

2023-08

Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton

Bibonimana, Vénuste

UB, FSI

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/378>

Téléchargé depuis le dépôt institutionnel officiel de l'Université du Burundi

République du Burundi
**Ministère de l'éducation nationale
et de la recherche scientifique**
Université du Burundi
Faculté des sciences de l'Ingénieur



**Master en Génie civil,
Aménagement et Maitrise
des projets**

Année Académique: 2021-2022

**ETUDE DE L'IMPACT DE L'INCLUSION DES GRANULATS ISSUS DES
DECHETS DE VERRE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON.**

Mémoire Présenté publiquement par :

BIBONIMANA Vénuste

**En vue de l'obtention du grade de Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des
Projets.**

Soutenu le 16/08/2023 devant le jury composé de :

Dr-Ir. HATUNGIMANA Daniel	: Président
Prof. MIKEREGO Emmanuel	: Lecteur principal
Dr-Ir. NIBASUMBA Paul	: Directeur
Dr-Ir. MASEKANYA Jean Pierre	: Membre
Dr-Ir. BIZINDAVYI Josias	: Membre

Bujumbura, Août 2023

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Identification des membres du Jury

Dr-Ir. HATUNGIMANA Daniel : Président

Prof. MIKEREGO Emmanuel : Lecteur principal

Dr-Ir. NIBASUMBA Paul : Directeur

Dr-Ir. MASEKANYA Jean Pierre : Membre

Dr-Ir. BIZINDVYI Josias : Membre

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Dédicaces

Ce mémoire est dédié aux chercheurs en génie civil et en environnement.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr-Ir. NIBASUMBA Paul, je lui remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer mes reconnaissances aux membres de jury pour l'intérêt que vous avez bien voulu porter à mon travail en acceptant de faire partie de ce jury.

Mes vifs remerciements s'adressent à tous les professeurs de l'université du Burundi particulièrement ceux qui ont contribué à ma formation de Master pour leur générosité et grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Je remercie toute ma famille particulièrement mes parents, mes frères et sœurs pour leur soutien et l'amour qu'ils ont manifesté envers moi au cours de mes études.

Enfin, je tiens à remercier également tous mes amis et proches qui ont été à mes côtés pendant ces deux dernières années d'études.

A tous ceux dont le soutien m'a été utile et nécessaire, je dis :

MERCI !!

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Résumé

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des déchets de verres. Ces derniers sont utilisés comme substituant partiel des agrégats naturels provenant de la rivière Kanyosha dans la partie du quartier Gisyo de coordonnées (-3.42232, 29.352495). L'étude expérimentale du béton a été réalisée après avoir fait la caractérisation des matériaux des granulats.

Deux variantes ont été proposées pour cette étude du béton à base des granulats de verres dont la première a été faite en substituant les graviers naturels par ceux de verres broyés et la deuxième par du sable.

Ces bétons ont été formulés par substitution volumique allant de 0%, 10%, 20%, 30% et 40% des granulats naturels. Les éprouvettes réalisées sont des cubes de 10cm x 10cm x 10cm, les unes ont été écrasées après 28 jours d'âge avec une presse hydraulique et d'autres ont été séchées dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24h puis immergées dans l'eau (essai d'absorption).

Enfin, les résultats issus de cette recherche ont bel et bien montré que la résistance à la compression, l'affaissement, la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion diminuent progressivement lorsque la quantité de granulats de verre est augmentée.

Mots clés : Déchets de verres, granulats du béton, béton.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Abstract

This work is part of the recovery of glass waste. The latter are used as a partial substitute for natural aggregates from the Kanyosha River in the part of the Gisyo district of coordinate (-3.42232, 29.352495). The experimental study of the concrete was carried out after having made the characterization of the materials of the aggregates.

Two variants have been proposed for this study of concrete based on glass aggregates, the first of which was made by replacing natural gravel with crushed glass gravel and the second with sand.

These concretes were formulated by volume substitution ranging from 0%, 10%, 20%, 30% and 40% of natural aggregates. The specimens produced are cubes of 10cm x 10cm x 10cm, some were crushed after 28 days of age with a hydraulic press and others were dried in the oven at a temperature of 105°C for 24 hours then immersed in water (absorption test).

Finally, the results from this research have indeed shown that the compressive strength, sagging, density and water absorption by immersion gradually decrease when the amount of glass aggregate is increased.

Keywords: Glass waste, concrete aggregates, concrete.

Table des matières

Identification des membres du Jury	i
Dédicaces	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
TABLE DES MATIERES	vi
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures	xi
Sigles et abréviation.....	xii
Avant-propos.....	xiii
CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE	1
I.1 Problématique.....	2
I.2 Objectifs.....	3
I.2.1 Objectif global	3
I.2.2 Objectifs spécifiques.....	3
I.3 Intérêt du sujet	3
I.4 Matériels et méthodologie de la réalisation du travail.....	4
CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTERATURE	5
II.1 Introduction	5
II.2 Généralités sur le béton.....	5
II.2.1 Classification du béton.....	6
II.2.2 Principaux avantages et inconvénients du béton.....	6
II.3 Histoire des déchets.....	7
II.4 La typologie des déchets	8
II.5 Le déchet de verre	8
II.6 Quelques propriétés de verre.....	9

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

II.6.1 Les propriétés chimiques.....	9
II.6.2 Les propriétés physiques	9
II.7 Le verre dans le milieu cimentaire	10
II.7.1 Le comportement à l'état frais et durci des bétons contenant les granulats du verre	10
II.7.2 Réaction alcali-silice du verre	11
II.8 Caractérisation des déchets solides en mairie de Bujumbura	12
II.9 Influence de l'utilisation des granulats naturels sur l'environnement.....	14
II.10 Extraction des matériaux de construction et les impacts environnementaux.....	15
II.11 Conclusion.....	15
CHAPITRE III: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BETON	16
III.1 Ciment.....	16
III.2 L'eau de gâchage	17
III.3 Granulats	18
III.3.1 Les graviers.....	18
III.3.2 Sable.....	19
III.3.3 Déchets de verres broyés	20
III.4 Les essais sur les granulats	21
III.4.1 Teneur en eau.....	21
III.4.2 Masse volumique absolue	23
III.4.3 Masse volumique apparente.....	24
III.4.4 Absorption d'eau.....	26
III.4.5 Analyse granulométrique	27
III.5 Synthèse de résultats	31
III.6 Conclusion	31
III.7 formulation du béton.....	32
III.7.1 Principe de la méthode.....	32

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

III.7.2 Données de base.....	33
III.7.3 Détermination des compositions du béton.....	40
III.7.4 Application numérique.....	41
III.7.5 Préparation des matériaux et réalisation des mélanges.....	45
CHAPITRE IV: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	47
IV.1 Essai d'affaissement	47
IV.2 Masse volumique	48
IV.3 Essai de résistance à la compression	51
IV.4 Essai d'absorption d'eau par immersion.....	53
CONCLUSION ET RECOMMANDATION	57
CONCLUSION GENERALE.....	57
RECOMMANDATIONS	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement. ...	7
Tableau II-2 : Proportion des matières premières naturelles du verre d'emballage incolore. [10]	9
Tableau III-1 : La teneur en eau des graviers roulés.....	22
Tableau III-2 : Teneur en eau du sable	22
Tableau III-3 : Teneur en eau des granulats de verres	22
Tableau III-4 : La masse volumique absolue des graviers roulés	24
Tableau III-5 : La masse volumique absolue des graviers de verres	24
Tableau III-6 : La masse volumique du sable de verres	24
Tableau III-7 : La masse volumique apparente du sable de la rivière	25
Tableau III-8: La masse volumique apparente des graviers de verre	25
Tableau III-9 :La masse volumique apparente du sable de verre	26
Tableau III-10 : Absorption d'eau des graviers roulés	26
Tableau III-11 : Absorption d'eau des graviers de verre	27
Tableau III-12 : Résultat d'essai d'analyse granulométrique du gravier	27
Tableau III-13 : Résultats d'essai d'analyse granulométrique du sable.....	28
Tableau III-14 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de verre.....	28
Tableau III-15 : Module de finesse du sable.....	30
Tableau III-16 : Synthèse des résultats de la caractérisation des matériaux.....	31
Tableau IV-1 : Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône	33
Tableau IV-2 : valeurs approximatives du coefficient granulaire G. Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).....	34
Tableau IV-3 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 20$ mm)	36
Tableau IV-4 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats	37
Tableau IV-5 : Valeurs de coefficient de compacité	38
Tableau IV-6 : Synthèse des coordonnées	42
Tableau IV-8 : Composition d'un mètre cube du béton	44
Tableau IV-9 : Formulation du béton en substituant les graviers roulés par ceux des verres broyés.....	44
Tableau IV-10 : La masse des graviers naturels et de verres par 1m^3 du béton	44

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-11 : Formulation du béton en substituant le sable de rivière par celui des verres broyés. `.....	45
Tableau IV-12 : La masse du sable naturels et de verres par 1m ³ du béton	45
Tableau IV-13 : La composition du béton par substitution des graviers pour les six éprouvettes	46
Tableau IV-14 : La composition du béton par substitution du sable pour les éprouvettes.....	46
Tableau V-1 : L'affaissement du béton contenant les graviers de verres	47
Tableau V-2 : L'affaissement du béton contenant du sables de verres.....	47
Tableau V-3 : L'évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement.NF-EN-206/CN.	48
Tableau V-4 : Les résultats de la masse(en kg) sèche des éprouvettes obtenues par substitution des graviers.	49
Tableau V-5 : La composition du béton par substitution des graviers en verre	49
Tableau V-6 : Les résultats de la masse sèche (kg) des éprouvettes obtenu par substitution du sable.	50
Tableau V-7 : La composition du béton par substitution du sable de verre	50
Tableau V-8 : La composition du béton par substitution des graviers en verre	51
Tableau V-9 : La composition du béton par substitution du sable en verre	52
Tableau V-10 : La masse sèche (en kg) du béton obtenu par substitution des graviers	53
Tableau V-11 : La masse humide (en kg) du béton obtenu par substitution des graviers	53
Tableau V-12 : Calcul de l'absorption d'eau par immersion du béton obtenu par substitution des graviers.	54
Tableau V-13 : La masse sèche (en kg) du béton obtenu par substitution du sable	54
Tableau V-14 : La masse humide (en kg) du béton obtenu par substitution du sable	54
Tableau V-15 : Calcul de l'absorption d'eau par immersion du béton obtenu par substitution des graviers.	55

Liste des figures

Figure I-1 : Organigramme du plan de travail	4
Figure II-1 : Image illustrant les déchets de verre dans la nature	9
Figure II-2 : Déchets solides sur la rivière Kanyosha.....	13
Figure II-3 : Répartition des déchets solides sur la décharge de MUBONE [16].....	14
Figure II-4 : Glissement des berges sur une des sites d'extraction des granulats sur la rivière Kanyosha.....	14
Figure III-1 : Ciment utilisé	17
Figure III-2 : Eau utilisée.....	18
Figure III-3 : Gravier de la rivière Kanyosha.....	19
Figure III-4 : Sable de la rivière Kanyosha.....	19
Figure III-5 : Image illustrant les verres broyés.....	20
Figure III-6 : Etapes de préparation des granulats des déchets de verre.....	21
Figure III-7 : Mesure de la masse volumique absolue	23
Figure III-8 : La masse volumique absolue du sable de la rivière	
Figure III-9 : Image illustrant l'absorption d'eau	26
Figure III-10 : Tamis utilisés pour l'analyse granulométrique	27
Figure III-11 : Les courbes granulométriques	29
Figure III-12 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.....	35
Figure III-13: Variation de la correction à apporter au dosage en eau si la dimension maximale des granulats est différente de 20 mm.....	36
Figure III-14 : Détermination du dosage en ciment.....	41
Figure III-15 : Tracé de la courbe représentative du dosage des granulats	43
Figure IV-1 : Comparaison d'affaissement du béton étudié.....	48
Figure IV-2 : la masse volumique du béton étudié	51
Figure IV-3 : Comparaison de la résistance du béton étudié.....	52
Figure IV-4 : Absorption d'eau du béton.....	55

Sigles et abréviation

AFNOR	: Association française de normalisation
C/E	: Le rapport ciment sur eau
d/ D	: Le rapport du diamètre minimal sur le diamètre maximal des granulats
EN	: European Norm
L A	: Low alcalin
Moy	: moyenne
NBN	: Bureau de Normalisation de la Belgique
NF	: Norme française

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Avant-propos

L'industrie de la construction consomme une quantité colossale de ressources naturelles. Le sable et le gravier sont beaucoup utilisés pour la préparation du béton servant à la construction des bâtiments, les routes, ...

Des sables et les graviers sont parmi les matériaux de construction les plus utilisés dans le secteur de construction. La quantité extraite augmente de manière exponentielle, essentiellement à la suite de la croissance économique rapide.

Au Burundi, les gisements de sable et de gravier sont principalement les lits de rivière, les plaines alluviales. Leur exploitation est anarchique et non contrôlée.

L'extraction croissante de granulats naturels impacte négativement sur l'environnement ; l'une des pistes pour réduire cet impact environnemental consiste à valoriser les déchets pouvant remplacer partiellement certains des constituants du béton.

Le présent travail de fin d'étude de Master intitulé « **ETUDE DE L'IMPACT DE L'INCLUSION DES GRANULATS ISSUS DES DECHETS DE VERRE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON** » s'inscrit dans le cadre de réduire l'utilisation des granulats naturels et permet aussi une réduction des déchets de verres dans l'environnement au Burundi.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE

Personne ne peut ignorer les transformations que subissent aujourd'hui notre environnement et les dégradations qui affectent les ressources naturelles que nous utilisons quotidiennement. La protection de l'environnement et de l'économie des ressources naturelles est devenue notre devoir.

Le béton est un matériau le plus utilisé par l'homme dans le secteur de construction. Ce matériau est à la base du développement moderne : il est utilisé pour la construction des maisons d'habitation, les hôpitaux, les écoles, les routes, les stades, ouvrages pour la production de l'énergie, les usines, etc.

En dépit de cela, l'utilisation de ce matériau impacte beaucoup sur l'environnement du fait qu'il produit beaucoup de gaz carbonique lors de la fabrication du ciment pouvant être à la base du changement climatique et l'extraction des granulats roulés qui peuvent être à la base de déstabilisation des berges des rivières induisant leur glissement.

Vue que l'utilisation du béton a des impacts négatifs sur l'environnement ; beaucoup d'études sont menées pour la limitation des extractions des matières premières constituant le béton. Cette limitation peut se faire à base des matériaux inutilisables notamment le béton lui-même provenant des ouvrages démolis et d'autres déchets produits au quotidien (emballage, bouteilles, ...)

Les déchets sont une menace lorsqu'ils sont mal gérés ; la mauvaise gestion des déchets ménagers, industriels et agricoles constitue un enjeu majeur dans les pays du tiers monde dont le Burundi fait partie. Ils constituent une des menaces pour la santé publique.

L'élimination des déchets est devenue un problème incontournable. Les quantités de déchets de verre augmentent en raison de l'industrialisation croissante et de la rapidité d'amélioration du niveau de vie. Malheureusement, la majorité des déchets de verre ne sont pas valorisés mais plutôt abandonnés dans la nature.

Pour ces raisons citées ci-haut, cette étude a été menée dans le cadre des recherches expérimentales de base afin d'analyser le comportement mécanique du béton contenant des déchets de verres broyés volontairement sous forme d'agrégats comme substituant partiel de graviers et du sable roulés dans le but d'éliminer ou au moins de réduire ces déchets en abondance au Burundi.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

I.1 Problématique

La construction est l'un des secteurs le plus impactant pour l'environnement. Face à la crise climatique, à la biodiversité et l'épuisement des ressources naturelles, ce secteur doit s'adapter à la réduction des impacts négatifs qu'ils causent sur l'environnement.

L'urbanisation exponentielle est à la base de l'augmentation d'exploitation des granulats pour la fabrication du béton.

Au Burundi, la plupart des granulats sont exploités dans des rivières et l'extraction croissante posent des problèmes sur l'équilibre des berges. Notre recherche propose l'utilisation partielle des granulats de verre pour palier à ce problème et de préserver l'environnement en limitant l'exploitation des ressources naturelles.

Alors cette recherche vise à répondre aux questions suivantes :

- Quel est le taux des granulats de verres pouvant être introduit dans le béton et qui donne de résistance à la compression projetée ?
- Comment l'affaissement, la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion varient-ils pour le béton contenant les granulats de verre ?
- Entre le sable et le gravier de verre, quel est le plus préférable d'utiliser dans le béton du point de vue résistance à la compression ?

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

I.2 Objectifs

I.2.1 Objectif global

L'objectif principal du présent travail est d'étudier l'impact du remplacement partiel du sable et du gravier par les déchets de verre sur le béton au Burundi.

I.2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques du présent projet consistent à déterminer l'affaissement, la résistance à la compression, la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion du béton contenant les verres.

I.3 Intérêt du sujet

Le présent sujet nous permet :

1. De réduire l'impact négatif environnemental

Valoriser le verre pour réduire l'épuisement des ressources naturelles.

2. De réduire les déchets de verres dans la nature

La valorisation des verres usagés réduit les déchets de manière significative.

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

I.4 Matériels et méthodologie de la réalisation du travail

Pour répondre aux objectifs cités ; la démarche méthodologique adoptée est la suivante :

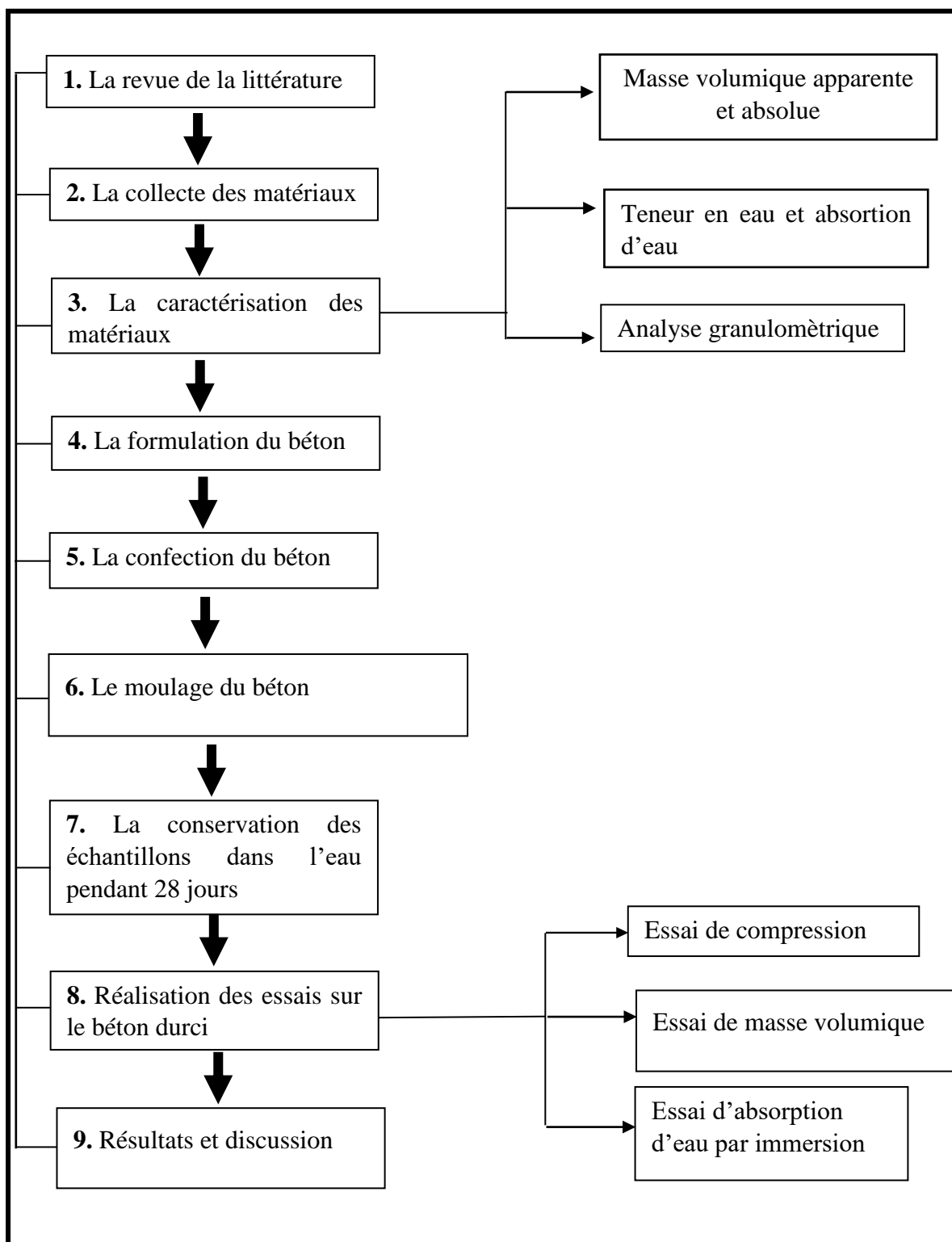


Figure I-1 : Organigramme du plan de travail

CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTERATURE

II.1 Introduction

Pour ce projet, on s'intéresse à l'étude expérimentale de l'utilisation des granulats de verre dans le béton, mais avant tout un survol bibliographique est nécessaire pour connaître l'identité de ce matériau dans différents états et les impacts négatifs dus à l'utilisation des granulats naturels sur l'environnement.

Des travaux de recherches ont déjà été menés sur l'utilisation de verres comme granulat : Utilisation des granulats de verres pour la fabrication des briques [1], utilisation des agrégats de verres dans le mortier [2] , voir (PARK et coll., 2004,) [3] qui étudiaient les propriétés mécaniques du béton contenant les agrégats de déchets de verres.

II.2 Généralités sur le béton

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient des matériaux valident les conditions économiques.

Le béton est probablement le plus ancien matériau composite. Il est fabriqué à partir d'un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir, après réaction physico- chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique lui-même fabriqué avec des minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle [4] .

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

II.2.1 Classification du béton

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général, le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- * Béton très lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$;
- * Béton lourd (béton courant) : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$;
- * Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$;
- * Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- * Béton de ciment (le ciment),
- * Béton silicate (la chaux),
- * Béton de gypse (le gypse),
- * Béton asphalte ou bitumineux (bitume).

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect [5].

II.2.2 Principaux avantages et inconvénients du béton

a. Avantages du béton

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité [5].

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

b. Inconvénients du béton

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation) ;
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage [5].

II.3 Histoire des déchets

Les déchets apparaissent dans l'activité des humaines lorsque les habitants jetaient leurs ordures par les portes et les fenêtres au moyen âge, la taille des villes augmente et les déchets des citadins sont jetés dans la rue ou dans les rivières, provoquant des problèmes de salubrité.

Les habitudes de consommation héritées de la révolution industrielle du XIXe siècle croissent de plus en plus. Le début du XX^{ème} siècle est marqué par une production diversifiée des déchets liée à la révolution technologique.

Les déchets sont des parties de matières rejetées. La croissance rapide économique dans lequel les biens sont produits à partir déchets de matières premières vendus à engendrée une augmentation importante des volumes de déchets sur le territoire urbain. Cette situation, dont les effets sont visibles par tous, engendre des nuisances importantes pour les habitants. La mise en décharge sauvage, l'utilisation inconsidérée des ressources naturelles et l'élimination des déchets dans l'environnement contribuent à la dégradation du milieu.

Jeter les déchets dans la nature, ce n'est pas sans conséquence ils y restent longtemps, parfois très longtemps. Un objet qu'on jette négligemment va polluer parfois bien longtemps après qu'on ne soit plus de ce monde [6].

Tableau II-1 : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement.

Produit	Temps de dégradation
Récipient en polystyrène	50 ans
Sac plastique	450 ans
Bouteilles en plastique	1000 ans
Bouteilles verre	5 000 ans
Filet de pêche moderne	600 ans
Carte téléphonique	1000 ans
Pile au mercure	200 ans

Source : <https://www.rtbf.be/article/la-durée-de-vie-des-déchets-la-nature-9858681>

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

La notion de déchet recouvre aujourd'hui une réalité de plus en plus présente. Toujours plus nombreux en quantité, toujours plus importante et toujours plus difficile à faire disparaître, les déchets s'imposent parmi les réflexions politiques incontournables. La nature ou l'origine des résidus permettent de distinguer les catégories de déchets dont l'élimination sera encadrée par des réglementations distinctes. C'est aussi en fonction de la nature ou de l'origine des déchets que les différentes filières d'élimination devront être empruntées avec comme priorité, de faciliter le recyclage et la valorisation [7].

II.4 La typologie des déchets

Les déchets sont classés en fonction de critères multiples. Ces critères déterminent des typologies de déchets qui sont utilisées par les différents acteurs pour conduire, surveiller et rendre compte de leurs activités. Un même acteur, par exemple une collectivité territoriale, pourra dans le cadre de ses activités suivre les indicateurs de plusieurs typologies de déchets. La classification peut être déterminée en fonction de l'origine du déchet, de ses propriétés de danger, ou encore, en fonction d'une filière de traitement dédiée. [8]

Les déchets peuvent être solides, liquides ou gazeux. Ils peuvent être dangereux ou non dangereux. Ils peuvent aussi être classés selon leur provenance ou leur composition et leurs propriétés physiques et chimiques. On peut classer les déchets selon plusieurs critères : en fonction de l'activité à l'origine du déchet, en fonction de la nature, en fonction du mode (filière) d'élimination du déchet.

II.5 Le déchet de verre

Le verre est l'un des plus anciens matériaux utilisés par l'homme. Dès l'âge de pierre, un verre naturel d'origine volcanique, l'obsidienne, servait d'instrument tranchant. Les plus anciens objets en verre produits par l'homme ont été retrouvés en Egypte et datent de 3000 ans avant Jésus-Christ. Leur fabrication reprend un procédé découvert par des marins en Mésopotamie environ 4500 ans avant Jésus-Christ. Pour installer leur feu de camp sur une plage de sable, ils ont utilisé des blocs de soude naturelle qu'ils transportaient et ont remarqué la formation de perles de « verre » dans le foyer. [9]

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »



Figure II-1 : Image illustrant les déchets de verre dans la nature

II.6 Quelques propriétés de verre

La plupart des verres sont reconnus pour leur transparence, leur résistance chimique et biologique, leur résistance à l'abrasion, leur résistance thermique, leur caractère inerte et leur recyclable virtuellement infinie [10].

II.6.1 Les propriétés chimiques

Les éléments chimiques constituant le verre lui font un matériau considéré comme inaltérable.

Tableau II-2 : Proportion des matières premières naturelles du verre d'emballage incolore. [10]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO
74%	1%	15%	10%

II.6.2 Les propriétés physiques

Les propriétés physiques du verre définissent ses caractéristiques propres en tant que matériau. Ces propriétés sont :

- Mécaniques ;
- Optiques.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

a. Les propriétés mécaniques

Le verre est un matériau fragile sur le plan mécanique. Il peut être renforcé par des fibres ou de la matière organique pour le rendre très résistant. Afin de décrire les qualités et les défauts du verre en situations de mises sous contrainte, les paramètres suivants sont analysés :

- Le module élastique : déformation du verre avant sa rupture ;
- La contrainte de rupture : force à appliquer sur le verre afin de le casser ;
- La dureté : aptitude d'un verre à rayer ou à être rayé par un autre matériau.

b. Les propriétés optiques

La connaissance et la maîtrise des propriétés optiques du verre sont nécessaires pour la fabrication de nombreux objets : lunettes, vitres, loupes, miroirs, etc. Les principales propriétés sont les suivantes :

- **La réflexion** : changement de direction des ondes lumineuses qui rencontrent un corps interposé ;
- **La transmission** : passage et déviation d'un rayon lumineux au travers d'un matériau ;
- **L'absorption** : capacité d'un matériau à absorber un faisceau lumineux et à diminuer son intensité (exemple des lunettes de soleil qui absorbent une partie de la lumière) ;
- **La diffusion** : dissémination des rayons lumineux produits par transmission au travers d'un milieu (exemple de la diffusion d'un rayon lumineux dans l'eau).

II.7 Le verre dans le milieu cimentaire

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique [11].

II.7.1 Le comportement à l'état frais et durci des bétons contenant les granulats du verre

a. Etat frais

Selon PARK et coll., 2004, [3], l'incorporation des granulats de verre dans le béton, tend aussi à augmenter la teneur en air et à diminuer l'affaissement. En effet, selon le même auteur la teneur en air a tendance à augmenter de 1 à 2 % selon un taux de remplacement en granulats de verre de 30 à 70 %, ce qui est peut-être dû à la forme irrégulière des granulats de verre qui

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

enferme et maintienne plus d'air. Cette quantité augmente avec l'accroissement du taux de remplacement.

Par contre, l'affaissement décroît de 3 à 6 cm avec l'augmentation du taux de remplacement en granulats de 30 à 70 %.

b. Etat durci

Selon PARK et coll., 2004 [3], la résistance à la traction obtenue sur des bétons ordinaires de rapport E/L = 0,50 avec un dosage de 380 kg/m³ de ciment, contenant les granulats de verre varie en fonction du taux de remplacement.

Le mélange avec 30 % de granulats de verre présente une résistance à la traction de 96,6 % fois celle de témoin à 28 jours, alors que les mélanges contenant 50 et 70 % développent des résistances de 90,8 % et 85 %. Une tendance semblable est aussi observée dans la résistance à la compression montrée par les travaux de SHAYANE et coll., 2004 [12]. Cela est dû probablement à la diminution de l'adhérence entre les granulats de verre et la pâte de ciment.

La diminution du facteur de compactage en fonction du taux de remplacement est causée à la forme des granulats de verre.

II.7.2 Réaction alcali-silice du verre

Certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons. La réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres, la bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs [11].

a. Caractérisation de la réactivité potentielle des granulats

Les granulats susceptibles de réagir se retrouvent parmi les trois classes suivantes :

- **Les granulats siliceux** : tous les granulats formés de roches sédimentaires de diverses origines et contenant souvent plus de 80 % de silice en masse. Les roches couramment utilisées comme granulats à béton sont : les grès, les quartzites, les silex ;
- **Les granulats silicatés** : ils ont essentiellement pour origine les roches métamorphiques et les roches magmatiques (plutoniques et volcaniques). Les granulats réactifs se rencontrent plus

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

particulièrement dans les roches acides et dans quelques laves basiques anormalement riches en inclusions vitreuses ;

- **Les granulats carbonatés** : les roches carbonatées ne fournissent de granulats réactifs que lorsqu'elles contiennent une quantité minimale de silice réactive [13].

b. Mécanisme de la réaction alcali-silice

Par 'réaction alcali-silice', on entend en réalité un ensemble de réactions entre :

- les alcalis présents dans le béton (ciment, adjuvants, eau de gâchage, ...) ou amenés de l'extérieur (eau de mer, sel de déverglaçage, ...)
- la silice réactive, c'est-à-dire sensible aux alcalis, que l'on peut retrouver dans certains granulats.

Ces réactions provoquent la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcali-silice capable d'absorber l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes à l'origine d'une fissuration du béton [13].

➤ **Les mesures préventives**

Rappelons-nous que conditions suivantes doivent être réunies pour qu'une réaction alcali-silice se produise :

- la présence de granulats potentiellement réactifs
- une humidification permanente ou régulière de la structure
- une teneur suffisamment élevée du béton en alcalis.

Alors pour se prévenir cette pathologie les mesures suivantes sont mises en considération :

- ❖ Les normes préventives en vigueur, qui l'objet d'une axe informative sont déterminés en fonction du niveau de prévention et de la catégorie d'exposition (NBN B15-001) [14] ;
- ❖ La limitation de la teneur en alcalin du béton : La limitation de la teneur en alcalins du béton constitue une solution à la fois rapide et positive, en particulier dans le cas des graviers réactifs. Il est conseillé d'utiliser le ciment LA conforme à la norme NBN B12-12109 [15].

II.8 Caractérisation des déchets solides en mairie de Bujumbura

La population des milieux urbains génère toutes sortes de déchets issus de diverses activités. Malheureusement, les déchets solides sont souvent abandonnés à un coin de rue, dans les

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

canaux de drainage des eaux de pluies et sur la voie publique constituant ainsi des décharges « sauvages ».

Le risque de prolifération des maladies liées au déficit d'hygiène s'accroît, la qualité de vie se détériore suite aux nuisances visuelles et olfactives. Bujumbura croule sous le poids des déchets ménagers, commerciaux et industriels spécialement dans les quartiers de bas standing.

Le nœud du problème réside au niveau de l'aménagement inapproprié du territoire urbain en matière d'évacuation rapide et régulière des déchets. Les intervenants dans l'évacuation des déchets ne sont pas suffisamment outillés ni organisés convenablement pour assurer la qualité des services attendus [16].



Figure II-2 : Déchets solides sur la rivière Kanyosha

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

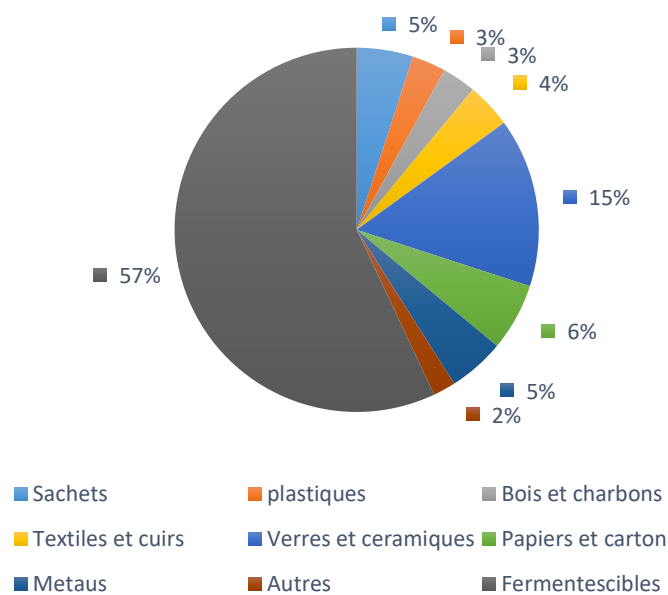


Figure II-3 : Répartition des déchets solides sur la décharge de MUBONE [16]

II.9 Influence de l'utilisation des granulats naturels sur l'environnement

Le progrès technologique n'est pas une fin en soi quand la qualité de vie du citoyen est menacée. Il est certain que les effets des activités humaines sur les principales composantes du milieu naturel conduisent fréquemment à la rupture d'équilibre. La multitude des actions nocives de la société humaine sur les divers écosystèmes a atteint à notre siècle une ampleur inquiétante qui nous dicte une nécessité impérieuse de repenser l'interaction homme - nature.



Figure II-4 : Glissement des berges sur une des sites d'extraction des granulats sur la rivière Kanyosha.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

II.10 Extraction des matériaux de construction et les impacts environnementaux.

Le choix d'un matériau est généralement fondé sur des critères extra-environnementaux (fonctionnalité, performance technique, esthétique, coût, ...) mais prend rarement en compte les impacts sur l'environnement en particulier et sur la société en général. Ainsi, la phase d'extraction des matériaux est pleine de conséquences.

Les impacts relatifs à l'extraction des matériaux de construction sont notamment :

- Epuisement des ressources naturelles
- Perturbation de l'équilibre écologique
- Contribution au déclenchement et/ou à l'accélération des risques naturels, des glissements de terrain (mouvement de masse en général) :
 - Déchaussement de la base des talus et déclenchement des mouvements gravitaires (éboulements, érosion qui, par son caractère régressif, peut conduire au ravinement et /ou évoluer vers les glissements de terrain
 - Impacts sur le risque d'inondation soit directement par modification de la configuration du réseau de drainage ou soit par la rupture des barrages naturels occasionnés par la déstabilisation des rives après excavation.

II.11 Conclusion

Le traitement des déchets apporte de nombreux enjeux environnementaux. Il est nécessaire de valoriser les déchets à leurs avantages. Il ne faut donc pas les détruire sans valorisation mais les utiliser pour fabriquer et créer en les recyclant. Cette démarche permet alors de multiples bénéfices. Le traitement des déchets et aussi ses transformations sont donc un véritable enjeu écologique.

CHAPITRE III: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BETON

Le présent chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus des matériaux constitutifs du béton lors de cette étude.

III.1 Ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par hydratation de faire prise et durcir progressivement (plus ou moins rapidement d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec liants aériens (à base de chaux grasse et maigre) qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air. [17]

Il existe cinq types de ciments :

- Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- Le CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.
- Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants.

Le ciment utilisé dans notre présent travail est le ciment (DANGOTE) portland artificiel de classe de résistance 42.5 ayant une résistance élevée au jeune âge (Ciment CPA- CEM I 42.5R).

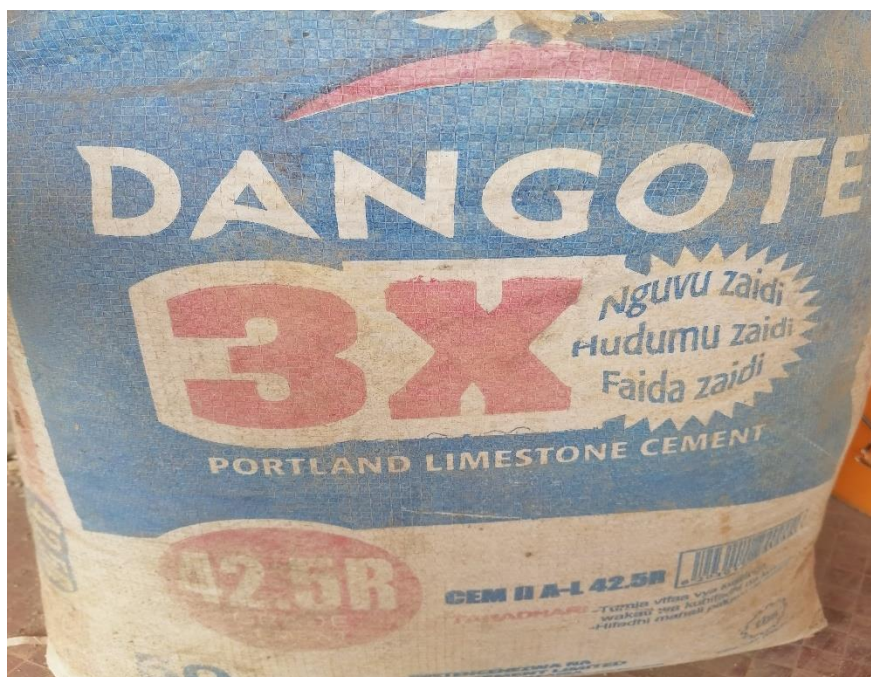


Figure III-1 : Ciment utilisé

III.2 L'eau de gâchage

Pour parvenir à la confection du béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles.

La limitation du pourcentage de matières en suspension à 2 ou 5 g/l et la teneur en sels dissous à 15 ou 30 g/l suivant la nature du béton, précontraint ou non armé, spécifications qui ne différencient pas les éléments nocifs même en très faible pourcentage de ceux qui en pourcentage éventuellement plus important ne le sont pas [18].

Dans la catégorie des eaux susceptibles de convenir à la confection de béton, on trouve :

- Les eaux potables (qui bien évidemment conviennent) ;
- Les eaux de recyclage provenant du rinçage des bétonnières ou des camions malaxeurs à condition de vérifier leur aptitude dans le cas de changement de ciment ou d'adjuvant d'une gâchée à l'autre sont utilisables lorsque ces eaux comportent des éléments fins provenant des matériaux entrant dans la confection des bétons (ciments. Fines des sables...). Il est possible de les utiliser après passage dans des bassins de décantation,
- Les eaux de pluie et de ruissellement, les eaux pompées, tant qu'elles restent confirmées aux prescriptions de la norme conviennent également.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

À côté, les catégories d'eaux ne devant pas être utilisées comprennent :

- Les eaux usées ;
- Les eaux vannes ou contenant des déterge ;
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organiques ou chimiques.

Ces différentes eaux doivent obligatoirement subir des analyses concluant à leur non -nocivité avant tout emploi. Bétons non armés ne présente pas de risque quant à la pérennité de l'ouvrage. L'eau utilisée pour le gâchage est celle du robinet.



Figure III-2 : Eau utilisée

III.3 Granulats

Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de Sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton.

Un granulats est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D [19].

- Les fines O/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables O/D avec $D \leq 6,3$ mm
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm

III.3.1 Les graviers

Les graviers ont des origines semblables à celles des sables, ils proviennent de la désagrégation des roches. La dimension maximale des agrégats est conditionnée, d'une part, par la distance minimale à réaliser et, d'autre part, de la distance minimale entre les différentes armatures de l'ouvrage [20].

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Les graviers utilisés sont de la rivière Kanyosha se trouvant dans la commune Muha en Mairie de Bujumbura.



Figure III-3 : Graviers de la rivière Kanyosha

III.3.2 Sable

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre $5\mu\text{m}$ et $80\mu\text{m}$; il s'agit d'une définition globale dont les bornes varient d'une classification à une autre, c'est un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à $80\mu\text{m}$ n'excède pas 30%. Dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5mm les fines [20].

Le sable utilisé est le sable provenant de la rivière Kanyosha dans la commune urbaine de Muha de la Mairie de Bujumbura.



Figure III-4 : Sable de la rivière Kanyosha

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

III.3.3 Déchets de verres broyés

Les granulats de verre utilisés ont été obtenus en broyant délibérément les calcins. Ces derniers étaient des verres à vitres majoritairement blancs.



Figure III-5 : Image illustrant les verres broyés

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

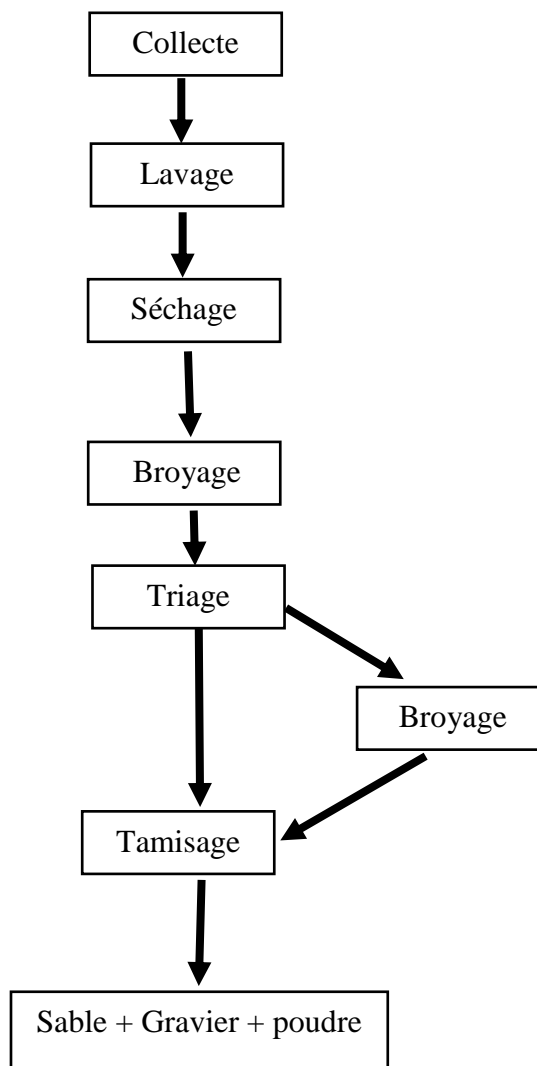


Figure III-6 :Etapas de préparation des granulats des déchets de verre

III.4 Les essais sur les granulats

III.4.1 Teneur en eau

a. Définition

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. Elle est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (1)$$

Avec : - W : la teneur en eau

- M_h : la masse humide

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

- M_s : la masse sèche

b. But de l'essai

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité variable selon les conditions météorologiques et la nature du matériau. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats.

➤ **Graviers de la rivière**

La détermination de la teneur en eau des graviers a été réalisée conformément à la norme [21].

Tableau III-1 : La teneur en eau des graviers roulés.

Echantillon	M_h (kg)	M_s (kg)	W(%)	W_{moy} (%)
1	5	4,95	1,01	1,03
2	5	4,96	0,81	
3	4	3,95	1,27	

➤ **Sable**

Elle se détermine suivant la norme [22]

Tableau III-2 : Teneur en eau du sable

Echantillon	M_h (kg)	M_s (kg)	W(%)	W_{moy} (%)
1	5	4,96	0,81	0,90
2	4,6	4,56	0,88	
3	4	3,96	1,01	

➤ **Granulats de verre**

Tableau III-3 : Teneur en eau des granulats de verres

Echantillon	M_h (kg)	M_s (kg)	W(%)	W_{moy} (%)
1	5	5	0,00	0,00
2	5	5	0,00	
3	5	5	0,00	

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

III.4.2 Masse volumique absolue

a. Définition

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

Avec : - ρ_{abs} : la masse volumique absolue

- V_1 : le volume initial

- V_2 : le volume final

- M : la masse

b. But de l'essai

Sa détermination est nécessaire pour le dosage pondéral. Sa masse volumique varie en moyenne de 2450 à 2650 kg/m³ pour la plupart des granulats naturels .Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 [22] pour les graviers et NF P 18-555 [21] pour le sable.



Figure III-7 : Mesure de la masse volumique absolue

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

➤ **Graviers de la rivière**

Tableau III-4 : La masse volumique absolue des graviers roulés

Echantillon	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	M (g)	ρ _{abs} (g/ml)	ρ _{abs moy} (kg/m ³)
1	300	450	400	2,6667	2690,8
2	300	449	400	2,6846	
3	300	447	400	2,7211	

➤ **Sable de la rivière**

Tableau III-5 : La masse volumique du sable de la rivière

Echantillon	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	M (g)	ρ _{abs} (g/ml)	ρ _{abs moy} (kg/m ³)
1	300	459	400	2,5157	2526,4
2	300	457	400	2,5478	
3	300	459	400	2,5157	

➤ **Graviers de verre**

Tableau III-6 : La masse volumique absolue des graviers de verre

Echantillon	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	M (g)	ρ _{abs} (g/cm ³)	ρ _{abs moy} (kg/m ³)
1	300	428	300	2,3438	2349,9
2	300	428	300	2,3438	
3	300	427	300	2,3622	

➤ **Sable de verre**

Tableau III-7 : La masse volumique du sable de verres

Echantillon	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	M (g)	ρ _{abs} (g/cm ³)	ρ _{abs moy} (kg/m ³)
1	300	431	300	2,2901	2284,3
2	300	432	300	2,2727	
3	300	431	300	2,2901	

III.4.3 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube pris en tas contenant à la fois des vides. Elle pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté [23].

Elle est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (3)$$

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Avec : - ρ_{app} : la masse volumique apparente

- M : la masse de l'échantillon
- V : le volume de l'éprouvette



Figure III-8 : Mesure de la masse volumique apparente

➤ **Graviers de la rivière**

Tableau III-8 : La masse volumique apparente des graviers de la rivière

Echantillon	M (g)	V (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/m ³)
1	2050	1570	1,3057	1305,9
2	2052	1570	1,3070	
3	2049	1570	1,3051	

➤ **Le sable de la rivière**

Tableau III-9 : La masse volumique apparente du sable de la rivière

Echantillon	M	V (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/m ³)
1	2190	1570	1,3949	1394,5
2	2188	1570	1,3936	
3	2190	1570	1,3949	

➤ **Les graviers de verres**

Tableau III-10: La masse volumique apparente des graviers de verre

Echantillon	M	V (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/m ³)
1	1890	1570	1,2038	1204,0
2	1892	1570	1,2051	
3	1889	1570	1,2032	

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

➤ **Sable de verre**

Tableau III-11 : La masse volumique apparente du sable de verre

Echantillon	M	V (cm ³)		
1	1878	1570	1,1962	1262,0
2	1876	1570	1,1949	
3	2190	1570	1,3949	

III.4.4 Absorption d'eau

En général, les particules de granulats sont poreuses et peuvent absorber une certaine quantité de liquide [22].

L'absorption d'un granulat, se calcule de la façon suivante :

$$\text{Abs} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (4)$$

- Avec : - Abs : absorption (%)
 - M_h : masse humide (kg)
 - M_s : masse sèche (kg)



Figure III-8 : Image illustrant l'absorption d'eau

➤ **Graviers de la rivière**

Tableau III-12 : Absorption d'eau des graviers roulés

Echantillon	M _s	M _h	Abs (%)	Abs _{moy} (%)
1	300	302	0,67	0,78
2	300	302	0,67	
3	300	303	1	

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

➤ Grapiers des verres

Tableau III-13 : Absorption d'eau des graviers de verre

Echantillon	M _h	M _s	Abs (%)	Abs _{moy} (%)
1	300	300	0	0
2	300	300	0	
3	300	300	0	

III.4.5 Analyse granulométrique

L'essai de tamisage, est en général effectué sur un matériau parfaitement sec, car la présence de traces d'eau peut fausser les résultats, en favorisant l'agglomération des particules fines.

Pour séparer les particules par taille, on a recours à une série de tamis à mailles carrées, dont les ouvertures normalisées sont les suivantes : 31.5 - 16 - 8 - 4 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 - 0.125 - 0.063 mm.

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF EN 993-1 [24].



Figure III-9 : Tamis utilisés pour l'analyse granulométrique

➤ Grapiers de la rivière

Tableau III-14 : Résultat d'essai d'analyse granulométrique du gravier

Analyse granulométrique du gravier (échantillon de 5000 g)					
Diamètre du tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)	
31.5	0	0	0.00	100.00	
16	3700	3700	74.00	26.00	
8	1060	4760	95.20	4.80	
4	180	4940	98.80	1.20	
2	30	4970	99.40	0.60	
1	9950	4980	99.60	0.40	
0.5	20	5000	100.00	0.00	

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

➤ **Sable de la rivière**

Tableau III-15 : Résultats d'essai d'analyse granulométrique du sable

Analyse granulométrique du sable (échantillon de 3000 g)				
Diamètre du tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
4	0	0	0.00	100.00
2	190	190	6.33	93.67
1	670	860	28.67	71.33
0.5	1240	2100	70.00	30.00
0.25	770	2870	95.67	4.33
0.125	130	3000	100.00	0.00

➤ **Les graviers de verre**

Tableau III-16 : Résultats de l'analyse granulométrique des graviers de verre

Diamètre du tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
16	0	0	0.00	100.00
8	630	630	21.00	79.00
4	2370	3000	100.0	0.00

➤ **Le sable de verre**

Tableau III-17 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable de verre

Diamètre du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
4	0	0	0	100.00
2	1570	1570	78.50	21.50
1	430	2000	100.00	0

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

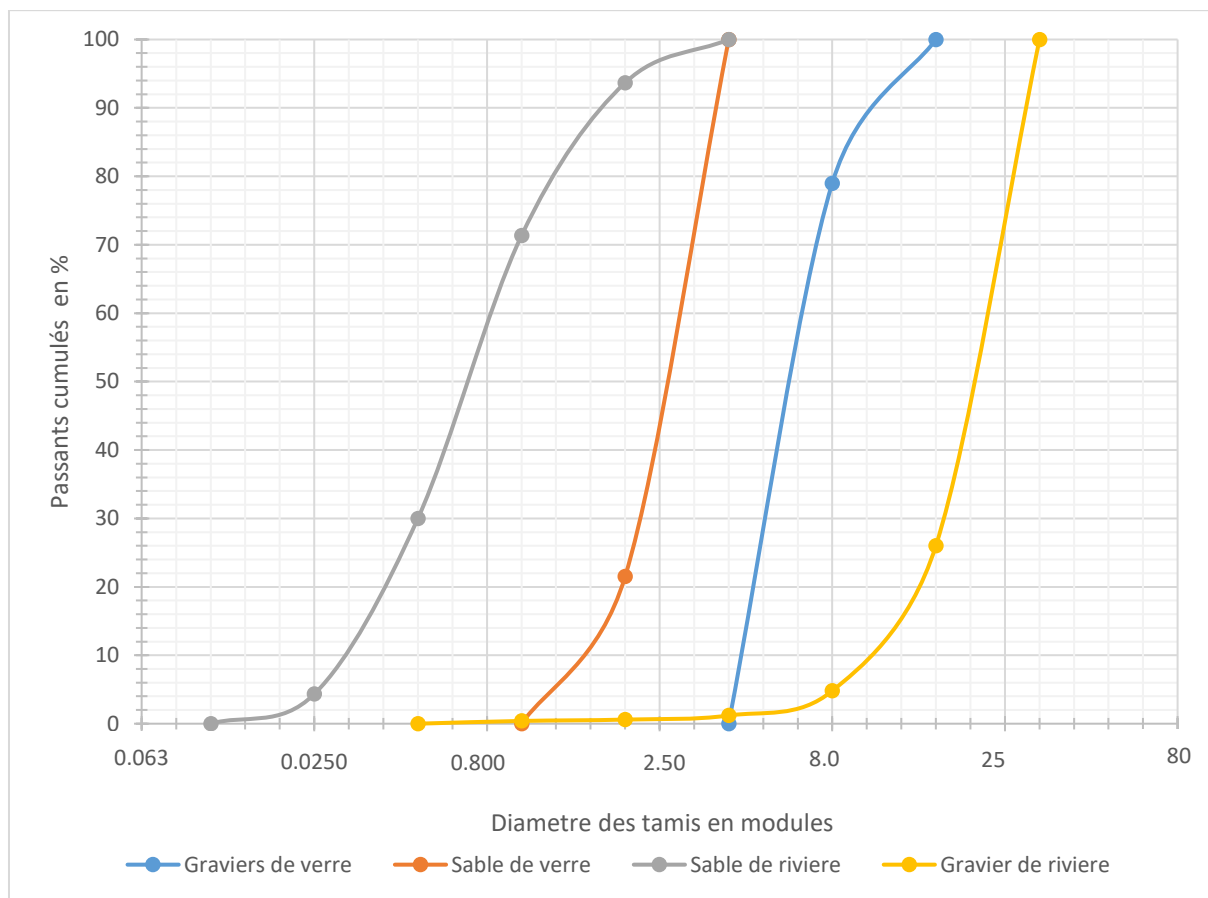


Figure III-10 : Les courbes granulométriques

❖ Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. Le module de finesse est égal au 1/100ème de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm [25].

Dans un mélange, s'il y'a trop de gains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains finis du sable. Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

Tableau III-18 : Module de finesse du sable

Granulats	Spécifications
Module de finesse	2,8 < MF < 3,3 : Sable grossier
	2,2 < MF < 2,8 : Sable moyen
	1,8 < MF < 2, : Sable fin

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

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulé en \% des tamis} \quad (5)$$

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- Pour 2,2 < MF < 2,8 le sable convient pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limitées ;
- Pour 1,8 < MF < 2,2 le sable est à utiliser si l'on cherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance ;
- Pour 2,8 < MF < 3,2 le sable est à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais on aura en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Un bon sable donnant les meilleurs résultats dans le béton, est celui dont le module de finesse se situe aux environs de la valeur MF= 2,5 [26].

Dans notre étude, le sable utilisé module de finesse du sable est égale à :

$$MF = \frac{6.33+28.67+70+95.67+100}{100} = 3$$

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

III.5 Synthèse de résultats

Tableau III-19 : Synthèse des résultats de la caractérisation des matériaux

Désignation	Granulats de rivière		Granulats de Verre		Norme
	Sable	Gravier	Sable	Gravier	
Teneur en eau	0,9	1,03	0	0	NF P 18-554
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1394,5	1305,9	1262	1204	NF EN 1936
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2526,4	2690,8	2284,3	2349,9	NF P 18-554 et
Absorption (%)	-	0,78	-	0	NF P 18-555
Module de finesse	3	-	-	-	XP P18-540

III.6 Conclusion

Les essais physiques effectués au cours de ce chapitre donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation du béton qui sera étudié au chapitre suivant.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

III.7 Formulation du béton

L'étude de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment ; granulats (agrégats fins : sable et gros agrégats : gravier ou pierres concassées) et en eau pour un dosage de 1 m³ de béton frais, afin d'obtenir un mélange et d'une compacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue.

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. L'objectif de formulation des bétons est de déterminer la combinaison des matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible.

La formulation de la composition des bétons a été faite d'après la méthode « DREUX – GORISSE » basée sur l'analyse granulométrique (sable et gravier). Cette méthode [27] a pour but de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié. Elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés. Nous allons établir toutes les courbes granulométriques sur un graphique du type normalisé AFNOR, qui comporte en abscisse une graduation logarithmique, ce qui présente l'avantage d'une graduation équidistante en module successifs.

III.7.1 Principe de la méthode

La résistance et l'ouvrabilité désirée conduit à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau. Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité de serrage, module de finesse du sable, comptabilité, des différents granulats dont on dispose.

Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré.

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

III.7.2 Données de base

a. Résistance espérée

En général, on demandera une résistance f_{c28} en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique s , il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :

f_c Supérieure à f_{c28} Car :

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 20%, on pourra adopter la règle approximativement pour la résistance moyenne à viser :

$$f_{cm} = f_{c28} + 20\% * f_{c28} \quad (6)$$

b. Consistance souhaitée

Cette consistance est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou ferrailé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiquée dans le tableau IV-1

Tableau III-20 : Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9
Béton mou	Piquage	10 à 13
Béton fluide	Léger piquage	≥ 14

c. Dimension maximale des granulats

Elle est faite en fixant des valeurs maximales fonctions des dimensions de la structure analysée selon la nature de l'ouvrage.

Pour une courbe granulométrique donnée, plusieurs dimensions des tamis peuvent satisfaire aux conditions posées par la norme XP 18-540 pour la définition du diamètre D du plus gros granulat [28].

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

d. Dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne désirée f_c . On utilise pour cela une formule inspirée des études de Bolomey : [27]

$$f_c = GF_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (7)$$

Avec :

- f_c , résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,
- F_{CE} , classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,
- C, dosage en ciment (en kg/m³),
- E, dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m³),
- G, coefficient granulaire

Tableau III-21 : valeurs approximatives du coefficient granulaire G. Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe)

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (20 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 50 mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Il ne suffit pas alors, connaissant C/E, de fixer arbitrairement le dosage en ciment et d'en déduire le dosage en eau E ; en effet, en choisissant par exemple, un faible dosage en ciment, on trouvera un dosage en eau faible ; on risquera alors d'obtenir un béton trop sec (et vice versa).

Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante.

L'abaque de la figure IV-1 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème [27].

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

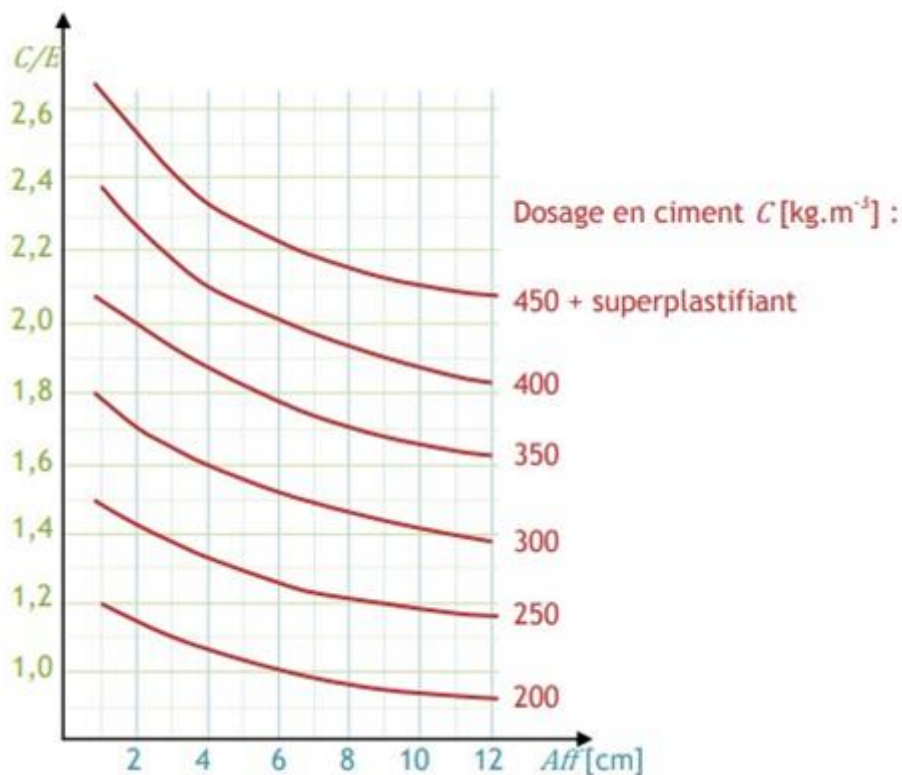


Figure III-11 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.

e. Dosage en eau

Ayant fait choix du dosage en ciment C , on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité.

➤ Correction du dosage en eau totale en fonction de D

La correction sur le dosage en eau correspondant à $D = 20$ mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau IV-3 en fonction de D .

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

Tableau III-22 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 20$ mm)

Dimension maximale des granulats D en mm	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63,5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Le graphique de la figure IV-2 donne l'allure générale de cette correction

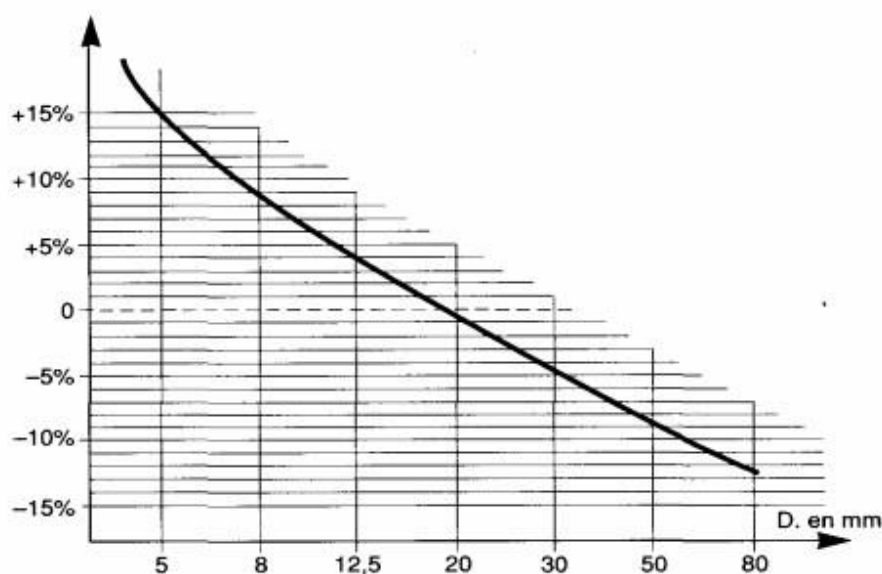


Figure III-12: Variation de la correction à apporter au dosage en eau si la dimension maximale des granulats est différente de 20 mm.

f. Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), on trace une composition granulaire de référence O A B : le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A a des coordonnées ainsi définies :

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

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$.

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D .

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

En ordonnée : $Y = 50\sqrt{D} + K$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable.

La valeur du terme correcteur K est en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence : $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

Tableau III-23 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats

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

Nota 1 : correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à révéler le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

Nota 2 : Correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à $+10$ environ, selon le degré de plasticité désiré.

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

g. Coefficient de compacité

C'est le rapport à un mètre cube de volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais. On choisira une valeur approximative de γ dans le tableau IV.5.

Tableau III-24 : Valeurs de coefficient de compacité

Consistance	Serrage	γ : Coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
		0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,730	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
		0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration normale	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
		0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration normale	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
	Vibration puissante							
Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'adopter les corrections suivantes :								
Sable roulé et gravier concassé = - 0,01								
Sable et gravier concassé = - 0,03								

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

h. Dosage des granulats

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point de 5% de la courbe du granulat suivant et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec la ou les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats soit g_1 , g_2 et g_3 respectivement.

Si « C » est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$c = \frac{C}{3,1} \quad (8)$$

En admettant une masse spécifique de 3,1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise.

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - c \quad (9)$$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$v_1 \geq g_1V ; v_2 \geq g_2V ; v_3 \geq g_3V$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ϖ_1 , ϖ_2 et ϖ_3 , les masses de chacun d'eux seront :

$$p_1 = v_1\varpi_1 ; p_2 = v_2\varpi_2 \text{ et } p_3 = v_3\varpi_3 \quad (10)$$

La masse totale des granulats :

$$G = P_1 + P_2 + P_3 \quad (11)$$

III.7.3 Détermination des compositions du béton

a. Détermination de la courbe de référence

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB, cette courbe nous permet de déterminer les différents pourcentages (%) des granulats entrant dans la composition du béton. Le point O est placé à l'origine du graphique, le point B correspond à la dimension D_{\max} des plus gros granulats à l'ordonnée 100%. A est appelé point de brisure [29].

Figure III.3: Schéma de principe de la courbe granulaire de référence pour un béton dont les granulats ont un diamètre maximum D_{\max} inférieur ou égal à 20 mm.

Coordonnées des points O, A et B

Le point O

- Abscisse : 0,063
- Ordonnée : 0% Le point A :
- En abscisse : Si $D \leq 20\text{mm}$; l'abscisse est $D/2$

Si $D > 20\text{mm}$; l'abscisse est l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le tamis de maille (5mm) et le module correspondant à D.

Pour notre cas on a $D > 20\text{ mm}(D=31,5\text{mm})$.

Alors l'abscisse du point A est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis de maille de 5 mm :

$$X_A \equiv [5; 31,5] = \frac{5 + 31,5}{2} = 18,25$$

- En Ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K \quad (12)$$

K : Terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats, et également du module de finesse.

K_s , ajustement pour les sables de granularité un peu grossière

$$K_s = 6MF - 15$$

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Les valeurs de K sont indiquées dans le tableau ci-dessus.

III.7.4 Application numérique

- Résistance désirée : $F_{c28} = 25 \text{ MPa}$
 $f_{c \text{ moy}} = f_{c28} + 20\% f_{c28} = 30 \text{ MPa}$
- Consistance désirée :
 choix : Béton plastique avec vibration courante. La valeur de l'affaissement est située entre 6 et 9. Alors prenons l'affaissement de 7,5 cm.
- Dimension maximale des granulats (D) :
 Pour notre cas $D = 31,5 \text{ mm}$
- Dosage en ciment :
 $G = 0,5$

$$f_c = GF_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (13)$$

$$f_{CE} = 42,5 \text{ MPa} + 20\% * 42,5 \text{ MPa} = 51 \text{ MPa}$$

$$\frac{C}{E} = 1,68$$

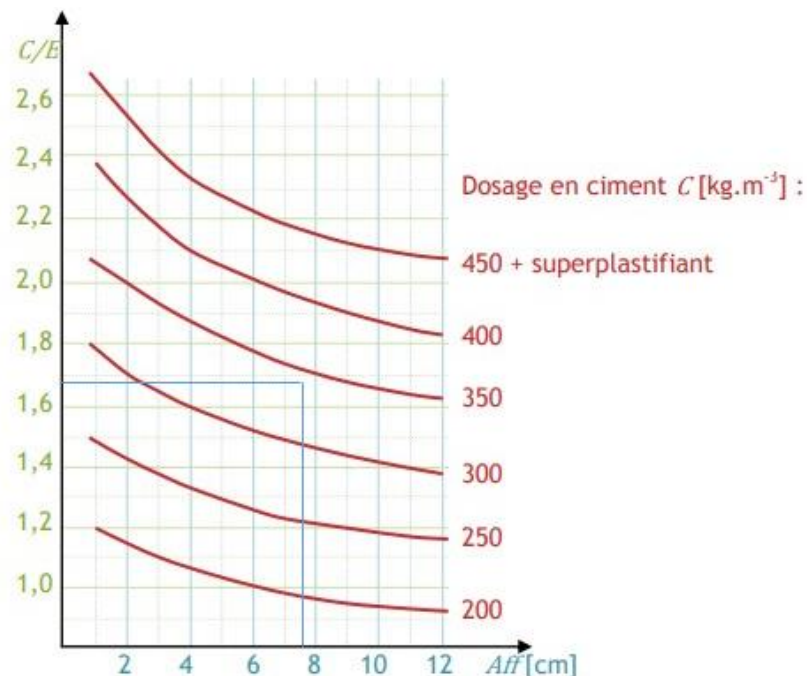


Figure III-13 : Détermination du dosage en ciment

De cet abaque, $C = 345 \text{ kg/m}^3$

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

➤ Courbe de référence

Vibration normale et graviers roulés : $K=0$

$K_p = 0$ (béton non pompé)

$$K_s = 6Mf - 15 = (6 \times 3) - 15 = 3$$

Les coordonnées du point O

$X = 0,063\text{mm}$ et $y = 0\%$

Les coordonnées du point A

Comme $D > 20\text{ mm}$: $x = \frac{5+31,5}{2} = 18,25\text{ mm}$

$$y = 50 - \sqrt{31,5} + 3 = 47,43\%$$

Les coordonnées des points B

L'ordonnée 100% correspond à la dimension maximale D du plus gros granulat

- Abscisse : 31,5mm

- Ordonnée : 100%

Tableau III-25 : Synthèse des coordonnées

	X	Y
Point O	0,063	0
Point B	31,50	100
Point A	18,25	47,43

➤ **Dosage en eau**

Le rapport C/E = 1,68

$$\rightarrow E = 345/1,68 = 205,357\text{ l/m}^3$$

➤ **Calcul des volumes absolus des matières solides**

$$\gamma = \frac{V_m}{1000} \quad \text{avec : } v_m : \text{Volume absolue des matières solides :}$$

Le coefficient de compacité $\gamma = 0,83$

Le volume total absolu : $V_m = 1000 \times 0,830 = 830\text{ l}$

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} = \frac{345}{3,1} = 111,3\text{ l}$$

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Le volume absolu de granulats :

$$V_G = V_m - V_C$$

$$d = 8301 - 111.31 = 718,71$$

$$d = 718,71$$

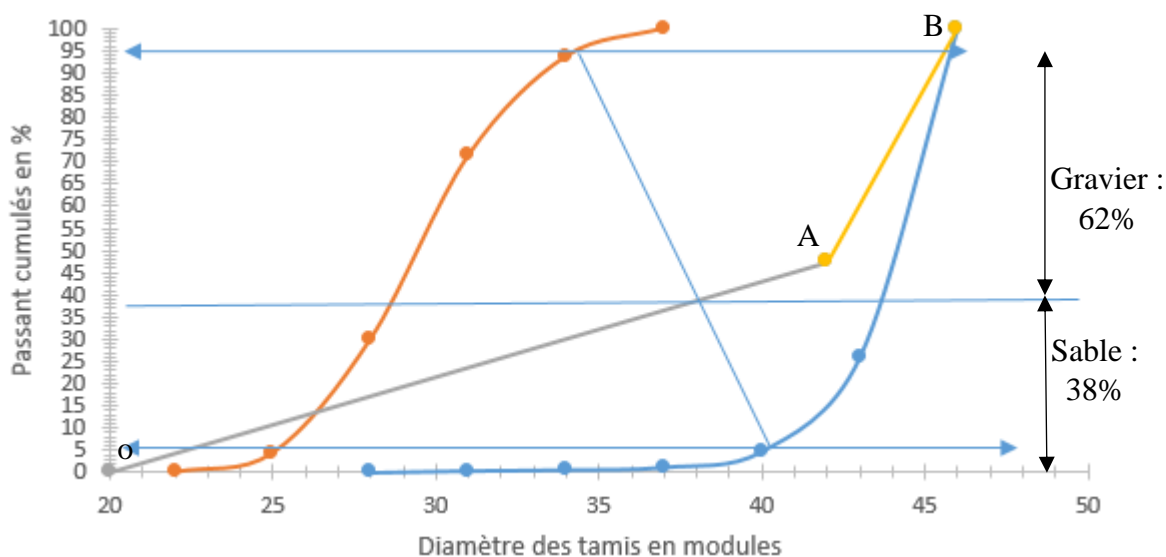


Figure III-14 : Tracé de la courbe représentative du dosage des granulats

$$V_{\text{abs sable}} = 718,71 * 0,38 = 273,1061$$

$$V_{\text{abs gravier}} = 718,71 * 0,62 = 445,59411$$

a. Correction de l'eau de gâchage

1. En fonction du diamètre maximal des granulats

Le diamètre maximal des graviers utilisés est 31.5mm, alors d'après le Tableau III-4 on va réduire 4% du volume trouvé : $205,3571 * 4\% = 8,21431$

2. En fonction de la teneur en eau

La teneur en des granulats utilisés est respectivement :

Gravier de la rivière : 1,03%

Sable de la rivière : 0,9%

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

En tenant compte de la teneur en eau, on va réduire :

$$445,594 \text{ l} * 1.03\% + 273,106 \text{ l} * 0,9 \text{ l} = 7 \text{ l}$$

Donc, le volume de l'eau sera : $205,357 \text{ l} - 8,2143 \text{ l} - 7 \text{ l} = 190,14 \text{ l}$

Tableau III-26 : Composition d'un mètre cube du béton

Composition	Valeur
Ciment (kg/m ³)	345
Gravier (litre)	445.594
Sable (litre)	273.106
Eau corrigée (litre)	190,14

Tableau III-27 : Formulation du béton en substituant les graviers roulés par ceux des verres broyés.

Substitution volumique des graviers		
Dosage des graviers de verre (%)	V abs des graviers nat (l)	V abs grav verres (l)
0	445.594	0
10	401.0346	44.5594
20	356.47528	89.1188
30	311.9158	133.6782
40	267.3564	178.2376

Tableau III-28 : La masse des graviers naturels et de verres par 1m³ du béton

Masse abs (kg)		
Dosage de graviers de verre	grav naturel	grav verres
0	1199,00	0,00
10	1079,10	104,71
20	959,20	209,42
30	839,30	314,13
40	719,40	418,84

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau III-29 : Formulation du béton en substituant le sable de rivière par celui des verres broyés.

Substitution volumique du sable		
Dosage de graviers de verre (%)	V abs sable naturel (l)	V abs sable verres (l)
0	273.106	0
10	245.7954	27.3106
20	218.4848	54.16212
30	191.1742	81.9318
40	163.8636	109.2424

Tableau III-30 : La masse du sable naturels et de verres par $1m^3$ du béton

Masse abs (kg)		
Dosage de sable de verre	Masse sable naturel	Masse sable verres
0	689,97	0,00
10	620,98	62,39
20	551,98	124,77
30	482,98	187,16
40	413,98	249,54

III.7.5 Préparation des matériaux et réalisation des mélanges

Avant la réalisation d'une gâchée, la quantité de matériaux nécessaire a été mesurée pour chaque pourcentage suivant les dosages. Les matériaux sont homogénéisés dans un grand bac. Le volume des gâchées a été fixé de façon à permettre la confection de six éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Cela se faisait pour chaque composition du béton aussi pour un seul essai.

$$\text{Volume de 1 moule } V = 10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ cm}^3 = 0,001 \text{ m}^3$$

Volume du béton nécessaire pour les six éprouvettes :

$$V = 0,001 \text{ m}^3 \times 6 \times 1,2 = 0,0072 \text{ m}^3 \quad \text{avec 1,2 coefficient de majoration}$$

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

a. La quantité des granulats exprimée en masse pour le béton à confectionner

Tableau III-31 : La composition du béton par substitution des graviers pour les six éprouvettes

Dosage en verre (%)	V. du béton	Graviers (kg)		Sable (kg)	Eau (l)	Ciment
		Graviers naturel	Graviers de verre			
0	0,0072	8,63	0	4.97	1,37	2.484
10	0,0072	7,77	0.75	4.97	1,37	2.484
20	0,0072	6,91	1.51	4.97	1,37	2.484
30	0,0072	6,04	2.26	4.97	1,37	2.484
40	0,0072	5,18	3.02	4.97	1,37	2.484

Tableau III-32 : La composition du béton par substitution du sable pour les éprouvettes.

Dosage en verre (%)	V. du béton	Sable (kg)		Graviers (kg)	Eau (litre)	Ciment
		Sable naturel	Sable de verre			
0	0.0072	4.97	0	8.63	1,37	2.484
10	0.0072	4.47	0.45	8.63	1,37	2.484
20	0.0072	3.97	0.90	8.63	1,37	2.484
30	0.0072	3.48	1.35	8.63	1,37	2.484
40	0.0072	2.98	1.80	8.63	1,37	2.484

Les moules ont été remplis en différentes couches pendant la vibration sur table vibrante. Après la vibration, les éprouvettes sont conservées au laboratoire des matériaux de construction à une température ambiante. Le démoulage a été effectué avec soin au bout de 24 heures. Juste après cette opération, les éprouvettes ont été conservées dans les bacs d'eau jusqu'à 28 jours.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

CHAPITRE IV: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.

IV.1 Essai d'affaissement

Le contrôle de l'ouvrabilité des bétons est effectué grâce à un essai d'affaissement au cône d'Abrams [30].

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Cet essai consiste à remplir le cône en trois couches tassées avec une tige de d'acier pointue de 16mm de diamètre à raison de 25 coups par couche, puis soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.

Tableau IV-1 : L'affaissement du béton contenant les graviers de verre

Teneur en graviers de verre (%)	Affaissement (cm)
0	4,5
10	3,8
20	3,5
30	3,3
40	3

Tableau IV-2 : L'affaissement du béton contenant du sables de verre

Teneur en sable de verre	Affaissement (cm)
0	4,5
10	4
20	3,7
30	3,5
40	3,2

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-3 : L'évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement.NF-EN-206/CN.

Plasticité	Serrage	Affaissement (cm)	Dénomination NF-EN-206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1/S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S3
Béton mou	Piquage	10 à 13	S4
Béton liquide	Leger piquage	≥ 14	S3/S4/S5

Les valeurs d'affaissement trouvées sont situées entre 3 et 5 cm, il s'agit d'un béton ferme.

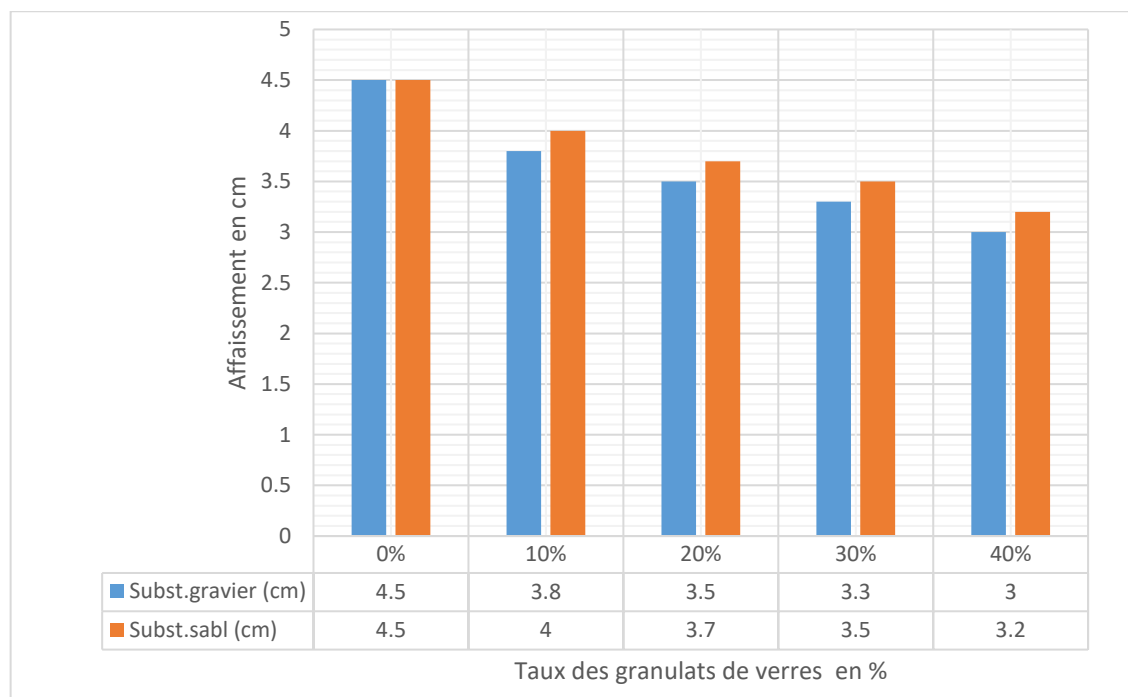


Figure IV-1 : Comparaison d'affaissement du béton étudié.

IV.2 Masse volumique

La masse volumique sera donnée par le rapport entre la masse d'une éprouvette mesurée par une balance et de son volume calculé théoriquement. La masse volumique finale sera la moyenne de la masse volumique des trois éprouvettes au minimum conformément à la norme [30].

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-4 : Les résultats de la masse(en kg) sèche des éprouvettes obtenues par substitution des graviers.

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	2,31	2,35	2,26	2,29	2,19
2	2,32	2,36	2,3	2,3	2,3
3	2,38	2,34	2,3	2,24	2,29
4	2,4	2,35	2,35	2,31	2,18
5	2,39	2,31	2,32	2,28	2,26
6	2,36	2,3	2,33	2,31	2,25
Moyenne	2,36	2,34	2,31	2,29	2,25

Tableau IV-5 : La composition du béton par substitution des graviers en verre

Teneur en verre (%)	Volume (m ³)	Masse sèche (kg)	ρ (kg/m ³)
0	0,001	2,36	2360
10	0,001	2,34	2340
20	0,001	2,31	2310
30	0,001	2,29	2290
40	0,001	2,25	2250

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-6 : Les résultats de la masse sèche (kg) des éprouvettes obtenu par substitution du sable.

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	2,31	2,33	2,24	2,28	2,18
2	2,32	2,35	2,4	2,28	2,25
3	2,38	2,32	2,2	2,24	2,22
4	2,4	2,36	2,35	2,26	2,24
5	2,39	2,3	2,32	2,26	2,25
6	2,36	2,25	2,3	2,3	2,26
Moyenne	2,36	2,32	2,30	2,27	2,23

Tableau IV-7 : La composition du béton par substitution du sable de verre

Teneur en verre(%)	Volume (m ³)	Masse sèche (kg)	ρ (kg/m ³)
0	0,001	2.36	2360
10	0,001	2.32	2320
20	0,001	2.30	2300
30	0,001	2.27	2270
40	0,001	2.23	2230

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

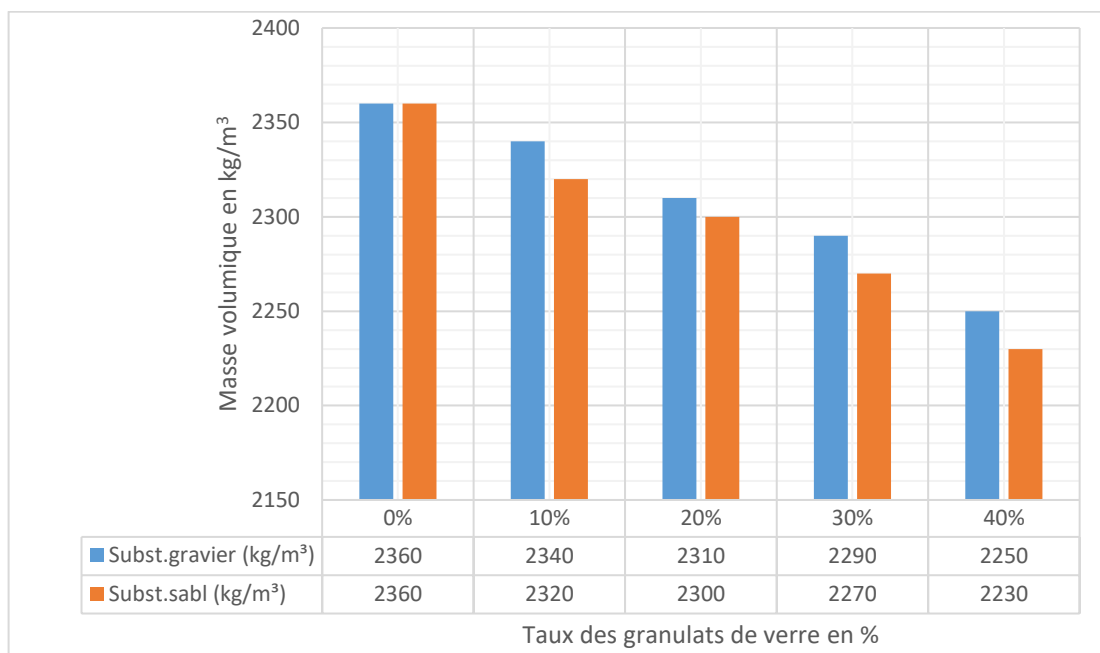


Figure IV-2 : la masse volumique du béton étudié

IV.3 Essai de résistance à la compression

Cet essai a été effectué selon la norme NF EN 12390-3 [31]. Les éprouvettes de 10x10x10 cm³ sont testées après une cure de 28 jours dans l'eau. On a pris la moyenne de six éprouvettes pour chaque type de béton.

Tableau IV-8 : La composition du béton par substitution des graviers en verre

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	30,2	29,8	27,7	26,8	22,7
2	31,4	30	29,34	20,97	21,68
3	31,4	31,5	28,41	21,67	21,44
4	32,5	31,8	27,8	26,57	21,3
5	32	31,5	27,45	24,53	18,26
6	31,5	29,6	27,4	25,62	17,34
Moyenne	31,50	30,70	28,02	24,36	20,45

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-9 : La composition du béton par substitution du sable en verre

Echantillon	Pourcentage des dechets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	30,2	30	28,3	25,46	21,4
2	31,4	31,05	29,4	25,5	20,91
3	31,4	31,2	31,2	24,76	23,9
4	32,5	32,44	31,25	24,6	22,67
5	32	31,98	30,3	25,2	20,26
6	31,5	31,11	30,75	26,32	19,56
Moyenne	31,50	31,30	30,20	25,31	21,45

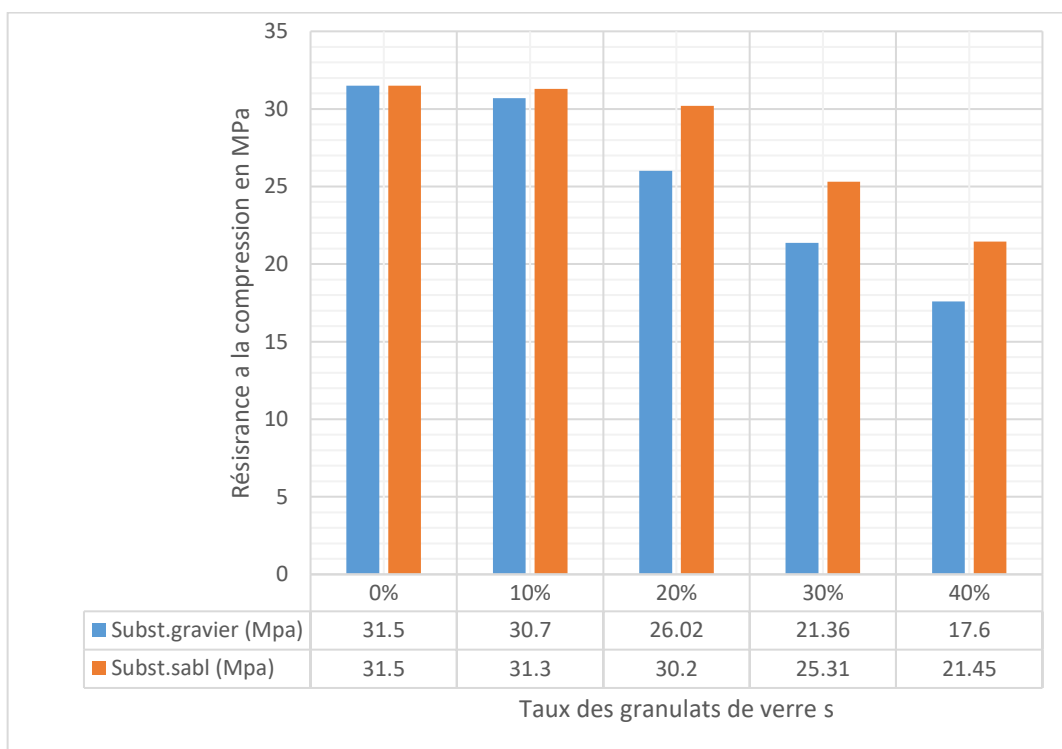


Figure IV-3 : Comparaison de la résistance du béton étudié

« *Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton.* »

IV.4 Essai d'absorption d'eau par immersion

L'essai d'absorption par immersion consiste à mettre les éprouvettes du béton dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24h pour déterminer la masse sèche, ensuite les immerger totalement dans l'eau pendant une durée de 24h dans le but de trouver la masse humide.

Tableau IV-10 : La masse sèche (en kg) du béton obtenu par substitution des graviers

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	2,31	2,35	2,26	2,29	2,19
2	2,32	2,36	2,3	2,3	2,3
3	2,38	2,34	2,3	2,24	2,29
4	2,4	2,35	2,35	2,31	2,18
5	2,39	2,31	2,32	2,28	2,26
6	2,36	2,3	2,33	2,31	2,25
Moyenne	2,36	2,34	2,31	2,29	2,25

Tableau IV-11 : La masse humide (en kg) du béton obtenu par substitution des graviers

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	2,37	2,38	2,28	2,31	2,24
2	2,38	2,39	2,34	2,34	2,33
3	2,42	2,37	2,35	2,3	2,32
4	2,43	2,39	2,38	2,32	2,21
5	2,42	2,37	2,37	2,34	2,28
6	2,41	2,35	2,35	2,33	2,27
Moyenne	2,41	2,38	2,35	2,32	2,28

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-12 : Calcul de l'absorption d'eau par immersion du béton obtenu par substitution des graviers.

% des verres	Masse seche (kg)	Masse humide (kg)	Abs (%)
0	2,36	2,41	2,12
10	2,34	2,38	1,93
20	2,31	2,35	1,73
30	2,29	2,32	1,38
40	2,25	2,28	1,33

Tableau IV-13 : La masse sèche (en kg) du béton obtenu par substitution du sable

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	2,31	2,33	2,24	2,28	2,18
2	2,32	2,35	2,4	2,28	2,25
3	2,38	2,32	2,2	2,24	2,22
4	2,4	2,36	2,35	2,26	2,24
5	2,39	2,3	2,32	2,26	2,25
6	2,36	2,25	2,3	2,3	2,26
Moyenne	2,36	2,32	2,30	2,27	2,23

Tableau IV-14 : La masse humide (en kg) du béton obtenu par substitution du sable

Echantillon	Pourcentage des déchets de verres				
	0%	10%	20%	30%	40%
1	2,37	2,4	2,24	2,28	2,22
2	2,38	2,37	2,6	2,33	2,27
3	2,42	2,39	2,22	2,24	2,24
4	2,43	2,4	2,35	2,29	2,26
5	2,42	2,35	2,32	2,31	2,26
6	2,41	2,3	2,32	2,32	2,28
Moyenne	2,41	2,37	2,34	2,30	2,26

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

Tableau IV-15 : Calcul de l'absorption d'eau par immersion du béton obtenu par substitution des graviers.

% des verres	Masse sèche (kg)	Masse humide (kg)	Abs (%)
0	2,36	2,41	2,12
10	2,32	2,37	1,96
20	2,30	2,34	1,74
30	2,27	2,30	1,45
40	2,23	2,26	1,35

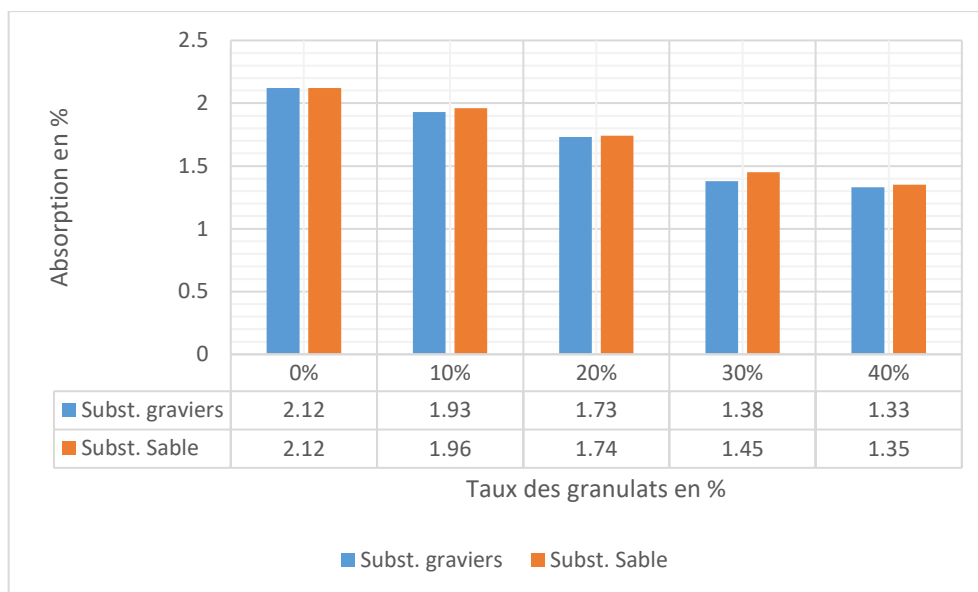


Figure IV-4 : Absorption d'eau du béton

Discussion des résultats

Les résultats trouvés montrent que l'affaissement, la résistance à la compression, la masse volumique et l'absorption d'eau diminuent progressivement en fonction d'augmentation des granulats de verres incorporés.

Les essais montrent que :

L'augmentation de l'incorporation des granulats de verre dans le béton tend à diminuer l'affaissement car le béton devient difficilement maniable avec l'augmentation des granulats de verre (figure V.1).

D'après la (figure V.5), la variation de la résistance à la compression est due aux paramètres suivants :

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

- ❖ La mauvaise adhérence entre la pâte et les granulats de verres du fait que ces derniers ont une texture parfaitement lisse alors que les granulats naturels possèdent des pores, ce qui leur permet d'avoir une bonne adhérence.
- ❖ Propriétés mécaniques : Les verres sont des matériaux durs mais cassants ce qui permet d'avoir une faible résistance lorsqu'ils sont introduits dans le béton.
- ❖ La quantité de verres introduite dans le mélange du béton influence sur diminution de la résistance à la compression. En considérant les résultats obtenus, on constate que la substitution des graviers et du sable de taux respectivement égal à 10% et 20% ont une contrainte supérieure à celle qu'on avait souhaitée (25MPa).
- ❖ La forme irrégulière de ses granulats et la non prise en compte de la granulométrie des granulats de verre sont aussi responsable de la diminution de la résistance à la compression car ils influent sur la compacité du béton.

En analysant aussi les résultats trouvés sur la figure V-5, le béton contenant le sable de verres a une résistance élevée par rapport à celui contenant les graviers de verres car les verres de grandes dimensions ont tendance de se casser facilement par rapport à ceux qui en ont petites.

La masse volumique du béton diminue au moment où la quantité de verre accroît dans le béton Figure V-3 ; cela est dû à la densité des verres qui est inférieure à celle des granulats naturels. Avec le même taux de substitution, la masse volumique du béton contenant les graviers de verres est plus grande que celle du béton contenant du sable.

Le béton contenant les graviers de verres absorbe moins de l'eau que celui du béton témoin. Cela est dû à l'absorption des granulats de verres introduits qui est pratiquement nulle. Donc, plus la quantité de granulats de verres dans un béton augmente, plus la quantité de matériaux constitutifs de ce dernier qui allait absorber de l'eau diminue.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

❖ CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche consiste à étudier le comportement du béton à l'état frais et durci contenant les granulats de verres broyés. Elle rentre dans la cadre de la valorisation des déchets de verres. Ces derniers ont été utilisés comme remplaçant partiel des granulats roulés provenant de la rivière Kanyosha pour minimiser les impacts négatifs dus à l'exploitation des ressources naturelles, ce qui par conséquent permet aussi de réduire les déchets de verre dans la nature.

Pour atteindre notre objectif ; deux compositions du béton ; l'un contenant les graviers et l'autre du sable de verres à des teneurs variant de 0%,20%,30% et 40% ont été réalisées. Les essais réalisés sont entre autres l'affaissement pour le béton frais, la résistance à la compression, la masse volumique et l'absorption par immersion du béton à l'état durci.

L'analyse expérimentale pour le béton frais et durci montre que :

- Du point de vue résistance à la compression, l'augmentation des déchets de verres affecte la résistance du béton. Pour un taux de 0 à 40% du sable de verre ; la contrainte a diminué de 31,5 MPa à 21,45 MPa et 31,5 MPa à 17,6 MPa pour le gravier. Le remplacement de 10% du volume des graviers roulés par des verres broyés donne une résistance à la compression supérieure à celle qui été souhaitée, alors que pour le sable on peut aller jusqu'à 20%. Il est préférable d'utiliser le sable de verres car il donne de résistances supérieures à celles du béton contenant les granulats de verres à un même taux de substitution.
- Plus on augmente la quantité de verre dans le béton ; ce dernier absorbe moins de l'eau. Les valeurs trouvées pour la substitution du sable et le gravier sont proches, la variation est de 2,12 à 1,33%.
- La masse diminue lorsque la quantité de granulats de verre est augmentée. Cette diminution est de 2360 à 2230kg/m³ pour le sable de verre et 2360 à 2250kg/m³ pour le gravier.
- La diminution de l'affaissement du béton diminue avec l'augmentation des granulats de verre. Cette réduction est de 4,5 à 3,2 cm pour le béton contenant du sable de verre et jusqu'à 3 cm par celui contenant les graviers.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

❖ RECOMMANDATIONS

• Au Gouvernement

- Encourager les projets visant la valorisation des déchets de toutes sortes dans le but de diminuer l'exploitation des matières premières ;
- Envisager l'aménagement d'une décharge contrôlée qui obéit aux normes internationales, organisée en compartiments dédiés à chaque type de déchet.
- Avoir le plan d'extraction.

• A la Mairie

Il faut équiper de poubelles colorés et étiquetés les voies publiques, les lieux de rencontre (marchés, églises, bistrot) et les milieux de travail (écoles, hôpitaux, bureaux) pour la collecte séparée de différents types de déchets afin de faciliter la tâche aux collecteurs et/ou utilisateurs.

• Aux ménages

Trier les déchets solides par leur nature physico chimique.

• A l'université du Burundi

- Remplacement des matériels non fonctionnels dans le laboratoire des matériaux de construction ;
- Extension et rééquipement des matériels modernes du laboratoire afin de faciliter les étudiants dans leurs recherches.

• Aux futurs chercheurs

Continuer les essais du béton contenant les granulats de verres sur la résistance au feu, la résistance à la flexion et faire l'analyse chimiques des granulats naturels et de verres ainsi que le ciment couramment utilisé.

• Au bureau d'études de construction

- Favoriser l'utilisation des matériaux à base des déchets.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Mohamed Lamine KATEB (2009), Memoire de maitrise es sciences appliquées " utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architectural : cas de briques"Université de SHERBROOKE.
- [2] BENHAROUNE LAHCENE (2008), ,memoire de matere "Utilisation des agregats de verres comme remplaçant partiel du sable dans le mortier"UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA.
- [3] PARK ;S/B;LEE;BC.,KIM, J.H (2004) :Stadies on mechanial properties of concrete containg waste glass aggregate,Cement and concrete research Vol.34,p.2181-2189.
- [4] Lucien Pliskin, « Le béton », C&T 1992 26 58 du livre de la fabrication du ciment. Secrétaire ;; SOCIETE DES CIMENTS FRANCAIS, Editeur scientifique ; Paris : Eyrolles (1993)..
- [5] Hachemi Nadir ; Boussad Adel (2009), mémoire de fin d'étude de Master:« Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton »spécialité : Génie de matériaux.Université de Hamed Bougara-Boumerdes., Université de Hamed Bougara-Boumerdes..
- [6] Djouder Katia et Hamssa Lynda, « ; Gestion des déchets ménage en Algérie : Etat des lieux et perspectives » ; mémoire de fin d'étude Option : Economie Industrielle. Université Adderahmane Mira Béjia ; (Année 2017/2018).
- [7] Les déchets et leur élimination, « Les déchets en chiffre : Edition 2015 » ADEME..
- [8] Les déchets, : Définition ; Gestion Collecte, Traitement ; Responsabilités police spéciale. SPI Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollution Industrielle en Val de Seine ; Versaille France.2014.
- [9] La Collecte, Le Tri et Le Recyclage du verre Des Déchets ménagers et Assimiles, Le dossier Thématique réaliser par le Cercle National du Raclage de Lille ; France (2008).
- [10] Nicholes Chévalier, Essai présenté au centre université de formation en enveniment et développement durable en vue d'obtenir de garde de Maître en enivrement. Sous la direction de Monsieur François Lafortune Maître en environnement Université de Sherbrooke. (2018).
- [11] Zeroub Hamid, « Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable » pour le diplôme Magister Option : Physico-chimie des matériaux minéraux. Université M'Hamed Bougara Boumerdes. (2012).
- [12] SHAYANE, A , XU. A., (2004)Value added utilisation of waste glass in concrete.Cement and concrete research,vol. 34,p. 81-89.

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

- [13] André LE ROUX Bruno et GODART (2008), « Alkali-réaction dans les structures en béton : Mécanisme, pathologie et prévention » article de recherche..
- [14] NBN B15 – 001, Béton-séparateurs, performances, production et conformité, 2018.
- [15] NBN B 12-109, Ciment-ciments à teneur limitée en alcalis, 2020.
- [16] Ndikumana Théophile, ; « Quantification, caractérisation et voies de valorisation des déchets solides municipaux dans la ville de Bujumbura. » article de recherche : Université du Burundi ; Faculté des Sciences, Département de Chimie (2015).
- [17] George Dreux et Jean Festa, « Nouveau guide du béton » Septième Edition (1995)..
- [18] XP P 18-303, Béton-Mise en oeuvre - eau de gachage pour le béton de construction ..
- [19] NF P 18-101, Granulats- vocabulaire - Définition et classification ,1999.
- [20] Hachemi Nadir ; Boussad Adel,, mémoire de fin d'étude : « Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton » spécialité : Génie de matériaux. Université de Hamed Bougara-Boumerdes. 2019.
- [21] NF P 18 - 555, Granulats. Mesures des masses volumiques coefficient d'absorption et teneur en eau des sables,1980.
- [22] NF P 18-554, Mesures des masses volumiques, porosité ; coefficient d'absorption et en teneur en eau des gravillons et cailloux, 1979.
- [23] NF EN 1936, Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totales, 1999.
- [24] NF EN 993-1, Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.
- [25] NFP 18-540, Granulats - Définition, conformité, spécifications. 1997.
- [26] F., Dreux Gorisse, , Contribution à l'étude de la finesse des sables sur diverses qualités des bétons, paris: Eyrolles, 1969..
- [27] Dreux GV., FESTA J., Nouveau guide du béton et ses constituants, Paris : EYROLLES, 2002,P.350.
- [28] XP 18 – 540, Granulats - Définitions, conformité, spécifications. 1997.
- [29] Hélène H., Xavier J., Formulation d'un béton ordinaire, Paris: Ecole normale supérieure, 2018..

« Etude de l'impact de l'inclusion des granulats issus des déchets de verre sur le comportement mécanique du béton. »

[30] NF P 18-451, Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUP, 2018.

[31] NF EN 12390-3, Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, 2019.