (figure 1.4) [22] [23].

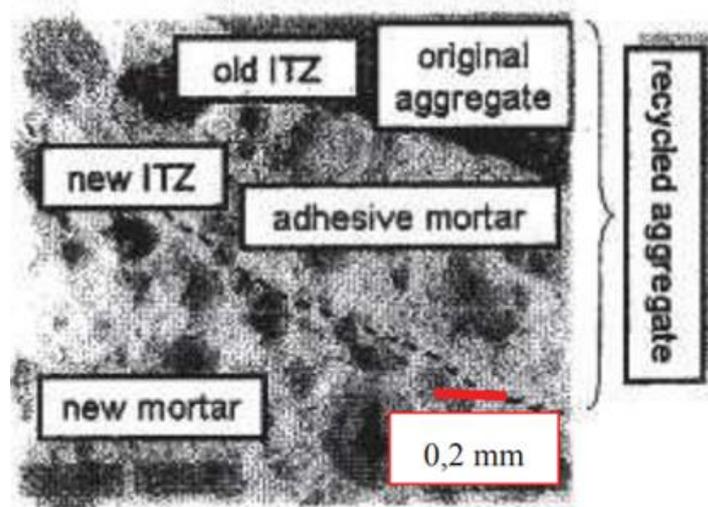


Figure 1.4 : section de béton recyclé et zones inter faciales (ITZ) [21].

C'est à ce niveau qu'un point faible des bétons recyclés est identifié, L'ancienne et la nouvelle pâte ont des rapports E_{eff}/C différents et donc des résistances mécaniques différentes. La résistance de cet ensemble ancienne-nouvelle pâte sera obtenue en considérant la pâte aux caractéristiques mécaniques les plus faibles [23] [21].

Les caractéristiques microstructurales du béton recyclé sont également fonction des méthodes de malaxage et du mode de saturation des granulats recyclés [24].

Montrent pour des mortiers, (figure 1.5), que le taux de saturation initial des granulats induit un transfert hydrique local gravillons pâte. Il s'ensuit une augmentation (gravillons SSS) ou une réduction (gravillons secs) locale du rapport E/C et par conséquent des caractéristiques mécaniques locales de l'interface.

Montrent que les résistances à la compression du béton recyclé sont meilleures du fait de la plus grande absorption d'eau et de la meilleure rugosité de surface des granulats recyclés.

Mettent en avant de meilleures résistances à l'abrasion du béton recyclé comme la conséquence d'une meilleure ITZ gravillons recyclés/nouveau mortier

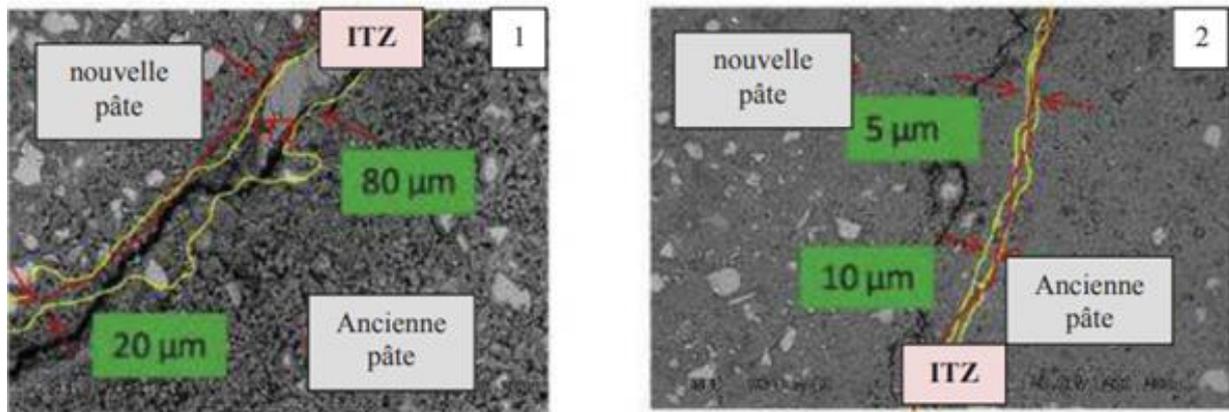


Figure 1.5 : caractéristiques d'ITZ pour des mortiers réalisés à base de sables recyclés 1 : sables pré saturés à l'état SSS ; 2 : sables introduits secs dans le malaxeur [24].

1.3.1.2. Propriétés mécaniques des bétons recyclés :

Dans la littérature, de nombreux bétons recyclés ont été étudiés. Une synthèse est donnée dans le tableau 1.2 dont l'analyse met en évidence l'influence du taux de substitution et de la qualité des granulats recyclés sur les paramètres mécaniques du béton recyclé.

Les résistances mécaniques décroissent quand le taux de remplacement par des granulats recyclés augmente : 100 % de gravillons recyclés amènent 10 à 25 % de réductions des résistances [25].

Si le taux de remplacement par des granulats recyclés reste en dessous de 20 à 30 %, les résistances mécaniques évoluent peu par rapport au béton témoin [26].

Toutefois, il est possible d'atteindre de bonnes valeurs de résistance à la compression, voire d'obtenir un béton recyclé de meilleures caractéristiques que le béton « parent », [27]. Il faut jouer sur le rapport E/C du béton recyclé, utiliser un super plastifiant, augmenter la quantité de ciment, et modifier le mode de fabrication (saturation des gravillons recyclés, eau d'ajout, malaxage) [28] [29].

La résistance en traction simple, en flexion ou au cisaillement évolue sensiblement avec le taux de substitution par des granulats recyclés, avec une baisse de 10 à 30 % pour 100 % de gravillons recyclés dans le béton [26].

De la même manière que précédemment, la littérature met en évidence une baisse sensible du module de Young du béton avec l'augmentation de la quantité de gravillons recyclés.

Tableau 1.2 : quelques caractéristiques mécaniques de bétons recyclés [24].

Réf.	Pourcentage de substitution (%)				Adjuvant ou addition	Résistance du béton recyclé / béton témoin		Module E du béton recyclé / béton témoin	Facteurs constants	
	Gravillons (G) Sable (S)	(G) recyclé	(G) naturel	(S) recyclé		(S) naturel	f_{cj}			f_{tj}
[29]		100	0	0	100	-	1.0	0.93	1.0	dosage de ciment / ouvrabilité / granulométrie / béton > 25MPa
[25]		100	0	0	100	-	0.9	-	-	dosage de ciment / teneur en eau
[31]		100	0	0	100	-	0.8 à 0.9	-	0.7 à 0.85	dosage de ciment / ouvrabilité
[36]		100	0	0	100	-	0.75 à 0.86	-	-	Eau totale constante – gravillons SSS, secs ou à 50 % SSS
[26]		20-50	80-50	0	100	S u p e r P l a s t i f i a n t	0.97	0.98		dosage de ciment / teneur en eau
[26]		100	0	0	100		0.87	0.9		dosage de ciment / teneur en eau
[26]		25-50	75-50	0	100		0.95	-	-	dosage de ciment / teneur en eau
[26]		100	0	0	100		0.84	-	-	dosage de ciment / teneur en eau
[20]		100	0	0	100		0.9	0.86	0.92	E/C constant (pas de correction d'eau) – gravillons SSS, secs ou à 50 % SSS
[33]		50	50	0	100	6.2% de ciment	1.0	-	-	dosage de ciment / ratio E/C
[35]		50	50	0	100	8% fumée de silice	0.96	1.0	-	Ouvrabilité / ratio E/C / grade de béton visé 30MPa
[27]		100	0	0	100	aucun	0.78 à 0.81			E/C constant ou affaissement au cône constant – granulats SSS

1.3.1.3. La durabilité des bétons recyclés :

En termes de pénétration des chlorures et de carbonatation, les performances des bétons recyclés sont inférieures aux bétons témoins à base de gravillons naturels. Plus le taux de recyclés augmente plus les caractéristiques se dégradent [21] [25] [27]. Par ailleurs, les bétons recyclés ont des performances inférieures en termes de résistances aux sulfates [30].

1.3.1.4. Le retrait de dessiccation :

Le retrait de dessiccation augmente avec le taux de substitution par des gravillons recyclés [31] [29] [32]. Les recommandations RILEM préconisent de prendre en compte une majoration de 50 % du retrait pour 100 % de gravillons recyclés.

Proposent des coefficients de majoration en fonction du pourcentage de recyclés et allant jusqu'à 1,8 pour 100 % de gravillons recyclés. Pour de faibles pourcentages de substitution, (< 20%), comme l'illustre la figure 1.6, le retrait reste proche de celui du béton témoin. La fissuration de retrait reste également comparable à celle du béton témoin [31].

Le retrait du béton recyclé peut être réduit si le rapport E/C est réduit ou bien quand des cendres volantes ou des adjuvants tels que des supers plastifiants sont intégrés à la formulation [26].

L'utilisation des fines recyclées est souvent limitée car les effets sont bien plus prononcés. La nature des gravillons utilisés et leur rigidité en particulier peut également influencer sur les valeurs de retrait des bétons [32].

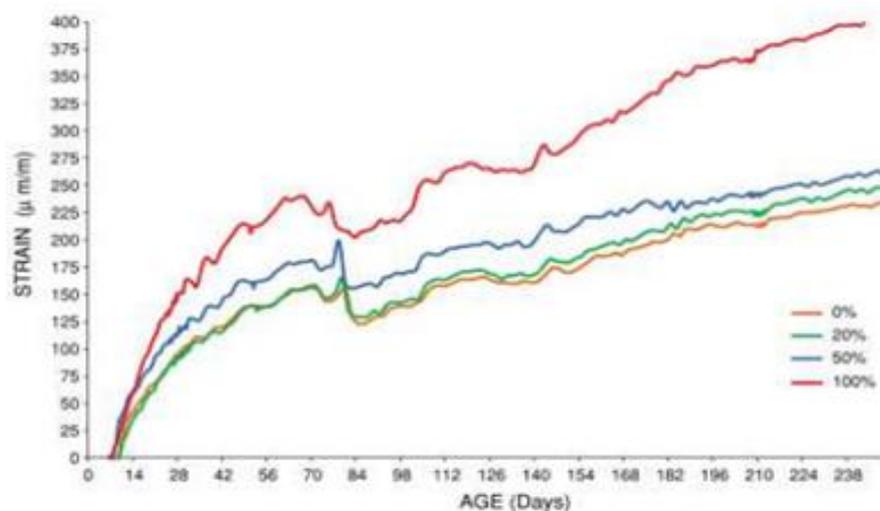


Figure 1.6 : retrait de dessiccation de bétons recyclés (0 / 20 / 50 / 100 % de gravillons recyclés) en fonction du temps [29].

1.3.1.5. Synthèse

L'utilisation des granulats recyclés peut avoir des effets variables sur les propriétés physiques et mécaniques du béton durci (tableau 1.3).

Tableau 1.3 : effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton durci (ACI555R-01, 2001)

Changements attendus en comparaison avec des mélanges similaires produits à partir de granulats naturels		
Propriétés	Gravillons recyclés seulement	Sables et gravillons recyclés
Résistance à la compression	0 – 24 % en moins	15 – 40 % en moins
Résistance à la traction	0 – 10 % en moins	10 – 20 % en moins
Module d'élasticité	10 – 33 % en moins	25 – 40 % en moins
Retrait de dessiccation	20 – 50 % en plus	70 – 100 % en plus
Fluage	30 – 60 % en plus	30 – 60 % en plus
Densité	0 – 10 % en moins	5 – 15 % en moins

La pâte de ciment présente dans les gravillons recyclés est la principale raison des modifications de propriétés. Elle pilote le comportement des bétons recyclés. Pour des taux de substitution en gravillons recyclés jusqu'à 100 % [33], observent une augmentation du retrait de dessiccation (jusqu'à + 50 %), du fluage, de l'adsorption d'eau (jusqu'à + 50 %) ainsi qu'une baisse des résistances (jusqu'à - 25 % en compression, et - 10 % en traction ou flexion), des modules d'élasticité (jusqu'à - 45 %) et des résistances au gel (faible).

1.3.2. Propriétés des bétons recyclés au jeune âge :

L'utilisation de granulats recyclés peut altérer les propriétés et le comportement macroscopique du béton frais. L'ampleur des effets qui est récapitulée dans le tableau 1.4 varie essentiellement avec la qualité et la quantité de granulats recyclés dans le béton (ACI555R-01, 2001).

Tableau 1.4 : effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton frais et son Comportement (ACI555R-01, 2001)

Changements attendus en comparaison avec des mélanges similaires produits à partir de granulats naturels		
Propriétés	Gravillons recyclés seulement	Sables et gravillons recyclés
Ouvrabilité	Similaire à légèrement inférieure	Légèrement à significativement Inférieure
Etats de surfaces, finitions	Similaire à plus difficile	Plus difficile
Ressuage	Légèrement moins	Moins
Demande en eau	Plus grande	Beaucoup plus
Air interne	Légèrement plus	Légèrement plus

1.3.2.1. Ouvrabilité :

A volume de pâte constant, l'ouvrabilité des bétons recyclés est conditionnée par deux paramètres clefs :

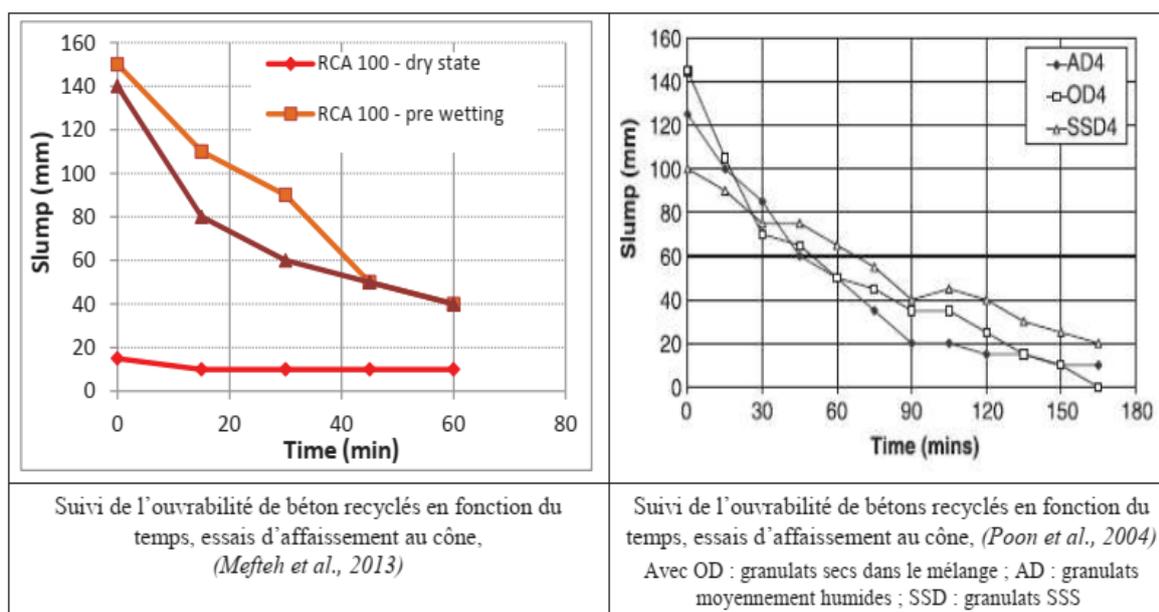
- L'angularité et la rugosité des recyclés plus grande que les naturels ce qui réduit la plasticité et l'ouvrabilité du béton frais.
- L'eau présente dans la pâte du béton qui est le paramètre majeur de contrôle de l'ouvrabilité et qui va être liée à la forte absorption des gravillons recyclés.

En ce qui concerne l'étude du suivi de l'ouvrabilité de bétons recyclés au cours du temps on peut faire référence aux travaux de [34].Le tableau 1.5 met en parallèle quelques données expérimentales.

Tableau 1.5 : récapitulatif des données expérimentales

Ref.	[34]	[36]
Granulats recyclés	0 / 5 mm – 10 / 20 mm	10 mm – 20 mm
3 états	Secs, SSS, pré humidifiés (état SSS)	Secs, SSS, état ambiant (50 % étatSSS)
E/C	0,54 (189 Kg d'eau efficace).eau d'ajout constante	0,57 (205 Kg d'eau efficace) eau efficace (ou totale) constante
Taux de substitution par des graviers recyclés	0 / 20 / 40 / 60 / 80 / 100 %	0 / 20 / 50 / 100 %
Mesures de l'affaissement au cône	0, 15, 30, 45, 60 mn	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 ... 165 mn

Les résultats obtenus pour des taux de substitution de 100 % des gravillons sont récapitulés sur la figure 1.7 :

**Figure 1.7** : évolution des affaissements au cours du temps.

Les conclusions relatives aux valeurs d'affaissement à l'état initial ne font pas l'objet d'un consensus. En effet, [34] mettent en évidence une augmentation de l'affaissement lorsque la saturation des granulats est croissante : plus les gravillons sont secs, plus ils ont pris de l'eau à la pâte pour se saturer et plus l'affaissement est faible. Ces constats sont confirmés par les résultats de [20], récapitulés au sein du tableau 1.6.

Tableau 1.6 : influence de la saturation initiale des gravillons recyclés sur l'ouvrabilité des bétons [20].

Echantillons	Affaissement au cône (mm)
Béton témoin ; gravillons roulés 100% naturels	55
Béton recyclé : gravillons : 50 % naturels + 50 % recyclés secs dans le malaxeur	10
Béton recyclé ; gravillons : 100 % recyclés secs dans le malaxeur	0
Béton recyclé ; gravillons : 100 % recyclés SSS dans le malaxeur	55

Ont corrigé l'eau d'ajout afin de rester à eau efficace constante et afin de compenser l'absorption des granulats à 24 h. Il existe donc un excès d'eau dans le béton qui se traduit par des valeurs d'affaissement supérieures pour les gravillons dont la saturation initiale est la plus faible. Des conclusions similaires sont faites pour les mortiers [24].

Pour des granulats calcaires saturés à différents taux de saturation préalables, Cortas(2012) cite (A.M Alhozaimy) qui a travaillé à E_{eff}/C constant et (C.Khoon / W. Chi) qui ont travaillé à eau d'ajout constante et qui ont faits les mêmes constats contradictoires que [34].

Le choix de travailler à eau d'ajout ou à eau efficace constante a une forte influence sur l'affaissement du béton et sur les conclusions qui en résultent.

Dans les deux cas d'essais des valeurs de pré-saturation intermédiaires proches de 50% de l'absorption nominale des gravillons sont jugées comme intéressantes à étudier [34] [20].

La teneur en eau initiale des granulats recyclés est une donnée primordiale concernant l'ouvrabilité du béton [20]. Les résultats obtenus mettent en lumière l'influence de l'absorption des gravillons recyclés sur le rapport E_{eff}/C et sur l'ouvrabilité du béton.

Si à l'état initial, les gravillons ne sont pas à l'état « SSS », à E/C constant, le béton recyclé nécessite une quantité d'eau supplémentaire (5 à 15 %) pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire au béton de granulats naturels [31].

Cette absorption d'eau des recyclés dans la pâte implique une perte d'ouvrabilité et une baisse du rapport E_{eff}/C [20]. Il est donc conseillé de pré-mouiller les granulats avant malaxage.

La pré-saturation des granulats recyclés a un effet favorable sur l'ouvrabilité [20]. La conservation d'une ouvrabilité constante sans augmenter l'eau totale peut aussi être obtenue par l'adjuvantation du béton à l'aide de super plastifiant [27].

L'air occlus contenu dans le béton recyclé est souvent supérieur de 0,5 à 1 % par rapport au béton témoin de granulats naturels (ACI555R-01, 2001) [35].

1.3.2.2. Ressuage et consolidation du béton frais :

Le ressuage de bétons recyclés a été étudié par [20]. Dont les conditions d'essais sont rappelées dans le tableau 1.7.

Tableau 1.7 : mesures de ressuage effectuées sur des bétons recyclés avec 100 % de gravillons recyclés.

ref.	Particularités des tests	Résultats
[36]	E/C = 0,45 ou 0,55 Granulats recyclés air dried +complément d'eau dans le malaxeur (SSS) mesures du ressuage à 0, 30, 60, 120 mn	Capacité de ressuage total (bleeding capacity) Débit surfacique de ressuage f (temps)(bleeding rate)
[37]		
[20]	E/C constant par formule de béton Granulats recyclés de types 1 et type 3 selon normes coréennes (2 à 6 % d'absorption) granulats recyclés SSS	Quantité d'eau ressuée au cours du temps

La capacité de ressuage va diminuer avec la capacité d'absorption des granulats recyclés utilisés et avec le taux de substitution, c'est-à-dire avec la capacité totale d'absorption des granulats recyclés [20].

D'une part les capacités de ressuage total de même que le débit de ressuage sont croissants avec le taux de substitution de gravillons recyclés. D'autre part, le moment où les mesures de ressuage sont faites influe aussi largement sur les résultats, tel que le présente la figure 1.8. Plus le ressuage n'est mesuré tard, plus la capacité de ressuage total et le débit de ressuage diminuent. Pour [36].

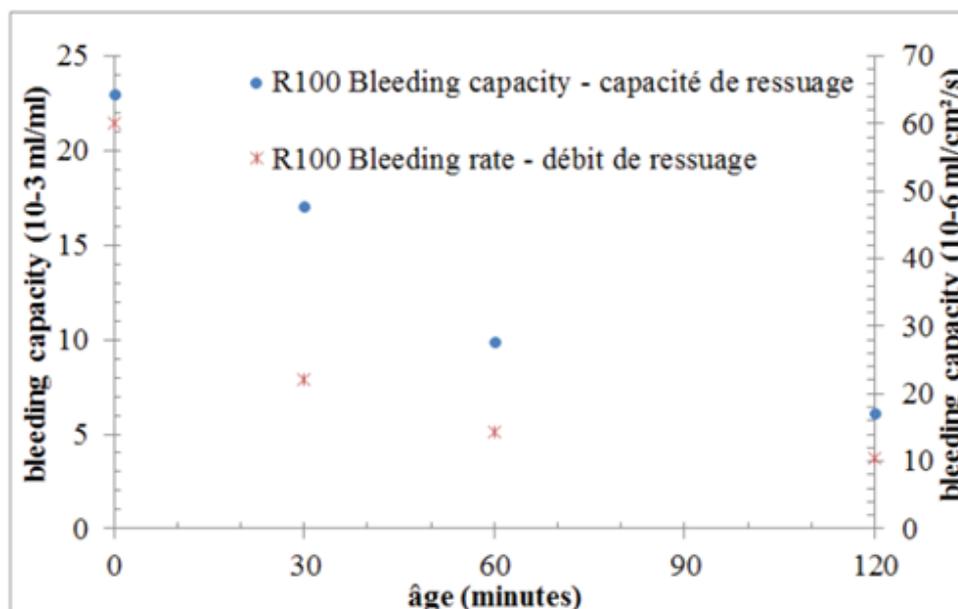


Figure 1.8 : évolution du ressuage en fonction du temps de réalisation de la mesure, [36].

Le ressuage dépend donc essentiellement du rapport E/C de la quantité et de la qualité (donc des capacités d'absorption) des gravillons recyclés [36] [20], de la quantité d'eau de saturation des gravillons recyclés éventuellement introduite comme eau d'ajout dans le malaxeur [37].

Concluent que le ressuage démarre plus tard pour les bétons recyclés et d'autant plus tard que les gravillons ont de forts taux d'absorption d'eau [20].

Montrent que le temps de ressuage sera plus long si le démarrage des essais de ressuage se décale dans le temps, + 50 % de temps (110 mn) pour un décalage du point de démarrage de 30 mn. [36] [37].

1.3.2.3. Retrait plastique :

La littérature propose de nombreuses études du retrait de dessiccation à long terme. Néanmoins, les études relatives au retrait de dessiccation de bétons recyclés à l'état plastique sont rares. Par exemple, ont réalisé une synthèse très large des études relatives au retrait des bétons recyclés mais elle concerne le retrait total du béton à l'état durci [32].

Montrent que les granulats poreux permettent de réduire le retrait du béton par effet de cure interne due à la porosité plus élevée des gravillons recyclés. Ces constats sont relatifs à un béton durci (valeur à 90 jours) et sont contradictoires avec toute la bibliographie citée au 4.2.4 du présent rapport.

Au jeune âge, ont étudié le retrait gène a l'aide des modes opératoires d'essais allemands développés par la «Technical Académie Aachen ». Cet essai permet de mesurer l'effet de la dessiccation (par lampes halogènes) sur le béton jeune (<24 heures) par la comptabilisation des fissures présentes. Ils constatent que les bétons recyclés se comportent mieux à la fissuration au jeune âge que les bétons témoins adjuvantes ou non avec des agents anti-retrait. Ils concluent également à l'existence du potentiel de cure interne des gravillons recyclés et a l'inefficacité des agents anti-retrait sur les bétons recyclés.

1.4. Amélioration des bétons à base de granulats recyclés:

Il y a deux voies couramment utilisées pour l'amélioration de la performance des granulats de béton recyclés: la suppression ou le renforcement de la surface extérieure de qualité médiocre causée par le vieux mortier de ciment. L'imprégnation des granulats recyclés avec une solution de fumée de silice a été tentée [38]. Les résultats indiquent que la résistance à la compression à 7 et 28 jours était de 30% et 15% supérieure respectivement à celle des échantillons de référence. Le verre soluble (Na_2O . NSiO_2) a également été utilisé pour renforcer la faible surface de RCA [39]. L'absorption d'eau et de la valeur de concassage ont été réduites. De plus, une sorte de coulis cimentaire (ciment, cendres volantes, fumée de silice ou de laitier de haut fourneau) a été utilisé à travers une approche en deux étapes pour envelopper les granulats recyclés. Les images en utilisant un microscope à balayage électronique ont montré qu'une zone de transition entre le béton et les granulats plus dense a été obtenue [40].

Contrairement aux procédés de renforcement mentionnés ci-dessus, certains chercheurs ont tenté de découvrir une façon possible d'enlever le vieux mortier adhérent à la surface, telles que le pré-trempage des granulats avec du HCl, H_2SO_4 ou H_3PO_4 [28]. Pour une collection facile de granulats du béton démolé et un taux de récupération plus élevé d'agrégats d'origine [41]. Ont établi une technique de modification de la surface des agrégats d'origine, dans le but de renforcer l'effet de pelage total sans aucune dégradation des propriétés mécaniques de la matrice de mortier au cours de la procédure de broyage. Un type d'huile et un agent d'amélioration de type silane ont été utilisés pour la modification de la surface de l'agrégat d'origine avant que le béton est coulé. La qualité des granulats dérivés ici a été améliorée.

CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1. Introduction :

L'objet de ce chapitre est la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des bétons étudiés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimentale.

J'ai analysé les caractéristiques des granulats recyclés grossiers (gravies) et des granulats ordinaires entrant dans la composition des bétons. En effet, notre recherche a pour objet l'étude de l'effet du traitement des granulats recyclés au ciment et à la fumée de silice sur la performance des bétons à base de granulats recyclés

2.2. Matériaux utilisés :

2.2.1. Le ciment :

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland composée CPJ-CEM II /A. C'est un ciment conforme à la norme NA 442-2000. Il provient de la cimenterie d'ElmaLabiod (wilaya de Tébessa). Ce ciment est obtenu par le mélange de clinker finement broyé avec certains ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypseen tant que régulateur de prise. Ce produit convient aux différents ouvrages de génie civil.

La résistance caractéristique du ciment après 28 jours de cure à l'eau est de 42.5 MPa.

La Surface spécifique du ciment =entre 2900 et 3100 cm^2/g

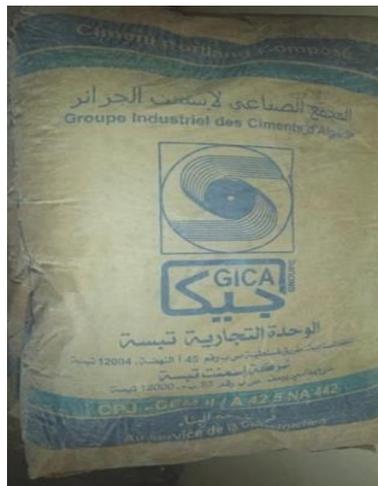


Figure 2. 1 : Apparence d'un sac de ciment d'ElmaLabiod.

2.2.2. Les granulats :

2.2.2.1. Le sable:

Le sable utilisé pour la confection de béton est un sable naturel (0/5) provenant de la carrière d'Elmalabiod wilaya de Tébessa. Les caractéristiques physiques du sable utilisé sont les suivantes :

Tableau 2. 1 : Propriétés physiques du sable utilisé.

Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1643
Masse volumique spécifique (Kg/m^3)	2521
Equivalent de sable (%)	75
Module de finesse	2.6

L'analyse granulométrique du sable a résulté dans la courbe granulométrique suivante :

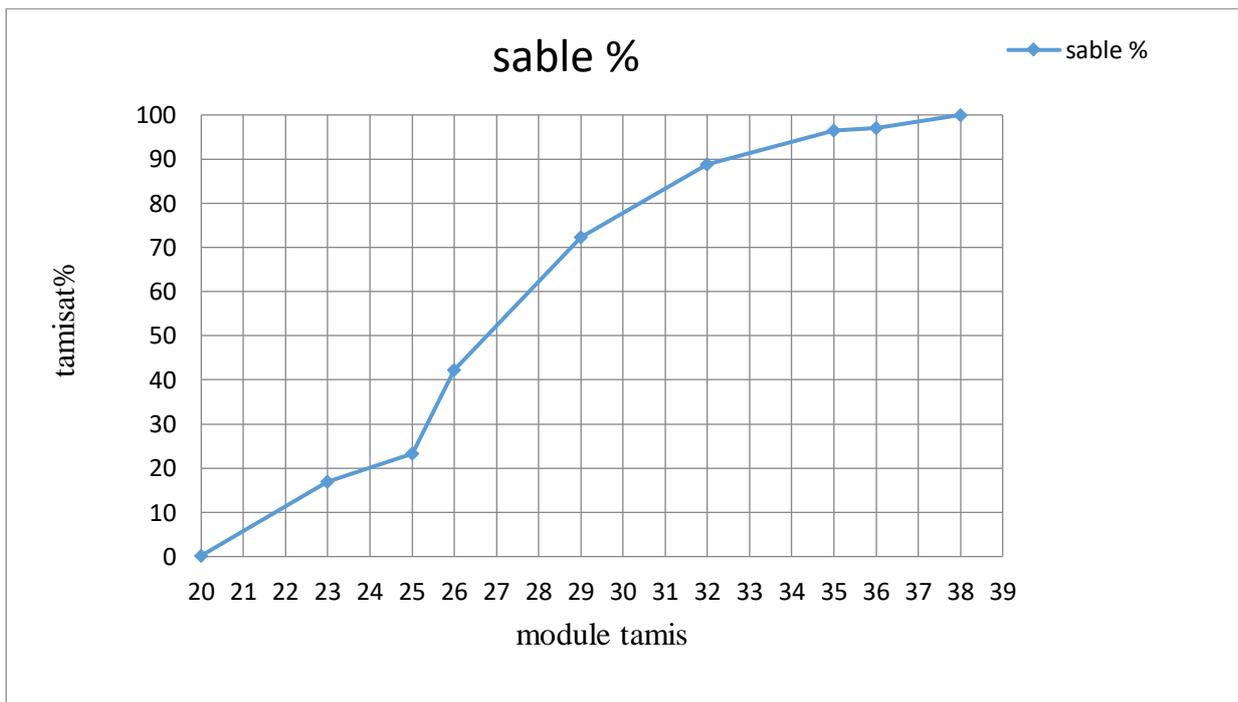


Figure 2. 2 : Courbe granulométrique du sable utilisé

2.2.2.2. Les granulats naturels :

Deux classes de graviers naturels (8/15) et (15/25) provenant de la carrière d'Elmalabiod ont été utilisées pour la confection de béton. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques ont réunies dans le tableau 2.2 :

Tableau 2. 2 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés

Classe de graviers	8/15	15/25
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1426	1322
Masse volumique spécifique (Kg/m^3)	2615	2640
Coefficient d'absorption d'eau (%)	1.2	1.2

L'analyse granulométrique des graviers a résulté dans les courbes granulométriques suivantes :

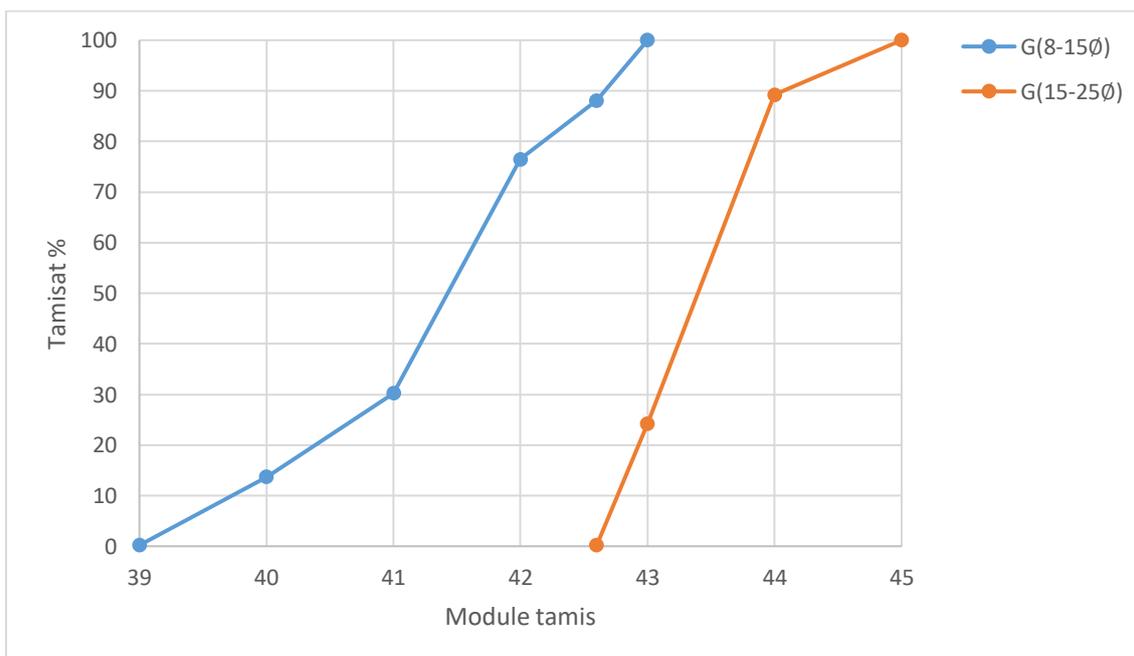


Figure 2. 3 : courbes granulométriques des graviers naturels (8/15) et (15/25) utilisés

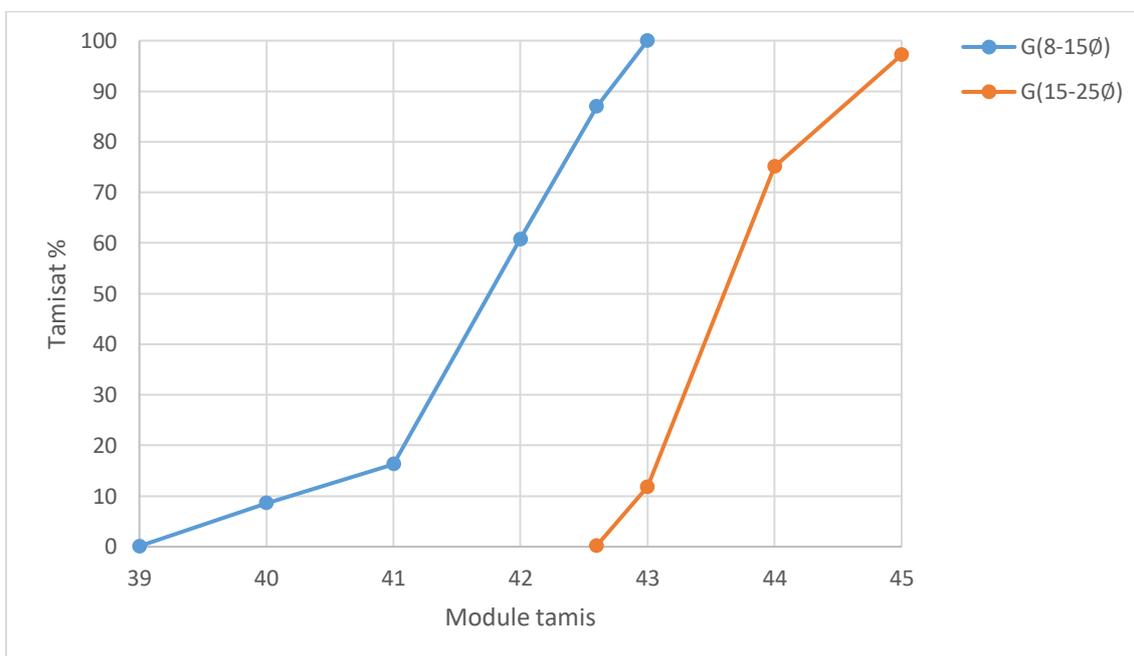
2.2.2.3. Les granulats recyclés :

Deux classes de graviers (8/15) et (15/25) produit par le concassage de déchets de béton et isolement par tamisage. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont les suivantes :

Tableau 2. 3 : propriétés physiques et mécaniques des graviers recyclés utilisés

Classe de graviers	8/15	15/25
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1149	1238
Masse volumique spécifique (Kg/m^3)	2440	2500
Coefficient d'absorption d'eau (%)	4.98	3.47

L'analyse granulométrique des graviers recyclés a résulté dans les courbes granulométriques suivantes :

**Figure 2. 4** : courbes granulométriques des graviers recyclés (8/15) et (15/25) utilisés

2.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet du laboratoire des matériaux de construction de l'Université Labri Tébessi –Tébessa, qui est en principe exempte d'impuretés. La température de l'eau n'a pas été contrôlée lors des gâchées.

2.2.4. Ajouts minéraux :

2.2.4.1. Les laitiers de hauts fourneaux :

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-Hadjar 'Annaba, Algérie', c'est une poudre d'une surface spécifique Blaine de 8500 cm^2/g .

Les principaux composants chimiques de ce type de laitiers sont la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie qui représentent 95 à 97% de la composition totale du laitier.

2.2.4.2. La fumée de silice :

La fumée de silice provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferro silicium. Elle est formée de particules sphériques très fines (environ 0,001 mm) contenant au moins 85 % en masse de dioxyde de silicium amorphe. La fumée de silice utilisée dans ce travail provient de la société MBCC GROUPE sous forme de poudre de couleur grise foncée. Cette Fumée de silice est désignée par le nom «MEDAPLAST HP».

2.2.4.3. Superplastifiant :

Les superplastifiants sont des adjuvants hauts réducteurs d'eau qui réduisent fortement les quantités d'eau nécessaires pour une consistance de béton souhaitée à l'état frais. Ils permettent d'augmenter les résistances initiales du béton via la réduction d'eau mais également la maniabilité la pompabilité lors de la mise en œuvre. Ils favorisent la production de bétons fluides, bétons Auto-Plaçant, bétons Auto-Nivelant, bétons à Haute Performance et bétons à très Haute Performance. Le super plastifiant utilisé dans ce travail est le **SikaViscocreteTempo 12**. L'affiche technique de ce produit est donnée dans le tableau (2.4).

2.2.5. Le béton:

Le béton est un matériau composite dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Il est composé essentiellement de granulats (gravier, sable), de ciment et d'eau de gâchage. Souvent, des adjuvants sont utilisés pour améliorer ou acquérir certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies.

Dans cette étude, et dans le but d'étudier l'effet du traitement des granulats recyclés au ciment à la fumée de silice et aux laitiers HF sur la performance des bétons à base de granulats recyclés, différents mélanges ont été confectionnés en utilisant les constituants présentés précédemment. Trois catégories de mélanges de béton ont été étudiées : béton à base de granulats naturels, béton à base de granulats recyclés et béton à base de granulats recyclés traités au ciment, à la fumée de silice et aux laitier HF.

Tableau 2.4 : Fiche technique de SikaViscocrete Tempo 12.

Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fût de 230 kg ▪ Cubi de 1100 kg ▪ Vrac
Aspect / Couleur	Liquide brun clair à foncé
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et ré homogénéisé.
Densité	1,06 ± 0,01
Valeur pH	4,5 ± 1,0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %
Dosage	Plage de dosage : 0,2 à 3,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant

2.2.5.1. Béton à base de granulats naturels:

Cette catégorie a servi de référence pour la comparaison entre les propriétés des deux autres catégories.

2.2.5.2. Béton à base de granulats recyclés:

Dans cette catégorie, et selon le type et le pourcentage de substitution des granulats recyclés, plusieurs mélanges ont été réalisés :

- Béton à base de granulats grossiers recyclés (GRG) pour des pourcentages de substitution de 10%, 20% et 30%.

2.2.5.3. Béton à base de granulats recyclés traités:

Dans cette catégorie, et selon le type des granulats recyclés traités, plusieurs mélanges ont été réalisés. Le taux de substitution des granulats naturels a été fixé à 20%. Les mélanges confectionnés sont les suivants :

- Béton à base de granulats grossiers recyclés traités au ciment(**GRC**)
- Béton à base de granulats grossiers recyclés traités à la fumée de silice (**GRF**)
- Béton à base de granulats grossiers recyclés traités au laitier (**GRL**)
- Béton à base de granulats grossiers recyclés traités au ciment et à la fumée de silice(**GRCF**)

- Béton à base de granulats grossiers recyclés traités à la fumée de silice et au laitier (**GRFL**)

2.2.6. Composition des bétons:

Le calcul de la composition du béton a été fait en utilisant la méthode Dreux-Gorisse. Pour les différents mélanges, un rapport eau/ciment (E/C) identique a été adopté afin d'investiguer l'effet des granulats recyclés traités ou non sur l'ouvrabilité du béton. Le tableau 2.5 donne la composition du béton à base de granulats naturels. La composition des différents mélanges réalisés est identique à celle du béton de référence (à base de granulats naturels). Le tableau (2.5) donne la désignation et les proportions des différents types de granulats des différents mélanges de béton réalisés.

Tableau 2.5:Composition des différents mélanges de béton.

Constituant	Dosage kg/m ³ de béton
Ciment	350
Eau	175
Sable 0/5	682.4
Gravier 8/15	508.2
Gravier 15/25	604.7
Super plastifiant	1% masse (ciment)

2.2.7. Confection des éprouvettes :

Un malaxeur à béton a été utilisé pour mélanger les différents constituants du béton. Un malaxeur électrique fait gagner le temps et assure l'obtention d'un mélange plus homogène. Deux méthodes de malaxage ont été adoptées dans cette étude : un malaxage normal et un malaxage double. Ces méthodes sont décrites dans la figure (2.6). Le malaxage double vise à imprégner la couche superficielle des granulats recyclés par un coulis de ciment afin d'améliorer leur qualité sans recours à une immersion préalable. Après malaxage, le mélange obtenu est coulé dans les moules des différentes éprouvettes à confectionner et vibré à l'aide d'une table de vibration. La consistance du mélange obtenu est vérifiée par la méthode d'affaissement au cône d'Abrahms. Un béton de consistance ferme a été exigé lors de la formulation du béton. Un affaissement de 3 à 5 cm est alors acceptable.



Figure 2. 5 : Malaxeur à béton utilisé.

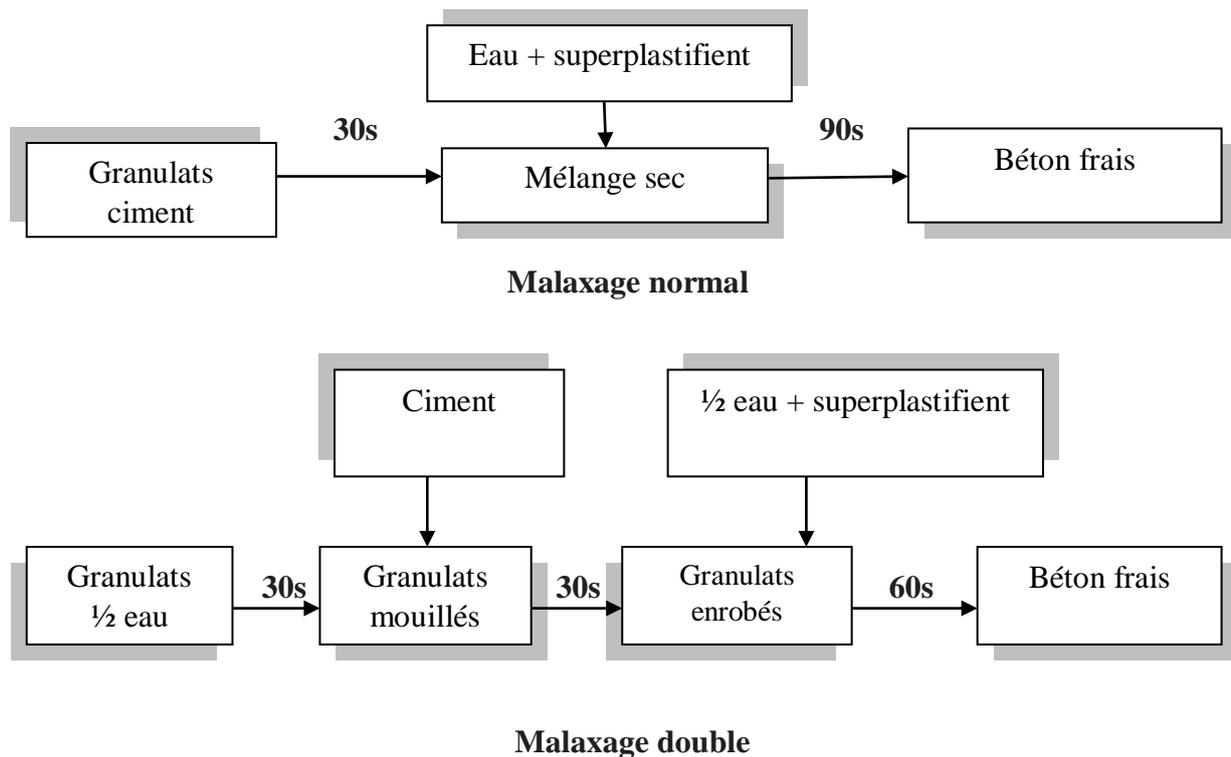


Figure 2.6 : Schéma des méthodes de malaxage

Dans cette étude, des éprouvettes cubiques (10×10×10 cm) ont été confectionnées pour l'essai de compression, l'essai d'absorption d'eau par immersion et la mesure du module d'élasticité par ultrason. Des éprouvettes prismatiques (10×10×40 cm) ont été confectionnées

pour l'essai de flexion. La confection des éprouvettes a été réalisée conformément à la norme EN 12390-2 (2001). Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et sont conservées dans l'eau à une température de 21 °C pendant 28 jours.

Tableau 2.6 : Désignation des différents mélanges de béton et proportions des différents granulats en (%).

Mélange	Granulats naturels GN	Gravier recyclé GR	Gravier recyclé traité GRT
GN	100	0	0
GND	100	0	0
GR10	90	10	0
GR20	80	20	0
GR30	70	30	0
GRC	80	0	20
GRF	80	0	20
GRL	80	0	20
GRCF	80	0	20
GRLF	80	0	20
GRCD	80	0	20
GRFD	80	0	20
GRCFD	80	0	20



Figure 2.7 : Moule cubique



Figure 2.8 : moule prismatique

2.3. Méthodes expérimentales :

La performance des différents mélanges de béton réalisés a été évaluée à travers un programme expérimental qui a permis de mesurer les propriétés suivantes :

2.3.1. Affaissement au cône d'Abrahms :

Cet essai sert à estimer l'ouvrabilité d'un béton à l'état frais. Il consiste, après coulage, à mesurer la hauteur d'affaissement d'un échantillon versé dans un moule métallique de forme tronconique. Le test du cône d'Abrahms est défini par la norme NF P18-451 (1981) qui détermine quatre niveaux de consistance suivant la hauteur d'affaissement:

- Ferme de 0 à 4 cm d'affaissement,
- Plastique de 5 à 9 cm,
- Très Plastique de 10 à 15 cm,
- Fluide à partir de 16 cm.



Figure 2.9 : Essai d'affaissement au cône d'Abrahms.

2.3.2. Résistance à la compression :

L'essai s'effectue à l'aide d'une machine à compression conformément à la norme EN 12390-3(2003). La résistance à la compression est déduite par la moyenne des résistances obtenues de l'écrasement de trois éprouvettes cubique (10×10×10cm) pour chaque mélange. Les éprouvettes sont conservées dans un bac à eau jusqu'à réalisation des essais après 28 jours.



Figure 2.10 : machine d'essai de compression.

2.3.3. Résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction est mesurée par la méthode de traction par flexion conformément à la norme EN12390-5(2001). L'essai s'effectue à l'aide d'une machine de flexion sollicitant l'écrasement d'éprouvettes prismatiques (10×10×40cm) à une flexion directe à raison de trois éprouvettes pour chaque mélange de béton. La résistance à la traction est déterminée à travers le calcul de la contrainte ultime à la zone tendue.



Figure 2.11 : Machine d'essai de flexion à 4 points.

2.3.4. Absorption d'eau :

L'absorption d'eau du béton a été déterminée par immersion. Après 28 jours de cure à l'eau, les éprouvettes cubiques de chaque mélange de béton (10×10×10cm) sont mises dans une étuve à 80 °C et leurs masses sont mesurées chaque 24 heures. L'opération d'étuvage s'arrête lorsque la variation de la masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0.1%. Ensuite, les éprouvettes sont mises dans un desiccateur ou à l'air libre pour permettre le retour en température. Par la suite, les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant 24 heures puis pesées à nouveau. La variation de la masse avant et après immersion permet la détermination du coefficient d'absorption d'eau.

2.3.5. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité est obtenu pour des éprouvettes cubiques à l'âge de 28 jours. L'émetteur et le récepteur de l'instrument de test à ultrasons ont été placés symétriquement l'un contre l'autre. Avant chaque mesure, l'équipement est calibré avec une tige de calibrage avec une vitesse connue de l'impulsion ultrasonore. Le temps de transition de l'onde ultrasonore est alors mesuré. Le module d'élasticité dynamique (E_d) peut être calculé selon l'expression suivante [42]:

$$E_d = \rho V^2 \left(\frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \right)$$

Avec :

ρ : La densité du matériau

$V = \frac{L}{t_u}$: La vitesse de propagation des ondes ultrasonores, égale à la longueur de l'échantillon divisée par le temps de transition t_u mesuré dans un essai ultrasonique.

ν : Coefficient de Poisson du matériau, égale à 0.2 pour un béton à 28 jours.

Le module d'élasticité statique peut être calculé par la loi empirique suivante [43] :

$$E_s = 0.83 E_d$$



Figure 2.12 : Essai ultrasonique (controls).

2.3.6. Traitement des granulats recyclés :

Pour traiter les granulats recyclés figure (2.13), cinq coulis cimentaires à base de ciment, de fumée de silice et de laitiers ont été préparés. Pour chaque coulis, une quantité du matériau cimentaire a été ajoutée à l'eau et ensuite mélangée à l'aide d'un malaxeur électrique sur 2 étapes pendant 20 minutes. Une petite quantité de super plastifiant a été utilisée pour faciliter l'obtention d'un coulis homogène. Le dosage en matériau cimentaire et en superplastifiant pour chaque coulis sont indiqués dans le tableau (2.7).

Tableau 2.7 : Préparation des coulis de traitement.

Coulis	Matériau (g/l)	Superplastifiant(% matériau cimentaire)
Ciment	400	7.5
Fumée de silice	200	15
Laitier HF	300	10
Ciment +Fumée de silice	200+100	10
Laitiers HF +Fumée de silice	150+100	12



Figure 2.13 : Traitement des granulats recyclés.

Les granulats recyclés sont lavés et étuvés pendant 24h. Ensuite, ils sont immergés dans le coulis cimentaire pendant 24h. Enfin, les granulats sont étuvés à nouveau pendant 24h.

CHAPITRE III : ANALYSE DES RESULTATS

3.1. Introduction :

Pour examiner la performance des bétons à base de granulats de béton recyclés traités au ciment, à la fumée de silice et aux laitiers HF, une étude paramétrique a été menée. Les effets des granulats recyclés et de leur pourcentage de substitution, du traitement au ciment, à la fumée de silice et aux laitiers HF des granulats recyclés ont été examinés à travers une série de tests d'évaluation de certaines caractéristiques physiques et mécaniques du béton.

3.2. Effet des granulats recyclés et de pourcentage de substitution :

Pour examiner l'effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton, une comparaison a été faite entre des mélanges à base de granulats naturels (GN) et de granulats recyclés (GR). Trois différents pourcentages de substitution des granulats recyclés ont été utilisés, à savoir 10%, 20% et 30%. Les résultats obtenus sont discutés dans les paragraphes suivants.

3.2.1. Résistance à la compression :

Les résultats des essais de compression des éprouvettes cubiques du béton à base de granulats naturels et de granulats recyclés pour les différents pourcentages de substitution (10%, 20% et 30%) après 28 jours de cure à l'eau sont montrés dans la figure (3.1).

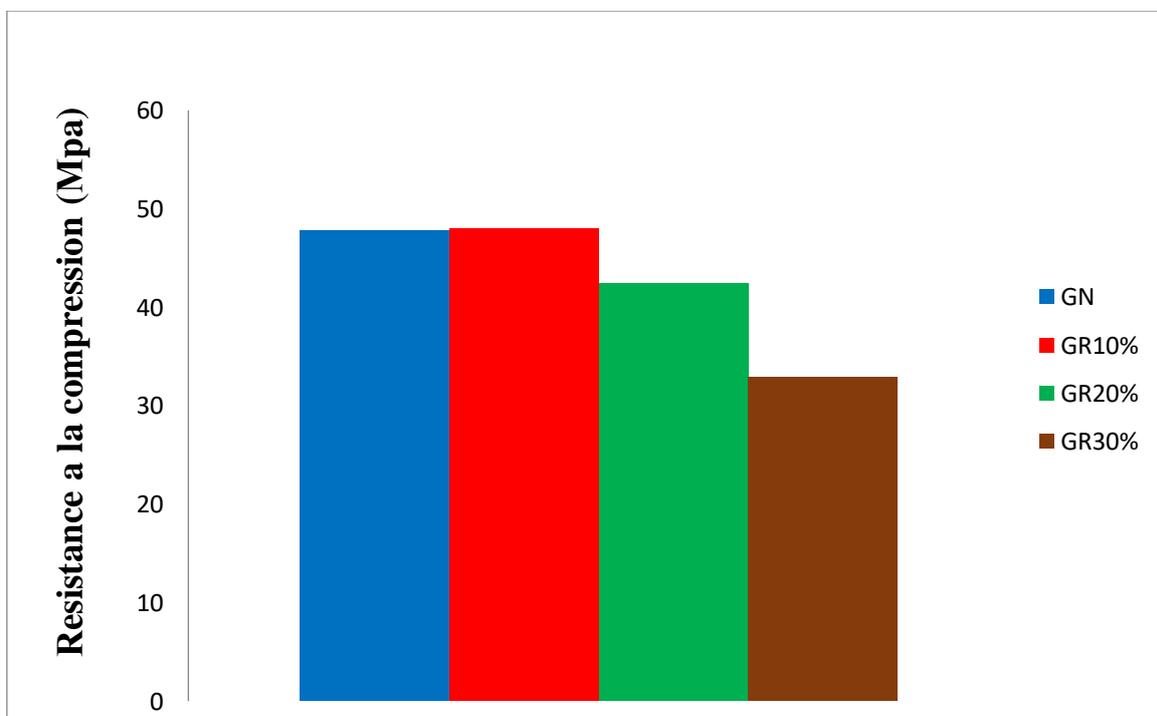


Figure 3.1: Résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés.

On peut remarquer qu'il ya eu une diminution de la résistance à la compression pour les mélanges à base de granulats recyclés par rapport à celui à base de granulats naturels, à l'exception du mélange de 10% de substitution où la résistance est quasiment identique à celle du mélange de granulats naturels. Plus le pourcentage de substitution augmente, plus cette diminution devient importante. Elle est de l'ordre de 13% pour 20% de substitution et de 33% pour 30% de substitution. Les granulats recyclés ont des propriétés physiques et mécaniques moindres par rapport aux granulats naturels. Cela a altéré la résistance à la compression du béton. Il est à mentionner que la maniabilité des bétons à base de granulats recyclés est moindre par rapport au béton à base de granulats naturels. Cela est dû au fait que l'absorption d'eau des granulats recyclés est plus importante que les granulats naturels, ce qui peut influencer sur la compacité du béton.

3.2.2. Résistance à la traction :

Les résultats des essais de flexion des éprouvettes prismatiques du béton à base de granulats naturels et de granulats recyclés pour les différents pourcentages de substitution (10%, 20% et 30%) après 28 jours de cure humide sont montrés dans la figure 3.2.

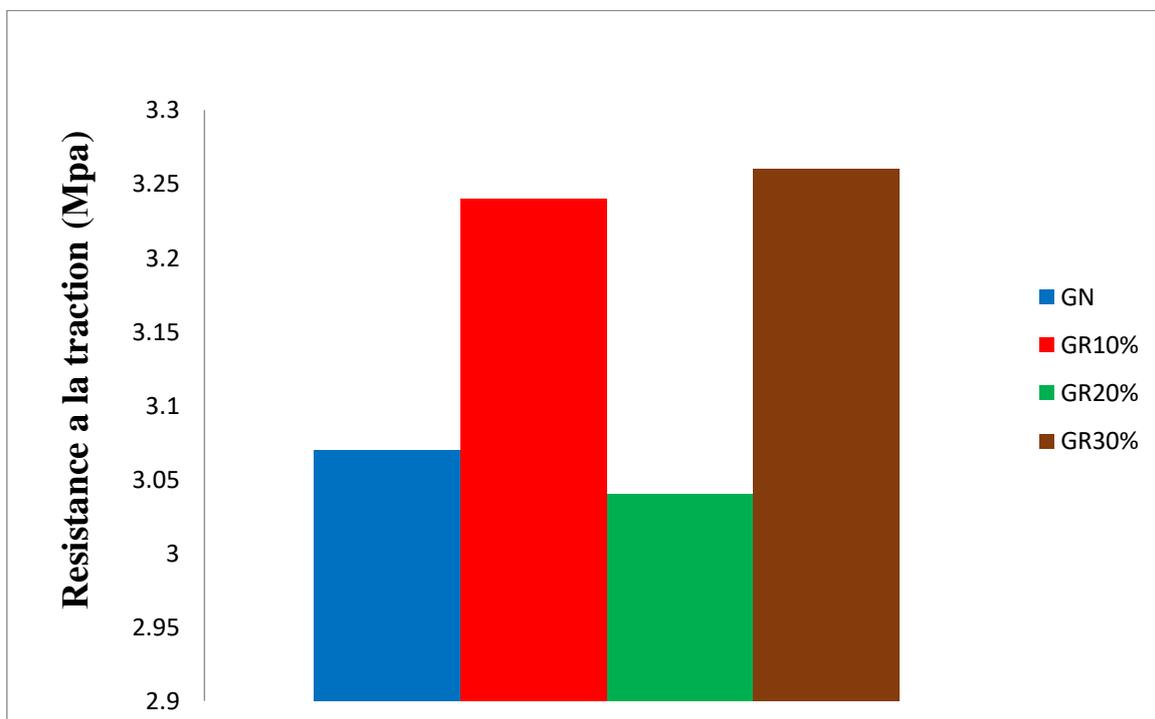


Figure 3.2: Résistance à la traction par flexion des bétons à base de granulats recyclés.

On peut voir que la résistance à la traction du béton à base de granulats recyclés pour 10% et 30% de substitution est supérieure à celle du béton de granulats naturels. Tandis que

pour 20% de substitution, la résistance à la traction est inférieure. Mais l'écart entre les différentes valeurs de résistance reste très petit et atteint un maximum de 7%. Cela signifie que la résistance à la traction est très peu influencée par les granulats recyclés pour des pourcentages de substitution inférieurs à 30%. Cela est consistant avec les résultats reportés dans la littérature [44]. La sensibilité de la résistance à la traction aux pourcentages élevés de substitution n'a pas été examinée dans ce travail.

3.2.3 Absorption d'eau :

Les résultats des essais d'absorption d'eau par immersion sur des éprouvettes cubiques de béton à base de granulats naturels et de granulats recyclés pour les différents pourcentages de substitution (10%, 20% et 30%) après 28 jours de cure à l'eau sont montrés dans la figure (3.3).

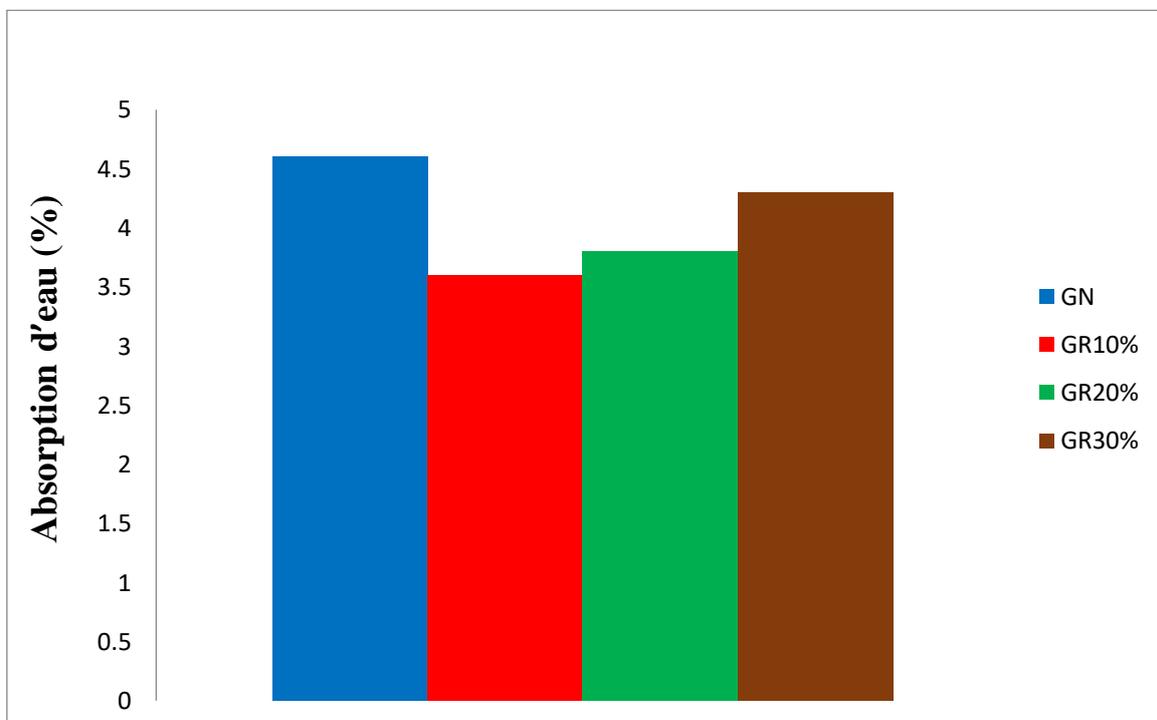


Figure 3.3: Absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés.

On remarque que l'absorption d'eau par immersion du béton de granulats naturels est supérieure à celle du béton de granulats recyclés. Ceci est contradictoire avec les résultats reportés dans la littérature, où l'absorption d'eau est supérieure pour les bétons de granulats recyclés [45]. Cela peut être dû à l'état hydrique des granulats naturels (stockés à l'extérieur) lors de la confection des éprouvettes. Si les granulats sont plus ou moins saturés, leur absorption est presque nulle. Cela laisse plus d'eau libre dans la gâchée de béton, et qui

s'évapore après dessiccation générant une porosité plus élevée de la pâte de ciment. Pour le béton de granulats recyclés, plus le pourcentage de substitution augmente plus l'absorption d'eau du béton augmente. Cela est consistant avec la littérature, quoique les valeurs trouvées sont plus petites [45]. La porosité et l'absorption d'eau des granulats recyclés sont plus élevées du fait de la présence de mortier en surface, ce qui augmente la porosité de la zone d'interface entre granulats et matrice cimentaire. Cela engendre une absorption d'eau plus élevée de la pâte de ciment.

3.2.4. Module d'élasticité :

Les résultats des mesures des modules d'élasticité dynamique et statique par ultrason sur des éprouvettes cubiques du béton à base de granulats naturels et de granulats recyclés pour les différents pourcentages de substitution (10%, 20% et 30%) après 28 jours de cure à l'eau sont montrés dans la figure (3.4).

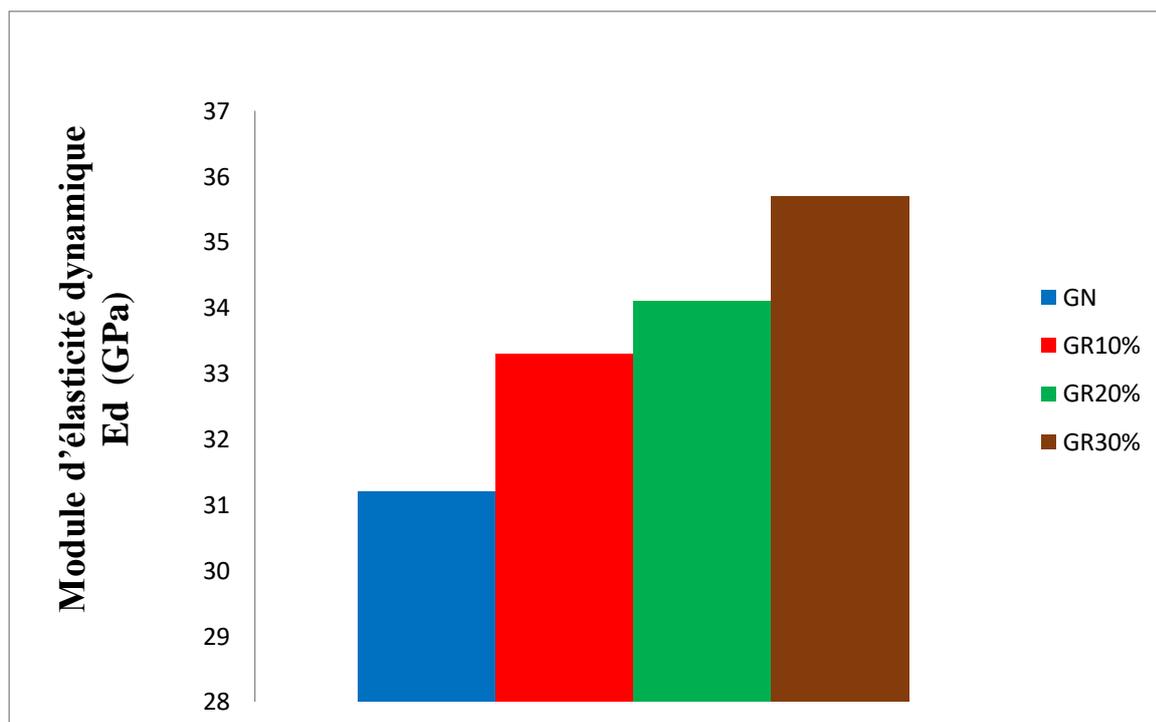


Figure 3.4 : Module d'élasticité dynamique des bétons à base de granulats recyclés.

Les figures (3.4) et (3.5) montrent que les modules d'élasticité dynamique et statique du béton de granulats naturels sont inférieurs à ceux du béton de granulats recyclés. Plus le pourcentage de substitution des granulats augmente plus le module d'élasticité augmente. Théoriquement, la présence des pores dans le béton réduit la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Par conséquent, le module d'élasticité dynamique diminue.

Mais les résultats obtenus indiquent le contraire. Cela peut être dû à la méthode de mesure qui implique une très grande marge d'erreur du fait de l'hétérogénéité du matériau en surface comme en profondeur. Le changement des points de prise résulte en des vitesses de propagation très différentes. Malgré l'utilisation commune de l'essai ultrasonique comme moyen non destructif de mesure de la résistance à la compression et le module d'élasticité, sa fiabilité reste à vérifier. La fiabilité des essais destructifs est de loin meilleure.

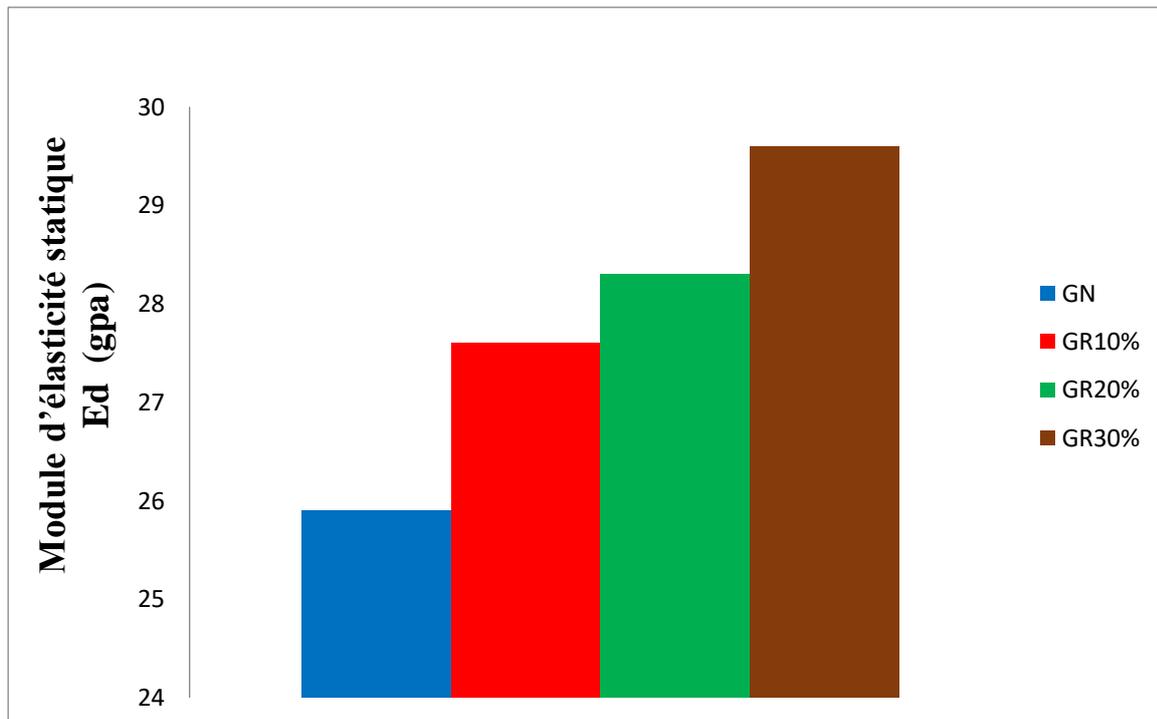


Figure 3.5 : Module d'élasticité statique des bétons à base de granulats recyclés.

3.3. Effet du traitement des granulats recyclés :

Pour examiner l'effet du traitement des granulats recyclés sur les propriétés du béton, une comparaison a été faite entre des mélanges à base de granulats naturels (GN), de granulats recyclés (GR), de granulats recyclés traités au ciment (GRC), des granulats recyclés traités à la fumée de silice (GRF), des granulats recyclés traités au ciment et à la fumée de silice (GRFC), de granulats recyclés traités au laitier HF (GRL) et de granulats recyclés traités au laitier HF et à la fumée de silice (GRLF). Un pourcentage de substitution des granulats recyclés de 20% a été adopté. Les résultats obtenus sont discutés dans les paragraphes suivants.

3.3.1. Résistance à la compression :

Les résultats des essais de compression des éprouvettes cubiques du béton à base des granulats recyclés traités après 28 jours de cure humide sont montrés dans la figure (3.6).

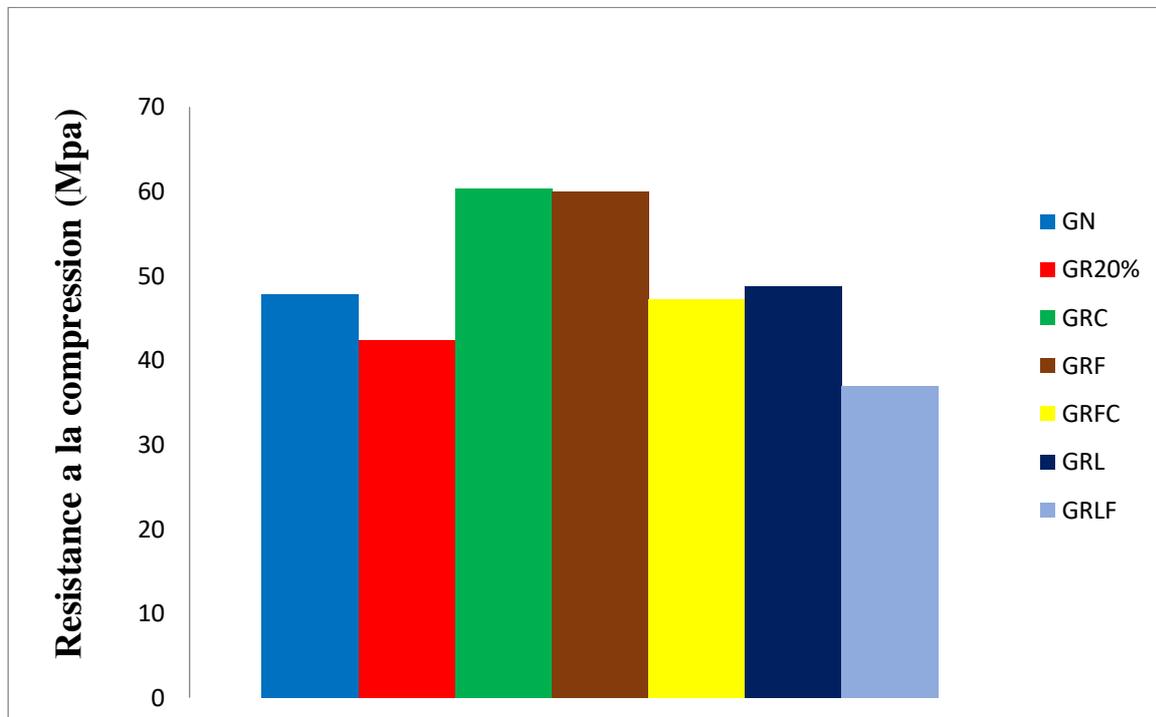


Figure 3.6 : Effet du traitement sur la résistance à la compression du béton.

On peut remarquer qu'il ya eu une augmentation- de la résistance à la compression pour les mélanges à base de granulats recyclés traités par rapport à ceux à base de granulats naturels et des granulats recyclés non traités. Ceci est à l'exception du mélange de béton de granulats traités par une solution mixte de laitiers et de fumée de silice (GRLF). Ce dernier a donné des résultats plus ou moins mauvais car il a subi une prise rapide lors de sa confection pour cause de température très élevée.

Le traitement des granulats recyclés par des coulis de ciment (GRC) et de fumée de silice (GRF) a résulté en une augmentation nette de 43% de la résistance à la compression. Les résistances obtenues dépassent de 25% celle du béton de granulats naturels (GN). Les coulis de ciment et de fumée de silice ont bien imprégné et par conséquent renforcé la couche superficielle poreuse des granulats recyclés, ce qui a nettement amélioré leur qualité et la performance du béton. La finesse du ciment a permis son absorption capillaire par les granulats recyclés et son hydratation à l'intérieur des micros pores a permis le colmatage de ces derniers. La finesse de la fumée de silice a permis son absorption capillaire par les

granulats et, au moment de la confection du béton, sa réactivité avec le ciment a permis le colmatage de micro pores.

Le traitement par un coulis mixte de ciment et de fumée de silice (GRFC) a été moins efficace par rapport au traitement séparé par ciment (GRC) ou par fumée de silice (GRF), car il a résulté en une augmentation de 12% de la résistance à la compression par rapport aux granulats recyclés non traités. Cependant, la résistance atteinte est quasiment similaire à celle du béton de granulats naturels. Cela est dû à la réactivité de la fumée de silice en présence du ciment et qui produit des particules beaucoup plus grandes, rendant plus difficile la pénétration des particules du ciment et de la fumée de silice à l'intérieur des micro pores. Ainsi, l'imprégnation des granulats recyclés est moins efficace et le béton résultant est moins résistant.

Le traitement par un coulis de laitier HF (GRL) a été moins efficace par rapport au traitement séparé par ciment (GRC) ou par fumée de silice (GRF) et légèrement meilleur que celui par solution mixte de ciment et de fumée de silice (GRFC). Le traitement par laitier HF a résulté en une augmentation de 15% de la résistance à la compression par rapport aux granulats recyclés non traités. La résistance à la compression obtenue est légèrement supérieure à celle du béton de granulats naturels (augmentation de 2%). Le broyage des laitiers a été fait au niveau du laboratoire de l'Université. Le broyeur n'a pas permis d'atteindre la finesse désirée, et le seul moyen de vérification était le tamisage dans un tamis 0.063 mm (la mesure de la surface spécifique de Blaine n'a pas pu être faite). Cela a rendu l'imprégnation des granulats recyclés moins efficace, et ainsi le béton résultant est moins performant.

3.3.2. Résistance à la traction :

Les résultats des essais de flexion des éprouvettes prismatiques du béton à base des granulats recyclés traités après 28 jours de cure à l'eau sont montrés dans la figure (3.7).

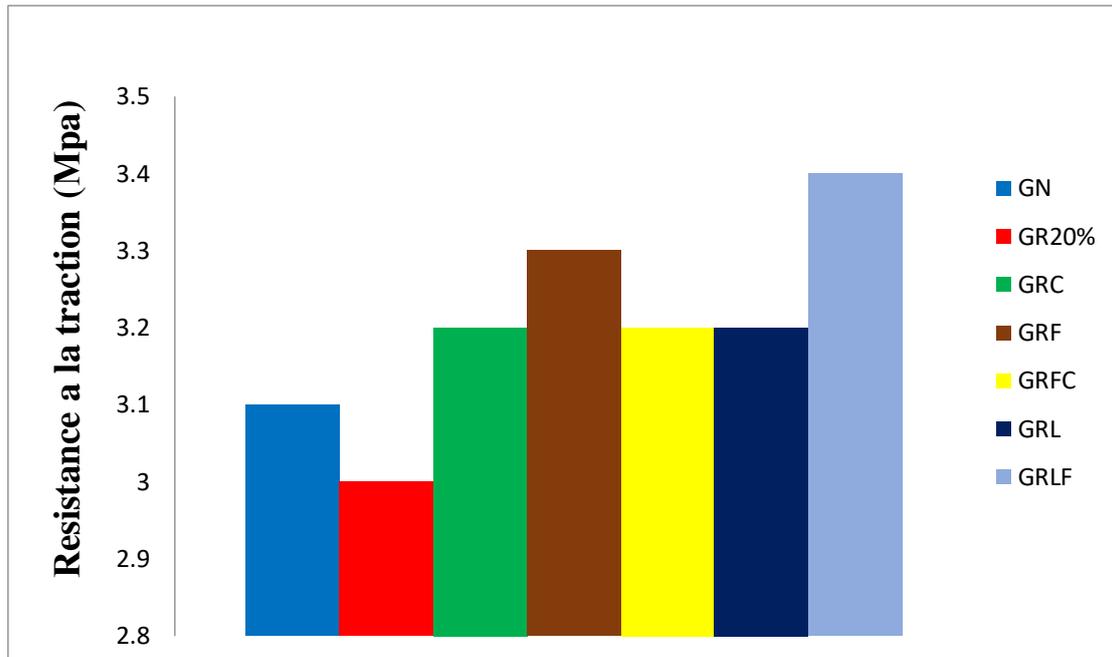


Figure 3.7 : Effet du traitement sur la résistance à la traction par flexion du béton.

On peut voir que la résistance à la traction du béton à base de granulats recyclés traités s'est améliorée par rapport aux granulats recyclés non traités et aux granulats naturels. Cependant, cette amélioration reste très faible (un maximum de 0.4 MPa pour le traitement par solution mixte laitier HF et fumée de silice) du fait de la très faible sensibilité de la résistance à la traction aux granulats recyclés traités ou non.

3.3.3 Absorption d'eau :

Les résultats des essais d'absorption d'eau par immersion sur des éprouvettes cubiques de béton à base de granulats recyclés traités après 28 jours de cure humide sont montrés dans la figure (3.8).

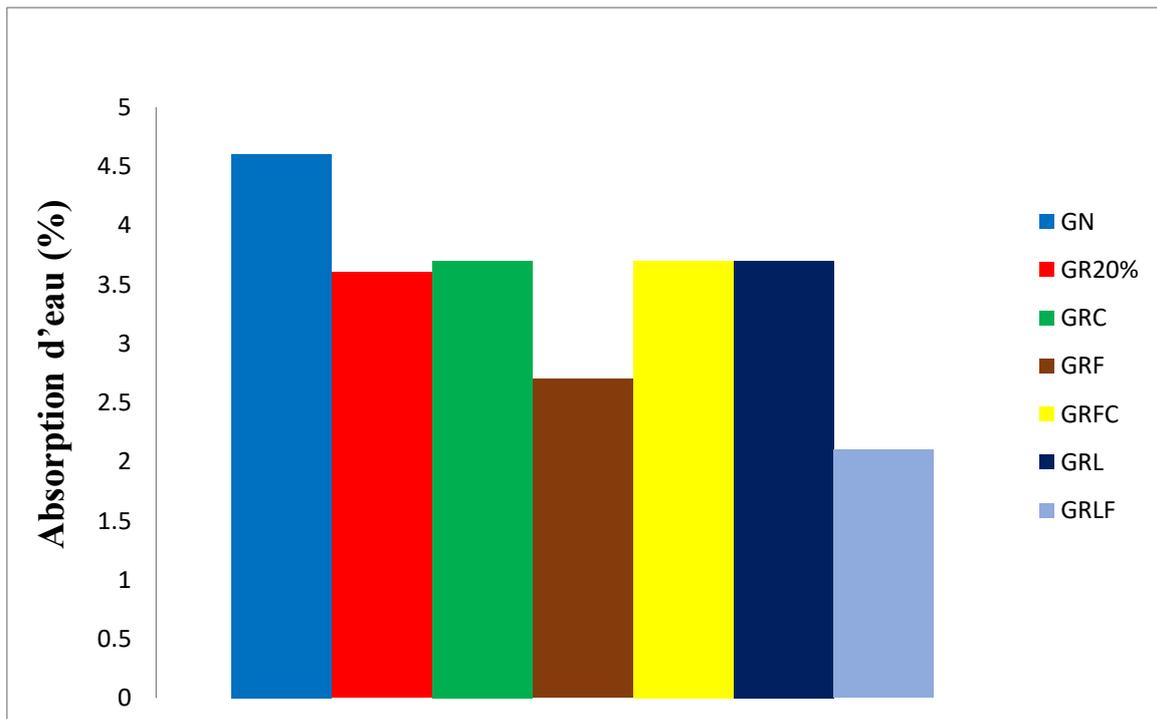


Figure 3.8 : Effet du traitement sur l'absorption d'eau du béton.

La figure (3.8) montre que l'absorption d'eau pour les traitements par ciment, par laitier HF et par solution mixte de ciment et de fumée de silice est restée inchangée. Tandis que pour les traitements par fumée de silice et solution mixte de laitier et fumée de silice, il y a eu une très légère diminution. L'absorption d'eau du béton de granulats naturels reste toujours la plus grande. Une investigation plus approfondie par d'autres méthodes de mesure de la porosité et de l'absorption d'eau est nécessaire pour confirmer ces résultats et démontrer la fiabilité de la mesure par immersion.

3.3.4. Module d'élasticité :

Les résultats des mesures des modules d'élasticité dynamique et statique par essai ultrasonique sur des éprouvettes cubiques des bétons à base de granulats recyclés traités par les différents coulis cimentaires après 28 jours de cure à l'eau sont montrés dans la figure (3.9) et (3.10).

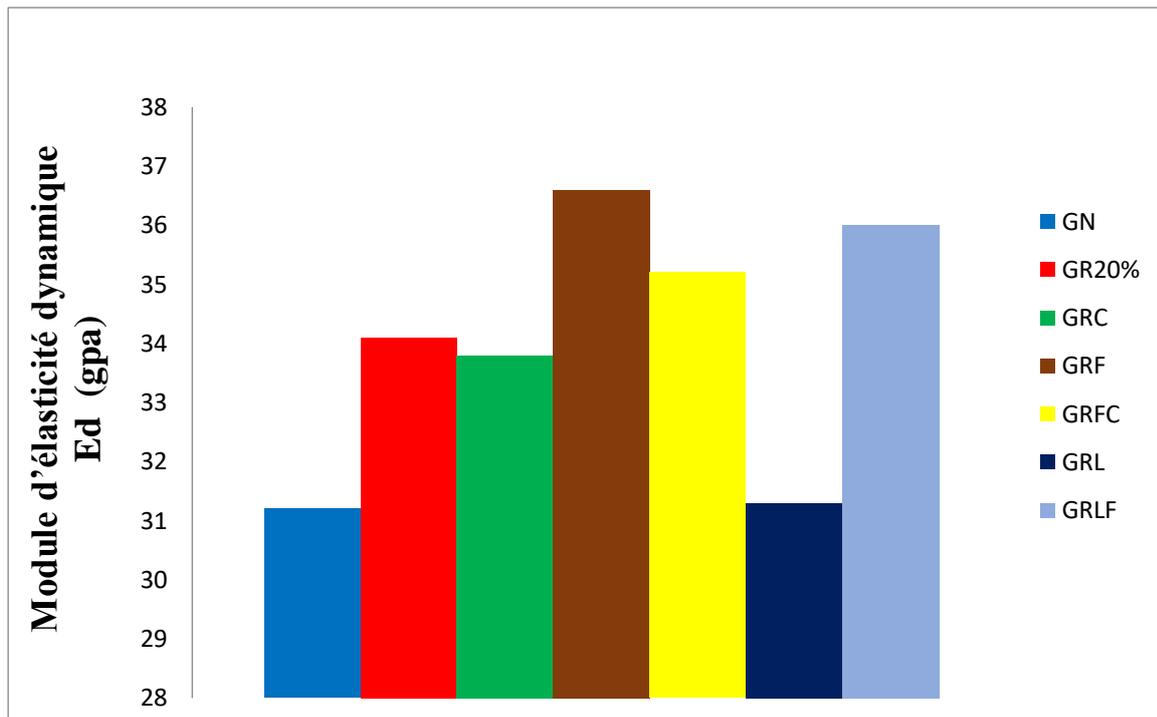


Figure 3.9 : Effet du traitement sur le module d'élasticité dynamique du béton.

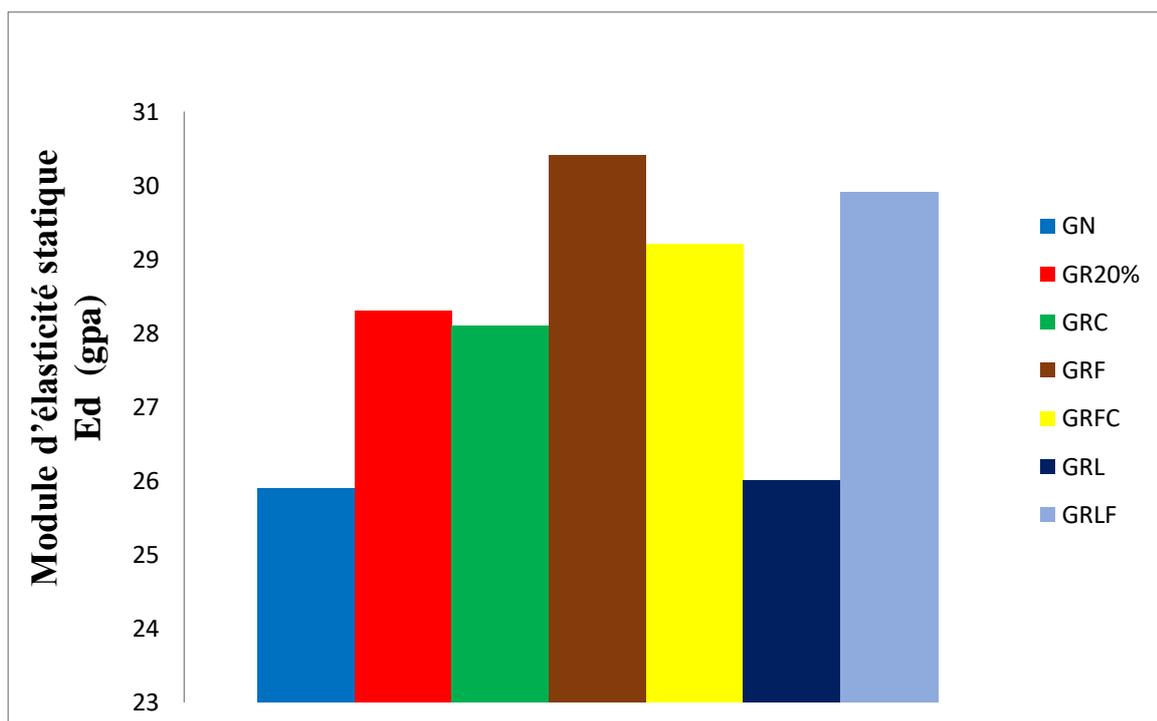


Figure 3.10 : Effet du traitement sur le module d'élasticité statique du béton.

Le traitement par les différents coulis cimentaires a résulté en une augmentation des modules d'élasticité statique et dynamique du béton par rapport au cas des granulats non traités, sauf pour le traitement par ciment où le module est resté presque invariant, et le traitement par laitier où le module d'élasticité a subi une diminution. L'augmentation

maximale a été observée pour le traitement par fumée de silice (7%), puis pour le traitement par laitier et fumée de silice (6%) et enfin le traitement par ciment et fumée de silice (3%). Pour le cas de traitement par laitier, la diminution est de l'ordre de 9%. Le traitement est supposé imprégner les granulats et diminuer leur porosité. Cela résultera en une amélioration des propriétés mécanique du béton. La détermination du module d'élasticité par essai ultrasonique reste moins fiable qu'un essai destructif.

3.4. Effet de la méthode de malaxage :

Dans certaines études précédentes [46], il a été trouvé que le changement de la méthode régulière de malaxage peut améliorer la qualité du béton contenant des granulats recyclés. Des techniques de malaxage dites double ou triple ont été proposées. Dans ce travail, l'effet de la méthode de malaxage des granulats recyclés sur les propriétés du béton a été examiné à travers une comparaison entre des mélanges préparés par un malaxage normal et des mélanges préparés par un malaxage double. Les méthodes de malaxage ont été décrites précédemment (Fig. (2.6)). Les résultats obtenus sont discutés dans les paragraphes suivants.

3.4.1. Résistance à la compression :

Les résultats des essais de compression à 28 jours des éprouvettes cubiques confectionnées par les deux méthodes de malaxage du béton sont montrés dans la figure (3.11). Quatre types de granulats ont été utilisés dans la confection des éprouvettes : granulats naturels (GN), granulats recyclés traités au ciment (GRC), granulats recyclés traités à la fumée de silice (GRF), granulats recyclés traités par un coulis mixte de fumée de silice et ciment (GRFC). Dans la nomenclature des mélanges préparés par un malaxage double, la lettre (D) est ajoutée à la fin.

On peut observer que quel que soit le type des granulats utilisé (naturels ou recyclés traités), la résistance à la compression des éprouvettes confectionnées par un malaxage normal est toujours supérieure à celle des éprouvettes confectionnées par un malaxage double. Et ce malgré l'amélioration nette de la maniabilité des mélanges préparés par un malaxage double (un affaissement de l'ordre de 8 cm, contre 4-5 cm pour un malaxage normal). Cette supériorité est plus importante pour les granulats recyclés que ceux naturels. Cela contredit ce qui a été reporté dans littérature, ou un malaxage double a mené vers des résistances meilleures qu'un malaxage normal. Cela peut être justifié par le fait que dans un malaxage double, une partie du ciment a été absorbée sous forme de coulis par les granulats, résultant

ainsi en une diminution de la quantité du ciment présente dans la matrice du béton. Cette partie absorbée est plus importante dans le cas des granulats recyclés même après traitement, ce qui a donné une plus grande différence dans les résistances pour les granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. De plus, la quantité d'eau de gâchage utilisée dans le mélange contenant des granulats naturels et préparé par un malaxage double a été réduite de crainte à avoir une consistance très plastique ou même fluide. La réduction de la quantité d'eau (réduction du rapport E/C) peut avoir influencé la résistance à la compression du mélange et engendré une plus petite diminution par rapport aux mélanges à base de granulats recyclés.

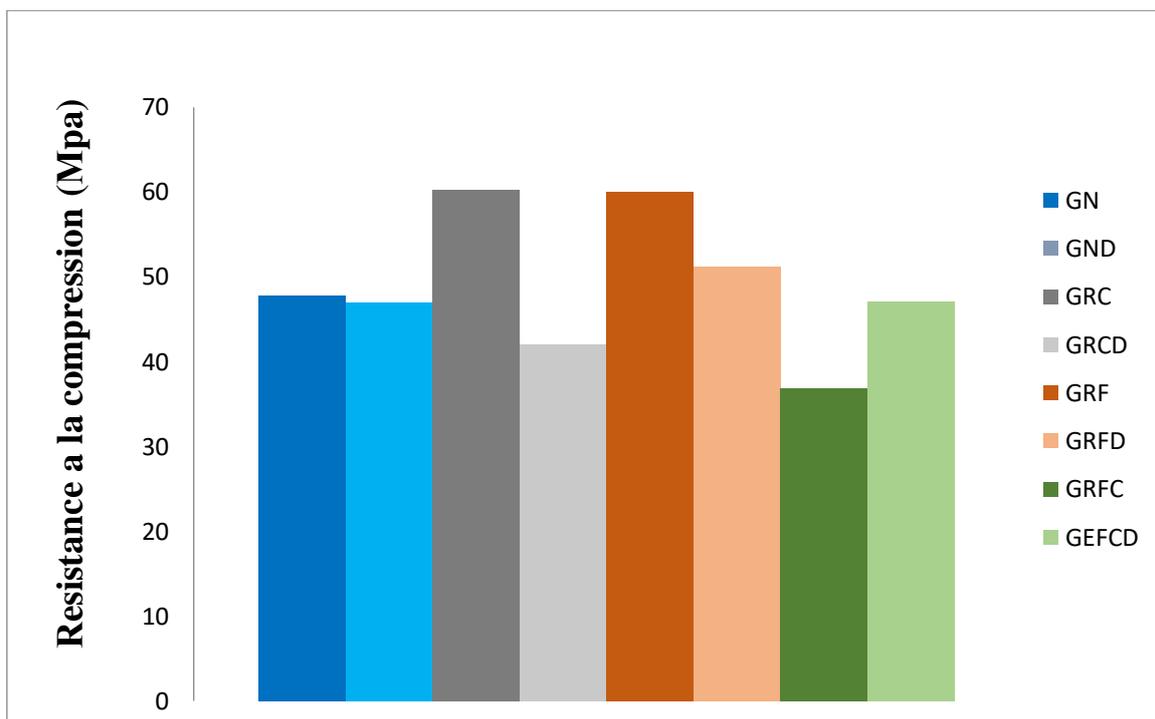


Figure 3.11 : Effet de la méthode de malaxage sur la résistance à la compression du béton.

3.4.2. Résistance à la traction :

Les résultats des essais de flexion à 28 jours des éprouvettes prismatiques confectionnées par les deux méthodes de malaxage du béton sont montrés dans la figure (3.12). Comme il a été discuté précédemment, la résistance à la traction du béton est très peu sensible à la présence des granulats recyclés et à la méthode de malaxage. Il y a eu une très faible augmentation de la résistance à la traction pour un malaxage double par rapport à un malaxage normal, sauf pour le béton de granulats traités au ciment où il y a eu une très faible diminution.

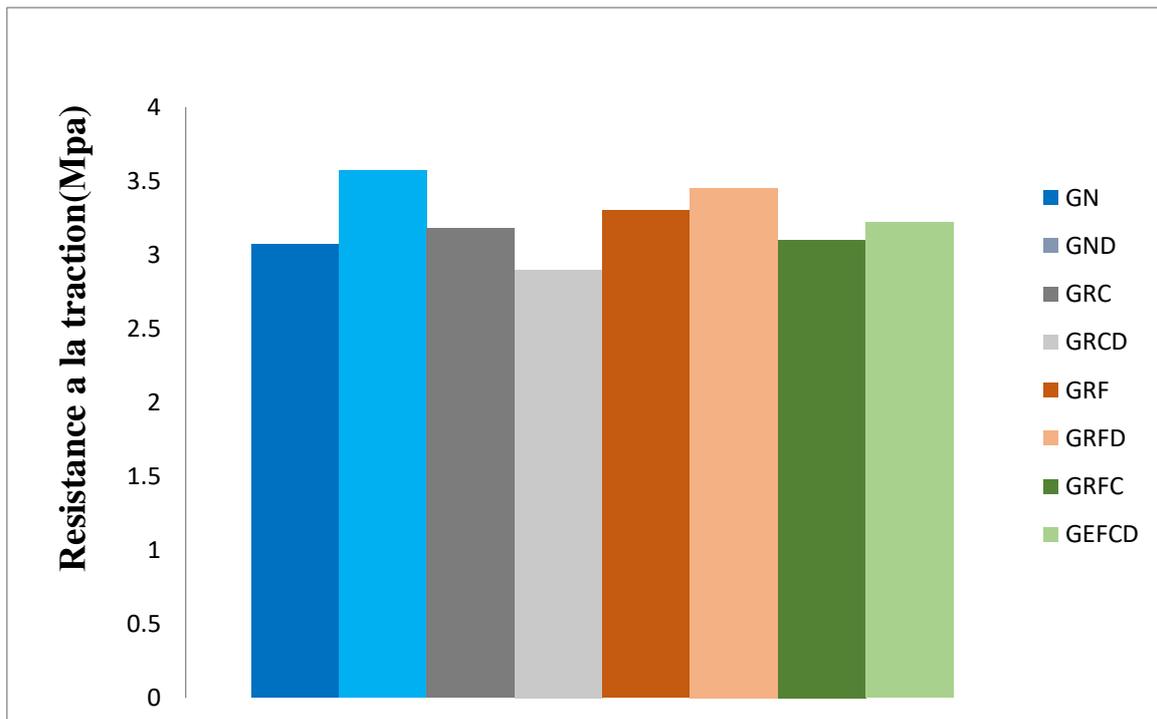


Figure 3.12 : Effet de la méthode de malaxage sur la résistance à la traction du béton.

3.4.3. Module d'élasticité :

Les résultats des mesures du module d'élasticité dynamique et statique à 28 jours des éprouvettes cubiques confectionnées par les deux méthodes de malaxage du béton sont montrés dans les figures (3.13) et (3.14).

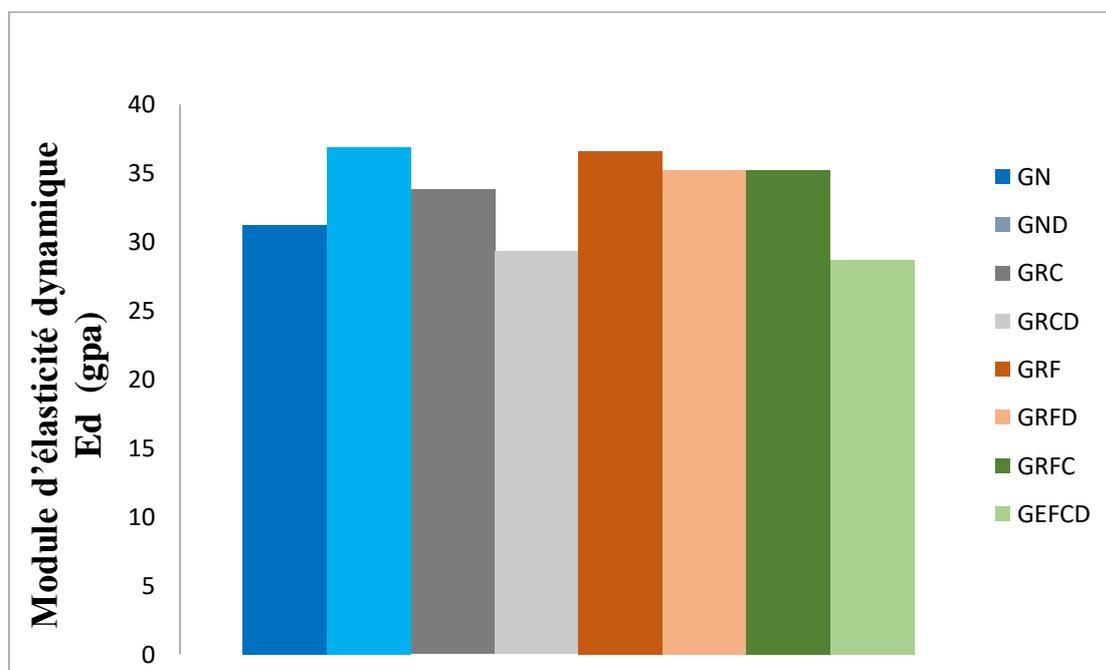


Figure 3.13: Effet de la méthode de malaxage sur le module d'élasticité dynamique du béton.

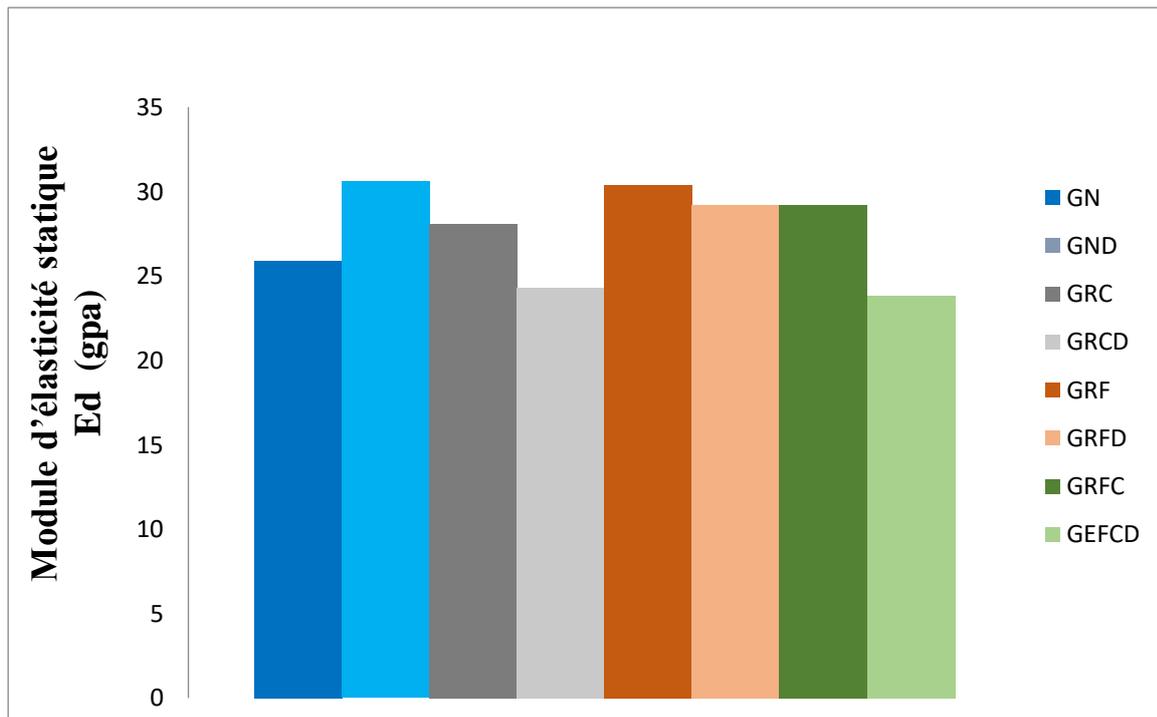


Figure 3.14: Effet de la méthode de malaxage sur le module d'élasticité statique du béton.

On peut observer que quel que soit le type des granulats recyclés, le module d'élasticité des éprouvettes confectionnées par un malaxage normal est toujours supérieur à celui des éprouvettes confectionnées par un malaxage double. Pour les granulats naturels, le malaxage double résulte en un module d'élasticité supérieur. Ceci est peut-être dû à la réduction du rapport E/C pour le cas de malaxage double. Pour les granulats recyclés, la réduction du module d'élasticité peut être justifiée de la même façon que pour la résistance à la compression.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion :

Dans ce travail, l'effet du traitement des granulats recyclés au ciment, à la fumée de silice et aux laitiers de hauts fourneaux sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons a été investigué à travers une campagne expérimentale. Une étude paramétrique a été menée touchant plusieurs facteurs affectant la performance des bétons à base de granulats recyclés. L'influence des granulats recyclés, leur pourcentage de substitution, la technique de traitement et la méthode de malaxage a été examinée à travers une série d'expériences visant à déterminer la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité et l'absorption d'eau du béton. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes:

1. Les bétons à base de granulats recyclés sont moins performant que les bétons à base de granulats naturels ;
2. En général, plus le pourcentage de substitution des granulats recyclés augmente plus la performance du béton est moindre ;
3. Le traitement au ciment, à la fumée de silice et aux laitiers de hauts fourneaux des granulats recyclés a augmenté leur densité et a réduit leur absorption d'eau, engendrant ainsi une amélioration de la performance des bétons à base de granulats recyclés traités. Une meilleure ouvrabilité et des résistances mécaniques élevées ont été obtenues, dépassant ou au moins avoisinant celles des bétons à base de granulats naturels.
4. Le malaxage normal a mené vers des propriétés mécaniques meilleures par rapport au malaxage double, à l'exception de la maniabilité.

REFERENCES

- [1] BARAKAT ABDEREZZAK «valorisation des déchets brique dans la réalisation des ouvrages en béton» Thèse de Magister, université kasdi merbeh Ouargla.
- [2] ADANI SABRINA. M .SD « Comportement des bétons à base de granulats recyclés »Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine.
- [3] GRONDIN. A ,2011 « valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton » MémoireProjet de fin d'étude, Universitaire Technologique Robert Schuman.
- [4] CHEIKH ROUHOU. M, 2007 « Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment » Mémoire de fin d'études en École nationale supérieure d'architectureLyon.
- [5] DJELAL. H ET NOUVEL. V, 2008 « Gestion des déchets de démolition et environnement »;Ecole des Métiers de l'Environnement, Rue Robert Schuman, Campus de Ker Lann,35170 BRUZ.
- [6] BELFERRAG. A, 2006 « Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes » Mémoire de fin d'études, Université KASDI Merbah deOuargla,
- [7] BENHOUNA. M, NEZERGUI. B ,2009 « caractéristiques physiques et chimiques des granulatsrecyclés et granulats naturels » SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable BuiltEnvironment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria).
- [8] Thai-Hoa V (2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse. Pp.24-25.
- [9] GENEST. G, 2010 « recyclage des débris de construction et de démolition (béton, brique etasphalte) » façons de faire à l'extérieur du Québec dossier client no 40916 rapport techniquenort-40916.

- [10] l'ISQ, 2005 « La matière concernée inclut les débris provenant de constructions résidentielles et non résidentielles, ainsi que de routes et de ponts ».
- [11] LET'S CLIMB ANOTHER MOLEHILL, 2005. The Recycling Council of Ontario (RCO).
- [12] RECYC-QUEBEC, 2008 « Bilan 2008 de la gestion des matières résiduelles au Québec ».
- [13] JOHNSON, J. (2009, March 30). EPA estimates C&D debris up 25%. Waste RecyclingNews. Accessed December 16, 2009. Available at http://wastenews.texterity.com/wastenews/20090330//Print_su#pg1.
- [14] Environmental Protection Agency. (2009a, March) Estimating 2003 Building-Related Construction and Demolition Materials Amounts. (EPA530-R-09-002). Accessed December 16, 2009. Available at: <http://www.epa.gov/waste/consERVE/rrr/imr/cdm/pubs/cd-meas.pdf>
- [15] The State of Garbage in America. Biocycle. Décembre 2008.
- [16] Gestion des déchets du B.T.P. en Basse-Normandie ,2008.
- [17] European Aggregates Association (UEPG) (2007), basé sur des estimations faites par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) et l'Ademe.
- [18] Belin, P, Habert, G, Thiery, M, Roussel, N. 2013. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. Mater. Struct
- [19] Butler, LJ, West, JS, Tighe, SL. 2014. Towards the classification of recycled concrete aggregates: influence of fundamental aggregate properties on recycled concrete performance. J. Sustain. Cem. Mater.
- [20] Yang, K-H, Chung, H-S, F.Ashour, A. 2008. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. ACI Mater.
- [21] Otsuki, N, ASCE, M, Miyazato, S, Yodsudjai, W. 2003. influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. J. Mater. Civ. Eng.
- [22] Nguyen, TD. 2013. Etude de la zone d'interphase "granulats calcaires poreux-pâte de ciment": influence des propriétés physico-mécaniques des granulats; conséquences sur les propriétés mécaniques du mortier. Thèse de doctorat.

- [23] Ryu, J. 2002. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Mag. Concr. Res.*
- [24] Zhao, Z. 2014. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers. Thèse de doctorat.
- [25] Brito, J, Alves, F. 2010. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Mater. Struct.*
- [26] Sanchez de Juan, M, Alaejos Gutierrez, P. 2004. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: *RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures.*, p 0–9.
- [27] Chakradhara Rao, M, Bhattacharyya, SK, Barai, S V. 2010. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Mater. Struct.*
- [28] Tam V. W. Y.; Tam C. M.; Le K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Ressources, Conservation and Recycling* 50 (2007) 82-101.
- [29] Domingo, a, Lázaro, C, Gayarre, FL, Serrano, M a., López-Colina, C. 2009. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Mater. Struct.*
- [30] Hasaba, S, Mitsunori, K, Kazuyuki, T, Kunio, T. 1981. Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregates. *Japan Concr. Inst.*
- [31] Hansen, TC, Boegh, E. 1985. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *ACI J.* 09-10: 648–652.
- [32] Silva, RV, de Brito, J, Dhir, RK. 2015. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 77: 327–339.
- [33] Malešev, M, Radonjanin, V, Marinković, S. 2010. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*
- [34] Mefteh, H, Kebaïli, O, Oucief, H, Berredjem, L, Arabi, N. 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *J.Clean. Prod.*
- [35] Haejin, K. 2009. Crushed returned concrete aggregate in new concrete : characterization, performance, modeling, specification and application. Thèse de doctorat.

- [36] Poon, C, Etxeberria, M. 2011. Cement & Concrete Composites Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. Cem. Concr. Compos.
- [37] Kou, C, Etxeberria, M. 2011. Cement & Concrete Composites Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. Cem. Concr. Compos.
- [38] Katz A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering 16 (2004) 597-603.
- [39] Cheng H.; Wang C. Experimental study on strengthen concrete regenerated aggregate with water glass. New Building Materials 12 (2004) 12-15.
- [40] Li J.; Xiao H.; Zhou Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 23 (2009) 1287-1291.
- [41] Tsujino M.; Nogushi T.; Tamura M.; Kanematsu M.; Maruyama I. Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment. Journal of Advanced Concrete Technology 5 (2007)13-25.
- [42] Qixian, L. and Bungeyt, J.H. Using compressionwave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. Construction and Building Materials, 10(4), 237-242 (1996).
- [43] Lydon, F.D. and Balendran, R.V. Some observations on elastic properties of plain concrete. Journal of Cement and Concrete Research, 16(3), 314-24(1986).
- [44] Miquel Joseph, Luc Boehme, Zeger Sierens, Lucie Vandewalle. Water absorption variability of recycled concrete aggregates. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(11), 592–597
- [45] Ibrahim Sharaky, Usama Issa, Mamdooh Alwetaishi, Ahmed Abdelhafiz, Amal Shamseldin, Mohammed Al-Surf, Mosleh Al-Harhi, Ashraf Balabel. Strength and Water Absorption of Sustainable Concrete Produced with Recycled Basaltic Concrete Aggregates and Powder. Sustainability 2021, 13, 6277.
- [46] Wengui Li, Jianzhuang Xiao, Zhihui Sun, Shiho Kawashima, Surendra P. Shah. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. Construction and Building Materials 35 (2012) 1045–1055.

Annexe

Les propriétés physiques de granulats recyclés et granulats naturelles :

1. Masse Volumique:

$$\rho = \frac{M1}{V}$$

- **V:** Masse de récipient.
- **M0:** Masse de récipient vide.
- **M1:** Masse du sable.

1.1. Sable carrière:

$$M0=280g \quad M1= 1637g \quad V= 1L$$

$$\rho = 1637 \frac{g}{cm^3} = 1.637 kg/m^3$$

1.2. Gravier Naturel:

8-15Ø

$$M0= 280g \quad M1= 1440g \quad V=1L$$

$$\rho = 1440 \frac{g}{cm^3} = 1.44 kg/m^3$$

15-25Ø

$$M0= 280g \quad M1= 1332g \quad V= 1L$$

$$\rho = 1332 \frac{g}{cm^3} = 1.332 kg/m^3$$

1.3. Gravier recyclée:

8-15Ø

$$M0= 280g \quad M1= 1162g \quad V=1L$$

$$\rho = 1162 \frac{g}{cm^3} = 1.162 kg/m^3$$

15-25Ø

M0= 280g M1= 1226g V=1L

$$\rho = 1226 \frac{g}{cm^3} = 1.226 \text{ kg/m}^3$$

2. Mass spécifique :

Sable : $300/119=2521 \text{ kg/m}^3$

Gravie recycle :

8-15Ø : $300/123=2440 \text{ kg/m}^3$

15-25Ø : $300/120=2500 \text{ kg/m}^3$

Gravie nature :

8-15Ø : $500/191.2=2615 \text{ kg/m}^3$

15-25Ø : $500/189.4=2640 \text{ kg/m}^3$

3. Absorption d'eau:

$$A = (M1 - M) * 100\% \frac{1}{M}$$

- M1: Masse de l'échantillon saturé.
- M: Masse de l'échantillon sec.

3.1. Gravier naturel :

8-15Ø

M1=500 g M= 494g

$$A=1.2\% < 5\%$$

15-25Ø

M1= 500g M=494g

$$A= 1.2\% < 5\%$$

Temps d'absorption d'eau : 24h

3.2. Gravier Recyclée:

8-15 ϕ

M1= 500g M=475.11g

A= 4.98% < 5 %

15-25 ϕ

M1 = 500g M = 482.65g

A= 3.47% < 5%

4. Propriété de sable (équivalent de sable):

$$Es = \frac{h1}{h2} \times 100\%$$

- M: masse de l'échantillon du sable m=120g.
- h1: hauteur de sable lavé.
- h2: hauteur de sable lavé avec l'élément fins.

Sable :

Hauteur Total H1	Hauteur du Sable visible H2	ES (%) = (h2 × 100)/H1	ES %
10.4	7.6	73.1	75
10.2	7.9	77.5	



Désignation : granulats ordinaires :

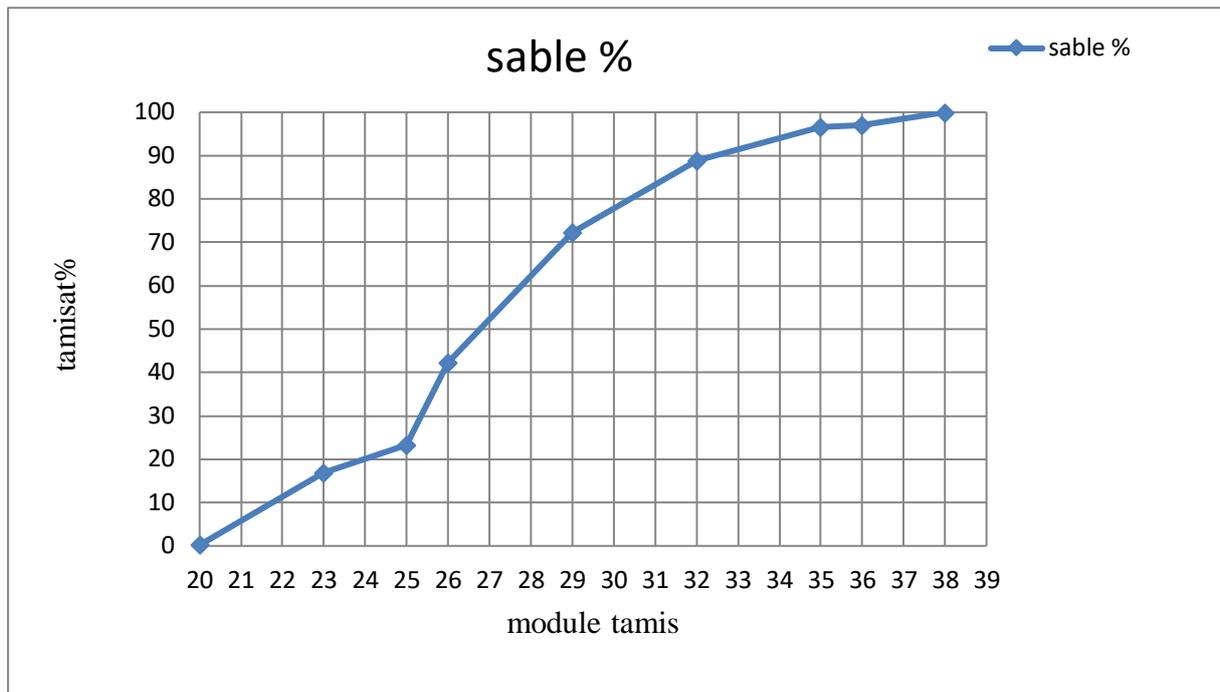
Classe 0/5 (Sable roulé):

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Diamètre Tamis (mm)	Module Tamis	Poids Du refus Partiels	Poids refus cumulé	Pourcentage Refus cumulés	Complément A 100 des refus cumulés
2000	5	38	0	0	0	100
	3.15	36	58.50	58.50	2.93	97.07
	2.5	35	11.00	69.50	3.48	96.52
	1.25	32	154.90	224.40	11.22	88.78
	0.63	29	330.19	554.59	27.73	72.27
	0.315	26	602.00	1156.59	57.83	42.17
	0.20	25	377.40	1533.99	76.70	23.30
	0.16	23	127.09	1661.08	83.10	16.90
	0.080	20	321.36	1982.44	99.12	0.88

Module de finesse :

$$Mf = \sum_{0.16}^{2.5} \frac{\text{réfus cumulés}\%}{100} = \frac{260.06}{100} = 2.60$$





Correction du module de finesse du sable :

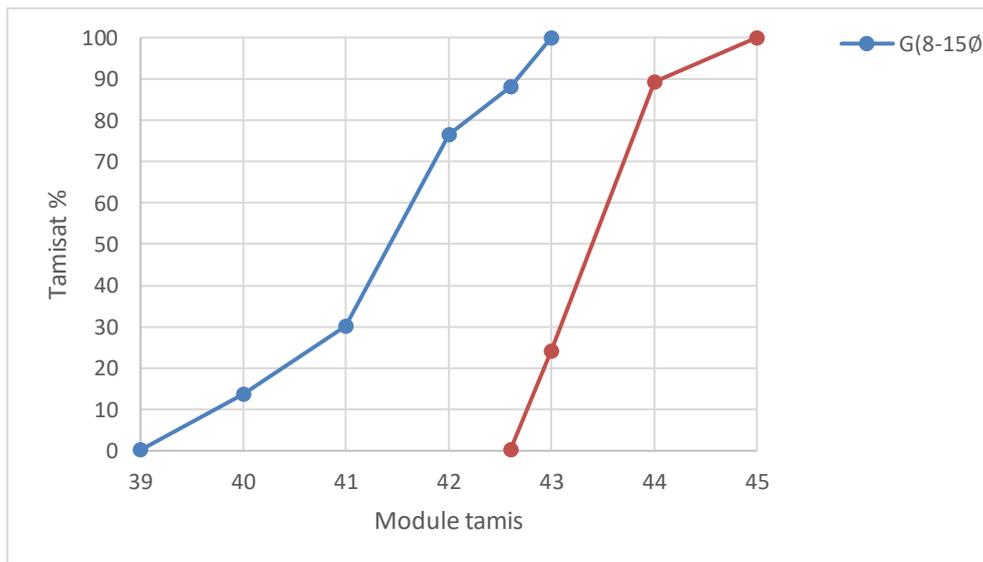
5. Granularité de gravier naturel :

8 – 15Ø

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Ouverture (mm)	Module Tamis	Poids Du refus Cumulé	Pourcentage Refus Cumulé	Complément A 100 des Refus Cumulés
5000	16	43	0	0	100
	14	42.6	595	11.90	88.10
	12.5	42	1175	23.50	76.50
	10	41	3490	69.80	30.20
	8	40	4315	86.30	13.70
	6.30	39	4990	99.8	0.20

15 – 25Ø

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Ouverture (mm)	Module Tamis	Poids Du refus Cumulé	Pourcentage Refus Cumulé	Complément A 100 des Refus Cumulés
5000	25	45	0	0	100
	20	44	540	10.80	89.20
	16	43	3790	75.80	24.20
	14	42.6	4990	99.80	0.20



Analyse granulométrique

6. Granularité de gravier recyclée :

8 – 15Ø

-Masse totale avant l'analyse : 5 Kg.

-Masse totale après l'analyse : 4995=4.99 Kg.

Tamis de maille (mm)	Rufus partial (g)	Rufus cumules masse(g)	En %	Tamisat %
15	0	0	0	100
14	650	650	13	87
12.5	1310	1960	39.20	60.80
10	2225	4125	83.70	16.30
8	385	4570	91.40	8.60

6.3	425	4995	99.90	0.10
-----	-----	------	-------	------

15 – 25Ø

-Masse totale avant l'analyse : 5 Kg.

-Masse totale après l'analyse : 4995=4.99 Kg.

Tamis de maille (mm)	Réfus partiel (g)	Réfus cumules masse(g)	En %	Tamisat %
25	140	140	2.80	97.20
20	1105	1245	24.90	75.10
16	3165	4410	88.20	11.80
14	580	4990	99.80	0.20

7. Méthode de composition du béton :

7.1. La méthode de « Dreux-Gorisse » :

Composition du béton à base de granulats naturels BGN :

Données de bases :

-Dimension maximale des granulats $D = 25\text{mm}$

-Granulats (graviers concassés et sable concassés) de trois classes :

•Sable 0/5

•Gravier 8/15

•Gravier 15/25

-Coefficient granulaire : $G=0.5$

Le rapport (E/C) = 0.445 $E = 350 \times 0.5 = 175 L$

• Caractéristiques du sable :

-Equivalent de sable $ES = 75\%$

-Module de finesse $MF = 2.60$

Evaluation de l'ouvrabilité :

-Plasticité : béton ferme

-Serrage : bonne vibration

-Affaissement A en cm : 3 à 5

-Nombre de chocs : 15 à 25

• Valeur du terme correcteur (K) :

-Vibration : normale

-Forme de granulats : concassé

-Dosage en ciment : 350 kg/m^3

→ $K = 0$

• Coefficient de compacité :

-Consistance : ferme

-Serrage : bonne vibration

- $D = 25$

-Coefficient de compacité : $\gamma = 0,837$

-Sable et gravier concassé → correction : $-0,03$

→ $\gamma = 0,807$

Tracé des courbes :

• Courbe granulométrique :

Sur un graphique granulométrique type AFNOR, on trace les courbes granulométriques de chaque classe.

On porte les divers pourcentages des tamis en ordonnée et en abscisse les dimensions des tamis.

• Courbe de référence :

-Point $n^{\circ}01 B$: $X = D = 25$

$$Y = 100\%$$

$$\text{-Point } n^{\circ}02 A : X = (45 + 38)/2 = 41.5$$

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

-Sable jaune

-Vibration normale

$$-C = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\rightarrow K = 2$$

$$K_s = 6M_f - 15 \text{ et } M_f = 2.60$$

$$\rightarrow K_s = 0.6$$

$$Y = 50 - \sqrt{25} + 2 + 0.6$$

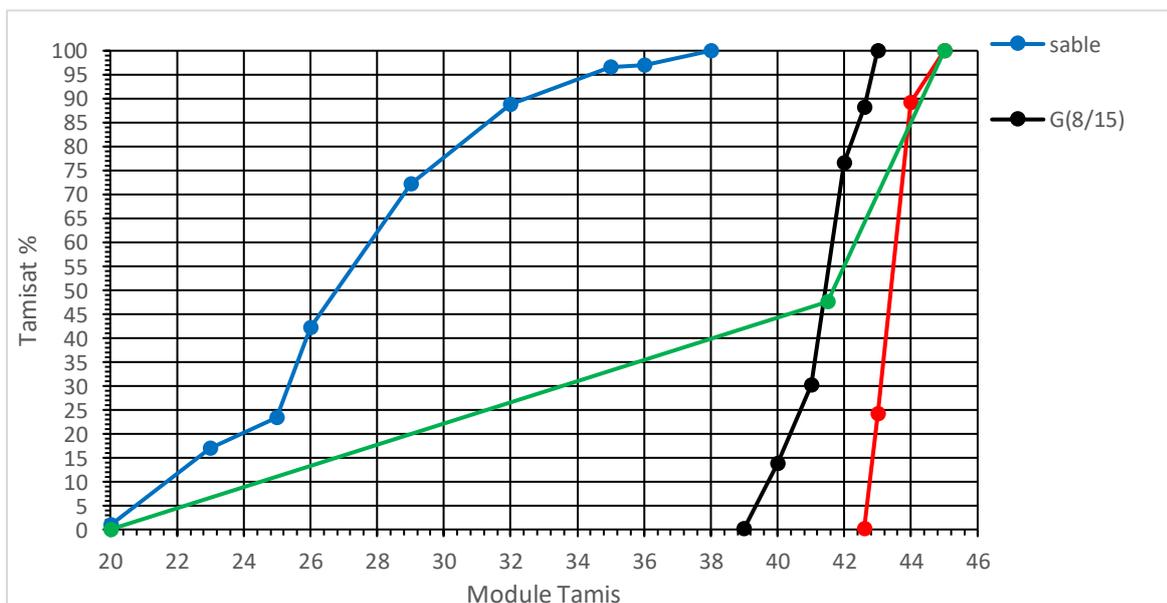
$$47.6Y =$$

$$\text{-Point } n^{\circ}03 O : X = 0,08$$

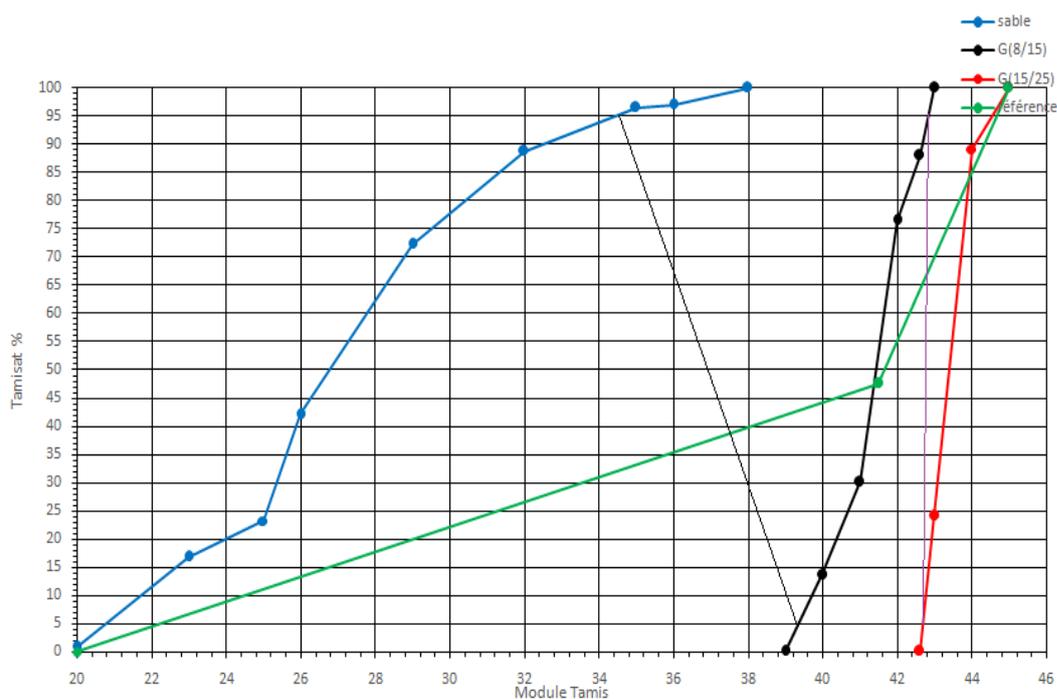
$$Y = 0.00$$

• Courbe de mélange :

Avec les pourcentages pondéraux, on compose la courbe de mélange.



Ouverture (mm)	Module Tamis	Pourcentage Sable	Pourcentage G(8/15)	Pourcentage G(15/25)
25	45			100
20	44			89.20
16	43		100	24.20
14	42.6		88.10	0.20
12.5	42		76.50	
10	41		30.20	
8	40		13.70	
6.30	39		0.20	
5	38	100		
3.15	36	97.07		
2.5	35	96.52		
1.25	32	88.78		
0.63	29	72.27		
0.315	26	42.17		
0.20	25	23.30		
0.16	23	16.90		
0.080	20	0.88		



Pourcentage du les granulats:

$$S=39\%$$

$$G1=28\%$$

$$G2=33\%$$

•Volume absolu du ciment:

$$\text{Ciment: } c=C/3.1= 112.9 \text{ l}/m^3$$

•Volume absolu des granulats:

$$\text{Sable + Gravillon + Gravier : } V = 1000\gamma - c$$

$$V = 1000 * 0.807 - 112.9 = 694.1 \text{ l}/m^3$$

•Volume absolu du sable: $v_1=V.\%$ sable

$$v_1= 694.1 *(39/100) =270.70 \text{ l}/m^3$$

•Volume absolu du gravillon (8/15) : $v_2 = V.\%$ gravier

$$v_2=694.1*(28/100)= 194.35 \text{ l}/m^3$$

•Volume absolu du gravillon (15/25) : $v_3= V. \%$ gravier

$$v_3=694.1*(33/100)=229.05 \text{ l}/m^3$$

• Dosage pondéral des granulats (pour 1 m3 de béton):

• Sable

$$S= v_1 * \gamma_s$$

$$\text{Sable}= 270.70*2.521=682.4347 \text{ kg}/m^3$$

• 8/15Ø

$$G=v_2 * \gamma_G$$

$$\text{Gravier}=194.35*2.615=508.22525 \text{ kg}/m^3$$

• 15/25Ø

$$G=v_3 * \gamma_G$$

$$\text{Gravier} = 229.05 * 2.640 = 604.692 \text{ kg/m}^3$$

Masse pour 0.023 m³

Ciment 350 *0.025= 8.750 kg

Eau 175*0.025= 3.9L

Adjuvant super plastifiant sika viscocrete tempo 12 de 1% masse
(ciment)=80.5ml

Sable 682.4347*0.025= 17.060 kg

8/15 508.22525*0.025= 12.705 kg

15/25 604.692*0.025= 15.117 kg

TABLERAU DES RESULTATS DES ESSAI :

	Résistance a la compression (mpa)	Moyen	Résistance a la traction par flexion (mpa)	Moyen	Absorption d'eau (%)
GN	48.82 48.32 48.19 45.93	47.82	3.05 3.09	3.07	4.6%
GN+	40.01 38.80 32.61 45.54	39.24	3.50 3.27 3.05	3.27	4.2%
GR10%	47.52 48.12 43.99 51.98	48	3.20 3.20 3.33	3.24	3.6%
GR20%	41.66 40.90 43.35 43.59	42.38	3.13 2.90 3.08	3.04	3.8%
GR30%	33.85 31.99 32.88 32.89	32.90	3.66 3.00 3.13	3.26	4.3%
GN30% +	49.06 49.91 48.63 44.14	47.90	3.19 3.10 3.14	3.14	3.4%
GRC	60.35 62.65 58.39 59.95	60.34	2.95 3.36 3.22	3.18	3.7%
GRF	57.52 60.31 62.77 59.55	60.04	3.18 3.27 3.46	3.30	2.7%
GRFD	56.18 45.57 52.93 50.04	51.18	3.65 3.15 3.54	3.45	4%

GRC	39.21 44.95 42.25 41.61	42.01	2.68 2.98 2.91	2.86	5.1%
GRCFD	40.19 38.66 30.57 38.22	36.91	3.24 3.04 3.02	3.1	5.4%
GRFC	48.94 50.81 36.60 52.31	47.17	3.50 3.14 3.03	3.22	3.7%
GND	44.29 45.69 48.79 49.12	46.97	3.47 3.55 3.68	3.57	3.5%
GRL	48.26 48.91 49.03	48.73	3.13 3.19 3.12	3.15	3.7%
GRLF	36.96 37.70 37.69 35.18	36.88	3.22 3.48 3.36	3.35	2.1%