

2026-01

Influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton : : Cas des granulats de la rivière Ntahangwa à Bujumbura

Karangwa, Barthélémy

ENS : Sciences Appliquées

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2258>

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

ECOLE NORMALE SUPERIEURE



DEPARTEMENT DES SCIENCES APPLIQUEES

SECTION DE GENIE CIVIL

**INFLUENCE DU TAMISAGE DES GRANULATS SUR LA
RESISTANCE DU BETON :
« CAS DES GRANULATS DE LA RIVIERE NTAHANGWA
A BUJUMBURA »**

Réalisé par :
KARANGWA Barthélémy

Sous La Direction de :
Dr. Arch Gamaliel KUBWARUGIRA : Directeur
Et
MSc. Ir. KANYAMUDURI Jean Baptiste : Co-Directeur

Mémoire de fin d'études présenté
et défendu publiquement le 26/
01 /2026 en vue de l'obtention du
diplôme de Master en Génie
Civil.

Option : « Bâtiment et Infrastructures »

Promotion : 2024-2025

BUJUMBURA, Janvier 2026

DEDICACE

A mes parents ;
A mes frères et sœurs ;
A mes collègues ;
A mes amis et connaissances.

KARANGWA Barthélemy

REMERCIEMENTS

Dans une carrière professionnelle de tout domaine scientifique, un travail de recherche est toujours d'une importance capitale. Je ne prétends donc pas affirmer que ce mémoire a été le fruit de mes seuls efforts car ce serait une marque de vanité dont ma conscience et à fortiori certaines personnes bien intentionnées ne sauraient m'excuser. Ainsi l'aboutissement de ce travail m'accorde une opportunité de m'acquitter d'une noble dette de reconnaissance envers toutes ces personnes qui ont contribué de près ou de loin à son élaboration.

Principalement, je pense au Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique qui ; par l'intermédiaire de l'ECOLE NORMALE SUPERIEURE a mis en place le programme de Master pour permettre aux lauréats du département des Sciences Appliquées, Section de Génie Civil de compléter leurs connaissances techniques et scientifiques dans la construction des structures complexes relevant du secteur du Bâtiment et des Infrastructures.

Poursuivant, je tiens à remercier sincèrement mon Directeur de Mémoire Dr. Arch Gamaliel KUBWARUGIRA et mon codirecteur M_{SC}. Ir. KANYAMUDURI Jean Baptiste qui ; malgré leurs multiples responsabilités ont accepté de diriger mon mémoire de fin d'études. La pertinence de leurs conseils, leur compétence, patience, rigueur scientifique, disponibilité et leur amour de travail m'ont été d'une grande utilité. Ils me serviront de guide dans ma vie ; qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude pour s'être bien acquittés de leurs obligations professionnelles. Je leur en serai reconnaissant pour toujours.

Une reconnaissance cordiale est orientée aux membres du jury pour avoir accepté de faire partie du jury de mon mémoire et d'y apporter des améliorations.

Mes sentiments de profonds remerciements s'adressent également à tous les enseignants et professeurs qui ; depuis l'école primaire, secondaire, l'Université du Burundi plus précisément la Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Civil et Environnemental (GC&E) dans l'Option de Géotechnique et Infrastructures jusqu'au cycle de Master à l'Ecole Normale Supérieure dans le Département des Sciences Appliquées Section de Génie Civil, option de Bâtiment et Infrastructures.

Que tout le personnel de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur (FSI) ainsi que celui de l'Office Burundais de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction (OBUHA) trouve mes sincères remerciements en l'occurrence Monsieur le Doyen de la faculté, Monsieur le Commissaire Général de l'OBUHA, Monsieur le Directeur des études et laboratoire (OBUHA/DEL) ainsi que les différents laborantins d'avoir permis et facilité mes essais au sein de leurs laboratoires. Dans cette optique, je ne peux pas oublier de remercier aussi le personnel de l'ENS ainsi que la 5^{ème} promotion de Master ; qu'ils trouvent mes plus hautes considérations de ce temps précieux consacré pour moi.

Je réserve une marque de reconnaissance spéciale à mes très chers parents qui ont soutenu mes études depuis l'école primaire jusqu'à l'heure où je présente ce travail ; qu'ils trouvent ici une occasion de se réjouir, eu égards à leurs efforts.

Je témoigne ma profonde reconnaissance à l'endroit de tous mes amis qui m'ont prêté mains fortes, qui m'ont côtoyé pendant les moments douloureux, et n'ont jamais cessé de me témoigner l'intérêt qu'ils attachaient à la réussite de mes études ; ainsi qu'à toutes mes connaissances qui ont rendu mon séjour agréable à l'Ecole Normale Supérieure afin que je puisse terminer mes études en bonne santé et toutes les personnes qui ne cessent de penser à moi, leurs gestes resteront le signe d'un profond attachement. A vous tous et à chacun, je dis sincèrement merci.

KARANGWA Barthélémy

SIGLES ET ABBREVIATIONS

A : surface de la section de l'éprouvette en compression

A, A' : Coefficient admis d'après le tableau selon les propriétés et la qualité des matériaux

ACI : American Concrete Institute (Guide pour le Traitement du Béton)

AFNOR : Association Française de Normalisation

Arch: Architecte

ASTM: American Society for Testing and Materials. (Société Américaine pour les Essais et les Matériaux)

BSI : British Standards Institution

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

C : Compacité

CEN : Comité Européen de Normalisation

Cm^2 : Centimètre au carré

Dr : Docteur

E/C : Eau sur Ciment

E.N.S : Ecole Normale Supérieure

E.S : Equivalent de Sable

e : Indice des vides

EN : European Norm (Norme Européenne)

F= charge maximale à la rupture

FSI : Faculté des Sciences de l'Ingénieur

$\frac{G}{\gamma g}$: Volume des graviers (pierres concassées)

g : Gramme

IGH : Immeuble de Grande Hauteur

Ir : Ingénieur

ISSA : Institut Supérieur des Sciences Appliquées

Kg: Kilogramme

KN: Kilonewton

L: Litre

LA : Los Angeles

OBUHA/DEL : OBUHA/Département des Etudes et Laboratoire

LAUTECH: Ladoke Akintola University of Technology

M0 : Masse humide des graviers

M1 : Masse sèche des graviers

MDE : Micro-Deval

MF : Module de Finesse

M_{GS} : Masse brute des graviers +saletés

Min : Minutes

MPa : Méga pascal

MSc : Maître des Sciences

M_S : Masse des saletés

M³ : Mètre au cube

N : Normale

NF-EN : Norme Française Européenne

n : Porosité

OBUHA : Office Burundais de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction.

ODD : Objectifs de Développement Durable

OMD : Objectifs du Millénaire (mondiaux) pour le Développement

P : Porosité

P_g : porosité des graviers (pierres roulées et concassées)

$pg \cdot \frac{G}{\gamma g}$: Volume des vides

R : Rapide

R_b : Classe du béton

R_C : Résistance à la compression du béton

RN : Route Nationale

Sec : Seconde

W/C : Eau sur Ciment

α: Coefficient d'écartement des grains ou coefficient d'excès de mortier

γ_s : Densité

Φ_{max} : Diamètre Maximal

ρ_a : Masse volumique absolue

ρ_{app} : Masse volumique apparente

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Tableau des classes des résistances et vitesses de développement du ciment	9
Tableau 2: Utilisations des classes de résistance du ciment selon la norme EN 197-1	10
Tableau 3: Coefficient admissible selon les propriétés et la qualité des matériaux	38
Tableau 4: Fluidité des bétons frais (Abrams, 1958)	39
Tableau 5: Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton (BERNIER, 2014)	40
Tableau 6: Valeurs du coefficient α en fonction des dosages en eau dans les bétons (BERNIER, 2014).....	41
Tableau 7: Résultats d'essais LOS ANGELES.....	52
Tableau 8: Tableau des résultats d'essais Micro-DEVAL	54
Tableau 9: Résultats d'analyses granulométriques	55
Tableau 10: Tableau des résultats des essais de laboratoire caractéristiques des granulats utilisés	67
Tableau 11: Tableau de choix du coefficient d'écartement α	69
Tableau 12: Composition de mélange pour 9 éprouvettes cubiques d'un béton ordinaire	73
Tableau 13: Valeurs limites d'acceptation de l'essai Los Angeles	79
Tableau 14: Valeurs limites d'acceptation selon le coefficient de l'essai MDE.....	79
Tableau 15: Valeurs moyennes de module de finesse du sable selon ASTM C33(2016), Brooks & Neville (2010), Mehta & Monteiro (2014), Mindess et al. (2003)	80
Tableau 16: Interprétation des valeurs de l'équivalent de sable	81
Tableau 17: Synthèse des valeurs moyennes usuelles des densités apparentes et absolues pour les granulats tamisés et granulats non tamisés selon ASM International. (2012) et Ibearugbulem, O.M. (2019).....	82
Tableau 18: Tableau des valeurs moyennes du coefficient d'aplatissement et de l'indice des vides	83
Tableau 19: Valeurs moyennes de Compacité et d'indice des vides	84
Tableau 20: Résistances moyennes à la compression du béton ordinaire selon ACI (2019), Neville, A.M. (2011) ; Mendes, S, young, J.F., & Darwin. (2003)	86
Tableau 21: Comparaison des résistances à la compression du béton (7 ; 14 et 28 jours de cure) (MPa).....	88

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Photos montrant comment se déroulent les travaux de bétonnage sur quelques chantiers en ville de Bujumbura.	3
Figure 2: Prélèvements d'échantillons dans la rivière Ntakangwa à Bujumbura.	46
Figure 3: Photos de réalisation de l'essai Los Angeles	51
Figure 4: Photos de réalisation de l'essai Micro-Deval	53
Figure 5: Photos de réalisation de l'Analyse granulométrique des graviers	54
Figure 6: Photos de réalisation de l'essai d'équivalent de sable	58
Figure 7: Photos de réalisation de l'essai de densité apparente des granulats	60
Figure 8: Photos de réalisation de l'essai de densité absolue des granulats.....	62
Figure 9: Photos de réalisation de l'essai de porosité des granulats	64
Figure 10: Photos de réalisation des essais de compression des éprouvettes en béton	75

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
RESUME.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
0. Introduction	1
1. Contexte et justification du sujet.....	1
2. Problématique.....	3
3. Objectifs du travail	4
3.1. Objectif Général	4
3.2. Objectifs spécifiques	4
4. Intérêt et motivation du choix du sujet.....	4
4.1. Intérêt du sujet.....	4
4.2. Motivation du choix du sujet.....	4
5. Méthodologie de recherche	5
6. Délimitation du sujet	6
7. Articulations du travail.....	6
8. Hypothèse de recherche	6
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE BÉTON ET LES	
GRANULATS.....	7
1.1 Introduction	7
1.2 Définition et historique du béton.....	7
1.2.1 Définition du béton.....	7
1.2.2. Historique du béton	7
1.3. Constituants du béton	8
1.3.1. Le ciment.....	8
1.3.2. L'eau de gâchage.....	11
1.3.3. Dosage.....	12
1.3.4. Les granulats (sable + graviers)	13
1.3.5. Adjuvants	15
1.4. Types de béton	16

1.4.1. Béton ordinaire	16
1.4.2. Béton de masse	16
1.4.3. Béton armé	16
1.4.4. Béton précontraint	17
1.4.5. Béton post-contraint	17
1.4.6. Béton léger ou béton allégé	17
1.4.7. Béton lourd	18
1.4.8. Béton projeté ou béton pompé	18
1.4.9. Béton réfractaire	18
1.4.10. Béton autoplaçant (BAP)	18
1.4.11. Béton à haute performance (BHP)	18
1.4.12. Béton fibré	18
1.5. Propriétés du béton frais et durci	19
1.5.1. Propriétés du béton frais	19
1.5.2. Propriétés du béton durci	20
1.6. Cure du béton	21
1.6.1. Définition	21
1.6.2. Objectifs de la cure	21
1.6.3. Méthodes de cure	21
1.6.4. Durée de la cure	22
1.6.5. Conséquences d'une cure insuffisante	22
1.7. Importance des granulats dans le béton	22
1.7.1. Classification des granulats	23
1.7.2. Propriétés physiques des granulats	23
1.7.3. Influence des granulats sur la résistance du béton	23
1.7.4. Effet de la granulométrie sur la compacité et la résistance du béton	24
1.8. Normes relatives aux matériaux du béton	24
1.9. Conclusion	24
CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU TAMISAGE DES GRANULATS SUR LA	
RESISTANCE DU BETON	25
2.1. Introduction	25
2.2. Définition et importance du tamisage des granulats	25
2.2.1. Définition du tamisage des granulats	25
2.2.2. Importance du tamisage des granulats	25
2.3. Objectifs du tamisage	26
2.3.1. Homogénéité granulométrique	26
2.3.2. Propreté	26

2.3.3. Compacité.....	26
2.4. Méthodes de tamisage	26
2.4.1. Tamisage à sec	26
2.4.2. Tamisage humide	26
2.4.3. Tamisage mécanique vs manuel.....	26
2.5. Analyse granulométrique	27
2.5.1. Courbe granulométrique.....	27
2.5.2. Module de finesse (MF)	27
2.5.3. Distribution des tailles de particules – Granulométrie idéale	27
2.5.4. Classes des granulats	27
2.6. Effets du tamisage sur la qualité du béton.....	28
2.6.1. Uniformité et amélioration de la compacité.....	28
2.6.2. Réduction des vides.....	29
2.6.3. Réduction des impuretés	29
2.6.4. Impact du tamisage des granulats sur la durabilité du béton.....	29
2.6.5. Tamisage et classes des granulats sur la qualité du béton.....	29
2.7. Principaux essais de laboratoire sur les granulats complémentaires au tamisage.....	29
2.7.1. Que désignent les essais au laboratoire ?	29
2.7.2. Types d’essais de laboratoire complémentaires au tamisage des granulats	30
2.7.3. Importance des essais de laboratoire sur les granulats	36
2.8. Composition et formulation du béton.....	36
2.8.1. Composition du béton	36
2.8.2. Présentation de la méthode des VOLUMES ABSOLUS.....	38
2.8.3. Calculs de la méthode des VOLUMES ABSOLUS.....	42
2.9. Normes et recommandations relatives au tamisage des granulats	44
2.10. Conclusion.....	44
CHAPITRE 3 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE : CAS DES GRANULATS DE LA RIVIÈRE NTAHANGWA À BUJUMBURA	45
3.1 Introduction	45
3.2. Objectif de l’étude expérimentale	45
3.3. Origine et nature des matériaux	45
3.3.1. Granulats de la rivière Ntahangwa	45
3.3.2. Présentation du site d’échantillonnage : la rivière Ntahangwa	45
3.3.3. Choix du site d’échantillonnage	46
3.3.4. Défis et traitements spécifiques des granulats extraits de la rivière Ntahangwa	47
3.4. Les granulats non tamisés	48
3.4.1. Les granulats non tamisés	48

3.4.2. Méthodologie utilisée pour le prélèvement d'un échantillon.....	48
3.4.3. Étapes typiques du prélèvement :.....	48
3.5. Les granulats tamisés	49
3.5.1. Objectif du tamisage.....	49
3.5.2. Constitution d'un échantillon de tamisage	49
3.5.3. Processus de tamisage appliqué	50
3.6. Réalisation de différents essais au laboratoire des matériaux de construction à Kiriri (FSI&ISSA) et à l'OBUHA/Département des Etudes et Laboratoire.....	50
3.6.1. Essai Los Angeles	50
3.6.2. Essai Micro-Deval.....	52
3.6.3. Essai d'analyse granulométrique.....	54
3.6.4. Module de Finesse.....	57
3.6.5. Essai d'équivalent de sable	57
3.6.6. Caractéristiques physico-mécaniques des granulats	59
3.6.7. Classe des granulats	66
3.6.8. Autres matériaux	68
3.6.9. Application de la méthode des volumes absolus (méthode SCRAMTAIEV)	68
3.6.10. Formulation du béton	73
3.6.11. Méthodologie expérimentale.....	73
3.6.12. Essai de compression des éprouvettes en béton	74
3.7 Conclusion.....	77
CHAPITRE 4 : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS	78
4.1. Introduction	78
4.2. Analyse et interprétation des résultats d'essais Los Angeles et Micro-Déval	78
4.2.1. Résultats Los Angeles et Micro-Deval.....	78
4.2.2. Interprétation des Résultats Los Angeles	78
4.2.3. Interprétation des résultats Micro Deval	79
4.3. Résultats et analyse du module de finesse des granulats	80
4.3.1. Valeurs moyennes de module de finesse du sable	80
4.3.2. Analyse.....	80
4.4. Résultats de l'Equivalent de Sable	80
4.4.1. Interprétation des valeurs de l'équivalent de sable	81
4.5. Analyse et interprétation des résultats des densités apparentes et absolues des granulats.....	81
4.5.1. Résultats de densité apparente des graviers	81
4.5.2. Résultats de densité apparente pour le sable	81
4.5.3. Résultats de la densité absolue des graviers par pesée hydrostatique	82
4.5.4. Valeurs moyennes usuelles des densités apparentes et absolues pour les granulats tamisés et granulats non tamisés	82

4.6 Résultats du coefficient de forme (aplatissement) et d'élongation	83
4.6.1 Valeurs moyennes du coefficient d'aplatissement et d'élongation	83
4.6.2 Analyse des résultats pour le coefficient d'aplatissement et d'élongation.....	84
4.7 Résultats de Porosité et de propreté des granulats	84
4.7.1. Valeurs moyennes de Porosité et de la propreté des granulats	84
4.7.2 Analyse de résultats de porosité et de propreté des granulats	84
4.8 Résultats de Compacité, indice de vides et l'absorption d'eau	84
4.8.1. Compacité et indice des vides.	84
4.8.2. Interprétation des valeurs de l'indice des vides	85
4.8.3 Indice des vides et absorption d'eau	85
4.8.4. Interprétation des valeurs d'absorption d'eau	85
4.9. Analyse et interprétation des résultats des résistances à la compression des éprouvettes de béton après 7,14 et 28 jours de cure	85
4.9.1 Analyse des résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 7 jours de cure	85
4.9.2 Analyse des résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 14 jours de cure	85
4.9.3 Analyse des résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 28 jours de cure	86
4.9.4 Interprétation et discussion des résultats des résistances à la compression de béton après 7,14 et 28 jours de cure	86
4.9.5. Valeurs moyennes de résistance en fonction de l'âge du béton.....	86
4.9.6 Analyse comparative des résistances à la compression entre les deux types de béton (7 ; 14 et 28 jours de cure)	87
4.9.7 Interprétation des écarts observés	88
4.10. Influence du tamisage sur la résistance à la compression du béton	88
4.11. Impact du tamisage sur la performance mécanique	89
4.12. Discussion par rapport aux résultats de la littérature	89
4.13 Apports scientifiques et pratiques	89
4.14 Limites expérimentales de l'étude.....	89
4.15 Perspectives de recherche futures	90
4.16 Conclusion.....	90
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS	91
Conclusion générale	91
Suggestions.....	92
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	93
ANNEXES.....	A

RESUME

Ce mémoire porte sur l'analyse de l'influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton, en prenant pour cas d'étude les granulats de la rivière Ntakangwa à Bujumbura.

Le béton, matériau fondamental du génie civil, doit ses performances en grande partie aux caractéristiques de ses constituants, notamment la qualité des granulats. Dans cette étude, deux types de formulations ont été élaborés : l'une avec des granulats préalablement non tamisés et l'autre avec des granulats tamisés.

Les essais de compression réalisés ont montré que le tamisage améliore la compacité et l'homogénéité du mélange granulaire, ce qui conduit à une résistance à la compression plus élevée par rapport aux granulats non tamisés.

Ces résultats confirment l'importance du contrôle granulométrique dans la formulation des bétons et ouvrent des perspectives pour optimiser la durabilité, la qualité des matériaux locaux et des ouvrages de génie civil dans les projets de construction.

En définitive, cette recherche confirme que le tamisage ne doit pas être considéré uniquement comme une opération préliminaire, mais bien comme un paramètre clé de la formulation des bétons, influençant directement la maniabilité à l'état frais ainsi que la résistance et la durabilité à long terme.

Mots-clés : Béton, Granulats, Tamisage, Granulométrie, Résistance à la compression.

ABSTRACT

This thesis investigates the influence of aggregate sieving on concrete strength, using aggregates from the Ntakangwa River in Bujumbura as a case study. Concrete, as a fundamental construction material, derives much of its performance from the properties of its constituents, particularly the quality of aggregates.

The compressive strength tests revealed that sieving improves the compactness and homogeneity of the granular mixture, resulting in higher compressive strength compared to unsieved aggregates. In addition, slump and compressive strength tests highlighted the decisive role of particle size distribution in determining both the workability and the mechanical performance of concrete.

These findings highlight the significance of particle size control in concrete mix design and provide insights to improve the durability, the quality of local materials and civil engineering structures in construction projects.

Overall, this research provides strong evidence that aggregate sieving should not be considered merely as a preliminary step, but rather as a key parameter in concrete mix design, directly influencing both the fresh properties and the long-term strength of the material.

Keywords: Concrete, Aggregates, Sieving, Particle size distribution, Compressive strength.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0. Introduction

Le béton est, de nos jours, le matériau de construction le plus utilisé au monde, tant dans les infrastructures que dans le bâtiment. Sa popularité s'explique par ses nombreux avantages : facilité de mise en œuvre, coût raisonnable, durabilité, résistance mécanique et adaptabilité à divers environnements. Toutefois, la performance du béton dépend des propriétés de ses constituants, les granulats qui en représentent jusqu'à plus de 75 % en volume (Neville, 2010). Parmi les aspects techniques influençant la qualité du béton, la granulométrie des granulats est primordiale. Le tamisage est une opération essentielle pour contrôler cette granulométrie et assurer une bonne répartition des particules. Or, dans de nombreuses régions en développement comme le Burundi, les granulats sont souvent utilisés directement après extraction dans des rivières, sans tamisage rigoureux. Cette pratique pourrait compromettre la performance mécanique du béton, notamment sa résistance à la compression, une propriété clé pour l'évaluation de la durabilité et de la sécurité des ouvrages.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique. Il vise à étudier l'influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton, en prenant comme cas d'étude les granulats extraits de la rivière Ntakangwa à Bujumbura. L'étude repose sur une série d'essais expérimentaux réalisés sur 18 éprouvettes de béton soumises à des essais de compression après 7, 14 et 28 jours de cure. L'objectif est de comparer les performances mécaniques du béton élaboré avec des granulats non tamisés à celles du béton fabriqué avec des granulats tamisés.

Ce travail est structuré en quatre chapitres : une revue de la littérature sur le béton et les granulats, l'influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton, une étude expérimentale et une analyse et discussion des résultats.

1. Contexte et justification du sujet

Après la deuxième guerre mondiale ; la paix retrouvée et l'intensification des échanges économiques mais aussi la mondialisation et la globalisation de manière de pensée, de vivre et d'être ont poussé à son paroxysme le mouvement urbain dans le monde (Cours d'architecture II). Avec ce mouvement de la mondialisation et de la décolonisation qui naquit vers les années 1960, on a vu les villes Européennes se remplir considérablement suite au retour des colons et les villes africaines devenir surpeuplées à cause de l'intensification de l'exode rural.

En plus de ces tendances issues de la mondialisation, on a assisté à l'émergence de stratégies des grandes villes pour attirer le plus grand nombre de capitaux et de personnes. Dans les faits, la ville est perçue comme un système qui pompe les richesses en faveur des personnes qui l'habitent ou de la campagne, mais elle peut aussi être considérée comme un puissant poumon de développement du territoire environnant. (Cours d'architecture II)

Les villes sont donc entrées dans une compétition sans précédente. Les plus innovantes ont vu leurs populations augmenter et les volumes de leurs capitaux s'accumuler sensiblement. C'est ainsi qu'on a eu droit à de grandes mégapoles (villes de très grande taille constituée par une

suite de petites villes qui se sont développées et qui ont fini par se toucher) avec le plus souvent leurs villes satellites.

Dans cette perspective, la construction des immeubles de grande hauteur (IGH) pour lesquels s'appliquait une législation particulière dans différents domaines s'avérait nécessaire pour faire face à la gestion des espaces disponibles et résoudre le problème de logements du nombre croissant des populations dans ces grandes villes. (Cours d'introduction à l'urbanisme)

Au Burundi, les difficultés liées aux logements et l'accès à la parcelle persistent toujours bien qu'il se remarque l'intensification actuelle des principales villes du pays dont Bujumbura en particulier, qui réduit sensiblement les terres cultivables. Sachant que la superficie du territoire national ne dépasse pas $27\,834\text{ km}^2$ et que les lacs à eux seuls occupent 2000 km^2 sans compter celle occupée par les rivières et les terrains accidentés, la rareté des terres se fait de plus en plus sentir dans notre pays.

Ainsi, il est certain que pour palier à ces problèmes ci-haut cités, une solution efficace que notre pays devrait donc faire sienne est la Construction en Hauteur à l'instar des autres grandes villes. Ceci réduirait des distances tout en permettant au plus grand nombre de personnes de profiter des réseaux urbains. Cette construction des IGH garantirait ensuite une bonne maîtrise de la croissance urbaine, une promotion de qualité à travers le personnel qualifié intervenant dans le cadre de grands projets, un habitat adapté à l'évolution des foyers et des personnes à travers le temps et enfin la promotion de l'investissement libéré par le fait que les structures appropriées seront déjà en place pour s'occuper de la question de logements (Cours d'architecture II).

Or les parties Infrastructures (les fondations, les Chaussées, les ponts, les ports, les aéroports, les barrages, les tunnels) ainsi que les Superstructures des ouvrages de cette envergure exigent une mise en œuvre minutieuse de différents éléments de structure en béton notamment : les radiers, les semelles de fondations, les colonnes, les pieux, les poutres et les poteaux, les chainages, les dalles les escaliers, ainsi que les voiles à la négligence desquels, les tours à usage résidentiel, public (bureaux, hôpitaux, écoles), à usage d'hôtels ou autre seraient hautement instables et délibérément exposés à des ruines totales.

C'est pour cette raison que le besoin en béton s'est aujourd'hui multiplié considérablement dans le monde entier par le fait que la mise en place de tous ces éléments participant au corps de structures des IGH en demande énormément.

Etant donné alors que le béton est un matériau de construction essentiel au niveau de bâtiments modernes en raison de sa résistance, sa durabilité et sa disponibilité dans le monde et que les granulats constituent l'un de ses composants principaux représentant environ 60 à 80 % de son volume ; Il est important que ces granulats ainsi utilisés dans la confection du béton aient une granulométrie spécifique pour garantir une bonne compacité et résistance.

La qualité et la distribution granulométrique des granulats influencent significativement les propriétés mécaniques du béton. Le tamisage, qui permet de classer les granulats selon leur taille, joue un rôle crucial dans la formulation la qualité et la performance du béton. Or dans notre pays qu'est le Burundi, le tamisage des granulats est presque inexistant ou effectué de manière artisanale, ce qui peut entraîner une granulométrie inadéquate c'est à dire irrégulière.

2. Problématique

On sait que la résistance du béton dépend en partie de la qualité des granulats et de leur répartition granulométrique. La négligence de tamisage des granulats est fort remarquable dans différents travaux de bétonnage sur les chantiers locaux au Burundi, ce qui nous pousse à nous interroger si cela ne peut pas affecter négativement les performances physico-mécaniques du béton produit. C'est par là qu'une question de recherche suivante s'impose : « Comment alors le tamisage des granulats influe-t-il sur la résistance du béton, notamment sa résistance à la compression » ?

Dans ce contexte, une analyse du problème sera effectuée sur quelques chantiers en cours à Bujumbura.



Granulats utilisés dans les activités de bétonnage, Rue n^o 2, Kamenge
Photo du 03/04/2025



Activités de gâchage du béton à Kamenge, Rue n^o 2, Kamenge
Photo du 05/05/2025



Coulage du béton, Rue n^o 2 à Kamenge
Photo du 26/05/2025



Gâchage et coulage du béton, Rue n^o 10 à Bwiza
Photo du 10/06/2025

Figure 1: Photos montrant comment se déroulent les travaux de bétonnage sur quelques chantiers en ville de Bujumbura.

« Source : photos prises par l'auteur ».

3. Objectifs du travail

3.1. Objectif Général

L'objectif général de notre travail est d'étudier l'influence du tamisage des granulats sur la résistance mécanique du béton.

3.2. Objectifs spécifiques

Comme objectifs spécifiques il s'agit d'abord de :

- 1⁰) Déterminer la granulométrie des granulats non tamisés et tamisés de la rivière Ntakangwa.
- 2⁰) Comparer les résultats des essais de laboratoire sur les caractéristiques des granulats selon qu'ils soient tamisés ou non.
- 3⁰) Evaluer l'influence du tamisage sur la résistance à la compression après 7,14, et 28 jours de cure entre les bétons élaborés avec les granulats non tamisés et tamisés.
- 4⁰) Analyser les différences de performances entre les deux catégories de bétons.

4. Intérêt et motivation du choix du sujet

4.1. Intérêt du sujet

Ce sujet est d'un grand intérêt dans le contexte actuel où la qualité des matériaux de construction est une priorité pour assurer la durabilité des ouvrages. Comprendre l'influence du tamisage permet non seulement d'optimiser les formulations de béton, mais aussi de réduire les coûts liés aux essais empiriques et aux réparations dues à une mauvaise résistance. Il est également pertinent pour les entreprises locales de BTP qui utilisent des granulats naturels ou concassés dont la granulométrie varie.

4.2. Motivation du choix du sujet

Le choix de notre sujet a été motivé par la vision 2040-2060 pour notre pays d'avoir un pays émergeant en 2040 et développé jusqu'en 2060 mais aussi en suivant la logique des Objectifs de Développement Durable (ODD) qui ont remplacé les OMD (Objectifs du Millénaire pour le Développement).

Concernant la vision 2040-2060 ; trois objectifs parmi les 22 objectifs recouvrant les cinq piliers fondamentaux de ladite vision nous ont motivé. Il s'agit de l'objectif n⁰5 : améliorer les infrastructures de logistiques et l'accessibilité de toutes les zones ; puis l'objectif n⁰18 : améliorer l'accès durable à l'eau potable, à l'hygiène et à l'assainissement adéquat ; et l'objectif n⁰19 : Intensifier l'urbanisation et promouvoir les logements décents. Selon cet objectif n⁰19, des progrès sont remarquables en termes d'agrandissement des centres urbains mais des efforts importants restent à fournir en termes d'intensification de l'urbanisation/ villes secondaires pour désengorger le monde rural et réduire la pression sur le foncier agricole. Ce processus devra s'accompagner par l'application de normes et d'exigences d'urbanisation existants pour réduire la proportion de la population urbaine vivant dans des bidonvilles, des établissements informels ou des logements inadéquats. Des efforts devront également être consentis pour l'aménagement d'espaces de loisirs.

Le choix de ce sujet a aussi été motivé par les objectifs de développement durable (ODD) entre autres ODD n^o6 : eau propre et assainissement ; ODD n^o9 : Industrie, innovation et infrastructures et ODD n^o11 : villes et communautés durables, qui vise à faire en sorte que les villes deviennent inclusives, sûres, résilientes et durables. Celui-ci est essentiel pour maintenir la qualité de vie en ville, gérer l'urbanisation rapide et protéger l'environnement urbain.

Ces objectifs de la vision 2040-2060 de notre pays dans la logique des ODD ne peuvent cependant pas être atteints si jamais on ne réussit pas la mise en place des infrastructures modernes, la construction en hauteur des bâtiments tant publics que privés susceptibles de résoudre le problème de logement pour les générations futures, en plus des systèmes d'alimentation ou d'assainissement en eaux etc.

En suivant les exigences de l'industrie du bâtiment et des travaux publics, le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé. Le béton qui se définit comme une pierre artificielle faite à partir du mélange de sable ciment, gravier, eau et éventuellement des adjuvants est un matériau de construction essentiel dans la confection des éléments de la structure (Harris, 2006). Ces éléments sont souvent les poutres, les poteaux, les semelles de fondation, les radiers, les dalles et les escaliers, les paillasse, les chaînages ainsi que les voiles.

La qualité de ses constituants, notamment les granulats, joue un rôle essentiel dans sa performance mécanique. En plus selon (Dupont, 2018), le tamisage permet de contrôler la granulométrie des granulats, ce qui influence directement la compacité, la maniabilité et la résistance du béton en ce sens qu'il élimine les impuretés, assure l'économie des matériaux, fait l'optimisation de la résistance mécanique et la réduction du risque de fissuration. Or ce sont tous ces éléments qui permettent d'améliorer la qualité, la durabilité ainsi que les propriétés mécaniques du béton. La nécessité de produire des bétons performants m'a poussé à choisir ce sujet.

5. Méthodologie de recherche

Pour développer notre sujet ; nous avons procédé à la démarche suivante :

- Revue bibliographique sur les granulats et la résistance du béton.
- Récolte des échantillons (Sable et Gravier) de la rivière Ntahangwa
- Tamisage pour obtenir différentes classes granulométriques.
- Réalisation des essais : Los Angeles, Micro-Déval, de porosité, densité, équivalent de sable, etc. au laboratoire de la FSI et OBUHA/DEL pour caractériser les granulats utilisés.
- Formulation et confection des éprouvettes de béton d'une part en utilisant les granulats non tamisés puis avec les granulats tamisés d'autre part.
- Evaluation de la résistance avec essais de compression des éprouvettes du béton après 7 puis 14 et 28 jours de cure au laboratoire de la FSI et ISSA à KIRIRI.
- Analyse et interprétation des résultats obtenus.

6. Délimitation du sujet

Lors de l'évaluation de la résistance du béton, on tient compte de pas mal de facteurs qui l'influencent notamment la qualité des matériaux constitutifs (la provenance), l'âge du béton, les conditions de cure, l'hétérogénéité, les facteurs environnementaux (température, humidité, etc.). Nous avons, comme matériaux considéré seulement les granulats de la rivière Ntakangwa, or l'idéal serait d'effectuer des essais sur les granulats provenant de tous les gisements du territoire national ; ce qui serait un travail très long et fastidieux mais, faute de temps et des moyens financiers qu'imposeraient ces derniers, c'est pourquoi nous nous sommes limités aux granulats de la rivière NTAHANGWA. Notre travail se limite uniquement à l'étude de la résistance à la compression du béton ordinaire, en utilisant des granulats naturels. Aucune variation de dosage ou d'adjuvants n'a été testée. Il ne prend pas en compte les effets chimiques, traction, module d'élasticité, la durabilité à long terme ni d'autres types de béton (fibré, auto plaçant, etc.)

7. Articulations du travail

Le présent travail est subdivisé en quatre chapitres à savoir :

- Le premier chapitre est consacré à la Revue de la littérature sur le béton et les granulats.
- Le deuxième chapitre démontre l'Influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton.
- Le troisième chapitre porte sur une Étude Expérimentale : Cas des granulats de la rivière Ntakangwa à Bujumbura.
- Le quatrième chapitre fait l'objet de l'Analyse et Discussion des résultats.

8. Hypothèse de recherche

On suppose que le tamisage des granulats contribue à améliorer la résistance à la compression du béton, en permettant une meilleure compacité et une réduction des impuretés. Cette hypothèse sera validée ou invalidée dans le chapitre 4, qui analyse et discute les résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE BÉTON ET LES GRANULATS

1.1 Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde grâce à ses nombreuses qualités telles que la résistance, la durabilité et la facilité de mise en œuvre (Neville, A.M.,2012). Toutefois, ses performances dépendent fortement des propriétés de ses constituants, notamment les granulats, qui représentent environ 60 à 75 % du volume du béton (Neville, A., 2011). L'une des méthodes essentielles pour contrôler les caractéristiques des granulats est le tamisage, permettant de classer et de maîtriser leur distribution granulométrique, élément crucial pour optimiser la résistance mécanique du béton.

1.2 Définition et historique du béton

1.2.1 Définition du béton

Le béton est un matériau de construction composite constitué essentiellement d'un liant (généralement du ciment), avec des granulats (sables et graviers), d'eau et éventuellement d'adjuvants visant à modifier certaines propriétés (Mindess, 2003). Après malaxage, le mélange de ces composants, suivi de la prise et du durcissement, forme une roche artificielle aux propriétés mécaniques élevées. Sa formulation peut varier selon les exigences techniques du projet (Neville A., 2012). Selon (Aitcin, 2000), "la qualité du béton est en grande partie déterminée par la qualité et la proportion de ses constituants".

1.2.2. Historique du béton

Le béton est un matériau de construction utilisé depuis l'Antiquité. Les premières formes de béton remontent à plus de 2000 ans, utilisées par les Égyptiens et les Mésopotamiens c'est-à-dire les Babyloniens sous forme de mélanges de boue et de paille, de chaux et de sable pour ériger des structures rudimentaires (Mamlouk, 2017). Cependant, ce sont les Romains qui ont véritablement développé une forme avancée de béton hydraulique, notamment grâce à l'usage de la pouzzolane, une cendre volcanique qui conférait au mélange une capacité de durcissement sous l'eau. Des monuments emblématiques tels que le Panthéon de Rome ou les aqueducs témoignent encore de leur savoir-faire (Neville A. M., 1996).

Après la chute de l'Empire romain, la technologie du béton a été largement oubliée en Europe jusqu'à sa redécouverte au XIX^e siècle. L'invention du ciment Portland par Joseph Aspdin en 1824 marque un tournant majeur. Ce ciment, plus résistant et stable, devient la base du béton moderne (Lea, 2004). Plus tard, l'introduction du béton armé par Joseph Monier vers 1850 permet de pallier la faiblesse du béton en traction et ouvre la voie à une utilisation structurelle massive.

De nos jours, le béton est un matériau indispensable dans les constructions modernes, avec des recherches continues visant à améliorer ses performances mécaniques, sa durabilité, son impact environnemental (Mehta, 2014). Dans ce contexte, l'étude des caractéristiques des granulats, et notamment du tamisage, est essentielle pour optimiser la résistance du béton.

1.3. Constituants du béton

1.3.1. Le ciment

1.3.1.1. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière pulvérulente qui, en présence d'eau, forme une pâte capable de durcir et de conserver sa résistance même sous l'eau. Il est principalement composé de silicates et d'aluminates de calcium, et constitue l'un des éléments fondamentaux du béton (Neville A. M., 2011,2012). Lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, des granulats et éventuellement des adjuvants, il forme une pâte qui enrobe les granulats et assure la cohésion du béton.

Selon la norme EN 197-1, le ciment est défini comme un produit finement broyé, qui, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui prend et durcit par réactions et processus d'hydratation (CEN, 2011).

1.3.1.2. Étapes de production du ciment

La fabrication du ciment suit plusieurs étapes clés

1^o Extraction des matières premières

Les principales matières premières sont le calcaire (source de CaO) et l'argile (source de SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃). Elles sont extraites de carrières à ciel ouvert (Taylor, 1997).

➤ 2^o Broyage et homogénéisation

Les matériaux extraits sont broyés et mélangés de manière homogène pour obtenir une composition chimique stable, appelée « farine crue » (Mehta P. M., 2014).

➤ 3^o Cuisson dans le four

La farine crue est introduite dans un four rotatif à une température atteignant environ 1450 °C. Cela permet la formation du clinker, composé principalement de silicates de calcium (Alonso, 2001).

➤ 4^o Refroidissement et broyage du clinker

Le clinker est ensuite refroidi puis broyé avec environ 5 % de gypse (CaSO₄·2H₂O), qui régule le temps de prise. Ce broyage final donne le ciment (Neville A. M., Properties of Concrete (5th ed.), 2012).

➤ 5^o Stockage et expédition

Le ciment est stocké dans des silos avant d'être ensaché ou livré en vrac aux utilisateurs.

1.3.1.3. Propriétés du ciment

Les principales propriétés du ciment sont :

La finesse : Plus le ciment est fin, plus il est réactif, ce qui influence la vitesse de prise et la résistance mécanique (Neville A. M. , 2012).

Le temps de prise : Temps nécessaire pour que la pâte commence à durcir, influencé par les conditions climatiques et la composition du ciment.

La résistance mécanique : Le ciment doit atteindre certaines résistances normalisées à 2, 7 et 28 jours (CEN, Cement-Part1, 2011).

La stabilité de volume : Le ciment ne doit pas se dilater excessivement après sa prise.

Ces propriétés influencent directement la qualité du béton, notamment sa résistance à la compression et sa durabilité (Mindess S. Y., 2003).

1.3.1.4. Classes de résistance du ciment

Les classes de résistance du ciment correspondent à des valeurs normalisées qui indiquent la résistance mécanique à la compression que le ciment peut atteindre après un certain nombre de jours de durcissement, généralement 2 jours et 28 jours. Ces classes sont définies selon les normes EN 197-1 (norme européenne) ou NF P 15-301 (France), et elles permettent de classer les ciments selon leur performance.

Classes de résistance du ciment selon (197-1, 28 Fevrier, 2019)

Il existe trois classes principales de résistance du ciment mesurées à 28 jours :

Tableau 1: Tableau des classes des résistances et vitesses de développement du ciment

Classe	Résistance minimale MPa à 28 jours	Résistance maximale MPa à 28 jours	Vitesse de développement résistance
32,5	≥ 32,55 MPa	< 52,5 MPa	Normale ou lente
42,5	≥ 42,55 MPa	< 62,5MPa	Normale ou rapide
52,5	≥ 52,55 MPa	-	Normale ou rapide

« Source : EN 197-1, (2019) ».

1.3.1.4. a) Sous-classes : N et R

Chaque classe est souvent complétée par une lettre qui indique la vitesse de prise (développement de résistance initiale) :

N : Développement normal (ex. : CEM I 42,5 N)

R : Développement rapide (ex. : CEM I 42,5 R)

Exemple :

Un ciment de classe CEM I 42,5 R atteint au moins 42,5 MPa à 28 jours, avec une résistance élevée dès les premières 48 heures.

1.3.1.4.b) Utilisations pratiques selon les classes de résistance du ciment

Classe	Utilisation typique
32,5	Travaux courants, maçonnerie, chapes
42,5	Béton armé, fondations, dalles
52,5	Ouvrages en béton haute performance, préfabrication, routes

Tableau 2: Utilisations des classes de résistance du ciment selon la norme EN 197-1

Classe de résistance	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)	Vitesse de développement	Exemples d'utilisation
32,5 N	$\geq 32,55$	$< 52,5$	Normale ou Lente	Maçonnerie, chapes, petits ouvrages
32,5 R	$\geq 32,55$	$< 52,5$	Rapide	Travaux en climat froid, bétonnage rapide
42,5 N	$\geq 42,55$	$< 62,5$	Normale	Fondations, dalles, béton armé
42,5 R	$\geq 42,55$	$< 62,5$	Rapide	Préfabrication, coffrages rapides
52,5 N	$\geq 52,55$	—	Normale	Ouvrages d'art, structures fortement sollicitées
52,5 R	$\geq 52,55$	—	Rapide	Béton à très haute performance, routes

« Source : EN 197-1, (2019) ».

1.3.1.5. Types de ciment

Selon (Monteiro, 2005), il existe plusieurs types de ciments utilisés dans la construction, dont les plus courants sont :

- Ciment Portland (CEM I) ou *Le ciment portland artificiel (C.P.A)* : Composé majoritairement de clinker *au moins 97%*, le reste étant du filler ; il est utilisé pour la majorité des ouvrages en béton.
- Ciment Portland composé (CEM II) ou *Le ciment portland composé (C.P.J)* qui contient *au moins 65% du clinker et 35% du laitier* ; c'est-à-dire Contient du clinker et d'autres constituants comme des cendres volantes ou des laitiers.
- Ciment à haute résistance initiale ou *Le ciment de haut-fourneau (C.H.F)* qui contient *entre 60 et 75% de laitier* : Utilisé lorsqu'un décoffrage rapide est nécessaire.
- Ciment à faible chaleur d'hydratation ou *Le ciment de laitier au clinker (C.L.K)* qui contient *au moins 80% de laitier* : Adapté aux ouvrages massifs pour limiter les fissurations thermiques.

Chaque type de ciment répond à des conditions d'usage particulières selon sa composition chimique et sa finesse de mouture (Monteiro, 2014).

1.3.1.6. Sortes de liants

Le liant est l'élément actif du béton qui permet l'agglomération des constituants. On distingue :

➤ 1^o Liants hydrauliques

Ils durcissent au contact de l'eau, même sous l'eau. Ce sont les plus utilisés dans la construction. Ciment Portland : le plus courant, durcit par hydratation du clinker (CEN, 2011).

Chaux hydraulique : utilisée dans les mortiers traditionnels ou le béton de chanvre.

Laitiers de haut fourneau : sous-produit sidérurgique utilisé comme liant secondaire.

« Les liants hydrauliques permettent une prise et un durcissement dans des conditions humides ou subaquatiques. » (Mehta & Monteiro, 2014, p. 83)

➤ 2^o Liants aériens

Ils durcissent uniquement à l'air par carbonatation. Moins résistants, ils sont réservés aux mortiers de finition.

Chaux aérienne ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Plâtre (gypse déshydraté)

➤ 3^o liants alternatifs / écologiques

Liants géopolymères : à base de métakaolin ou de cendres volantes activés alcalinement.

Ciments sulfo-alumineux : faible émission de CO_2 , prise rapide.

Ces liants visent à réduire l'empreinte carbone du béton (Alonso & Palomo, 2001).

1.3.2. L'eau de gâchage

1.3.2.1. Qualité de l'eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'eau utilisée pour le mélange du béton. Elle joue un rôle crucial dans les réactions d'hydratation du ciment, le développement des résistances mécaniques et la maniabilité du béton frais.

L'eau de gâchage doit être propre, exempte de matières organiques, d'huiles, d'acides, de bases ou de sels susceptibles d'affecter la prise ou la durabilité du béton. En règle générale, toute eau potable est considérée comme convenable pour la fabrication du béton (Neville, 2012).

Selon la norme NF EN 1008 (CEN, 2002), les eaux usées industrielles ou les eaux recyclées peuvent être utilisées à condition de respecter certains seuils en termes de pH, de chlorures, de sulfates, et de matières en suspension. Un pH compris entre 4 et 12,5 est acceptable, à condition que l'eau n'affecte pas le durcissement et la résistance du béton.

« Une eau propre et potable est généralement acceptable comme eau de gâchage pour les bétons. » (Mehta & Monteiro, 2014, p.91)

1.3.2.2. Quantité de l'eau de gâchage

Le rapport eau/ciment (E/C) est un facteur essentiel qui influence directement la résistance mécanique et la durabilité du béton.

Un rapport E/C faible (0,35–0,50) produit un béton à haute résistance mais moins maniable.

Un rapport E/C élevé (> 0,60) donne un béton plus fluide mais réduit la résistance et augmente la porosité.

Pour les bétons courants, un rapport E/C entre 0,45 et 0,60 est généralement utilisé, selon les exigences de résistance et de maniabilité (Mindess, Young & Darwin, 2003).

La quantité d'eau est donc ajustée en fonction : du type de ciment, du taux d'humidité des granulats, de la consistance souhaitée (mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams), et des adjuvants éventuels (plastifiants, superplastifiants).

« Le rapport eau-ciment est le paramètre le plus influent sur la résistance à la compression du béton. » (Neville, 2012, p. 206)

1.3.3. Dosage

1.3.3.1. Usage

Le dosage sert à déterminer les proportions de ciment, d'eau et des granulats éventuels devant entrer dans la composition d' 1m^3 de béton dont certaines performances sont exigées.

1.3.3.2. Les objectifs essentiels

Les objectifs à atteindre sont :

- Le béton fraîchement malaxé est maniable,
- Le béton durci avec les propriétés voulus de résistance, de durabilité et d'apparence
- Le béton est économique

1.3.3.3. Les caractéristiques du dosage

Les caractéristiques du dosage sont :

- Savoir les dimensions et les formes des éléments en béton à fabriquer
- Savoir la résistance finale requise pour la structure
- Savoir les caractéristiques du ciment et des granulats
- Savoir les conditions d'exécution
- Savoir la densité, la teneur en eau et l'absorption des granulats
- Savoir le Module de finesse du sable

1.3.3.4. Les étapes de réalisation du dosage

Les étapes de la réalisation du dosage de l'essai sont :

- 1) *Choisir l'affaissement recommandé compte tenu de l'utilisation et de la mise en place.*
- 2) *Déterminer la dimension maximale du gros granulat compte tenu des dimensions de l'ouvrage à réaliser.*
- 3) *Déterminer le rapport $\frac{E}{C}$ en tenant compte de la résistance en compression à 28 jours recherchée et de la classe de résistance du ciment.*
- 4) *Déterminer le dosage en eau.*

- 5) Calculer la quantité de ciment à partir du dosage en eau et du rapport $\frac{E}{C}$
- 6) Vérifier la quantité de ciment calculée (prendre la quantité maximale du ciment)
- 7) Déterminer le module de finesse du sable
- 8) Déterminer la masse du gros granulat à utiliser ; volume du gros granulat en vrac suggéré par mètre cube de béton.

Masse du gros granulat $sss = x \cdot \rho_{sss}$ où x = valeur lue dans le tableau 4.6

- 9) Calculer les volumes des quantités de chacun des ingrédients déjà connu et en déduire le volume du sable à utiliser.

Volume du sable = $1m^3 - V_{eau} - V_{gravier} - V_{ciment}$

- 10) Calculer la masse du sable sss à utiliser : $B = V \times \rho_{sss}$

La masse volumique du béton frais (ρ en kg/m^3) = $\mu_E + \mu_C + \mu_G + \mu_S$

- 11) Calculer les proportions des granulats humides nécessaires dans les conditions d'humidité où il sera utilisé en employant la formule $H = B \left(1 + \frac{h}{100}\right)$

En déduire la quantité d'eau qui sera contenu dans les granulats que l'on utilisera et la soustraire de la quantité d'eau de gâchage.

- 12) Calculer la masse du béton nécessaire pour la gâché d'essai que l'on veut réaliser.

1.3.4. Les granulats (sable + graviers)

Les granulats sont des matériaux granuleux naturels ou artificiels, constitués de particules inertes de dimensions variées. Ils représentent environ 60 à 80 % du volume total du béton, ce qui leur confère un rôle capital dans les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau (Neville A. M., 2010). On distingue généralement deux types : le sable (granulat fin) et les graviers (granulats grossiers).

1.3.4.1. Le sable

Le sable est un granulat fin dont la taille des particules est comprise entre 0,063 mm et 4 mm selon la norme NF EN 933-1. Il est essentiel pour assurer le remplissage des vides entre les grains plus gros (graviers) et pour offrir une bonne ouvrabilité du béton frais.

Un bon sable pour béton doit être :

Propre, sans argile ni matières organiques (933-1, 2012)

Bien gradué, c'est-à-dire présentant une courbe granulométrique continue,

Sec ou à faible humidité, sauf en cas de dosage corrigé.

Un sable trop fin ou trop chargé en limon augmente la demande en eau du béton et affaiblit sa résistance finale (Mehta & Monteiro, 2014).

1.3.4.2. Les graviers

Les graviers sont les granulats dits gros, ayant des dimensions comprises entre 5 mm et 32 mm selon la norme NF EN 12620. Dans les bétons courants, la taille maximale des graviers est souvent de 20 mm.

Le rôle principal du gravier est de :

- Améliorer la résistance mécanique du béton,
- Réduire le retrait,
- Favoriser la compacité du squelette granulaire.

Des graviers anguleux et rugueux ou semi-arrondis sont préférables, car ils offrent un meilleur interlock mécanique avec la pâte de ciment, renforçant ainsi la performance mécanique du béton (Oluwasola, 2020). Cependant, les graviers roulés de rivière, comme ceux de Ntakangwa, sont appréciés pour leur maniabilité.

1.3.4.3. Rôle des granulats

Les granulats représentent environ 60 à 80 % du volume du béton et jouent un rôle fondamental dans sa composition. Ils assurent la résistance mécanique, limitent les retraits et améliorent la stabilité dimensionnelle du béton. Leur nature, forme, texture de surface leur taille et leur distribution granulométrique influencent fortement la maniabilité, la compacité et la durabilité du béton (Fédération Internationale du Béton fib, 2010 ; Neville, 2012 ; Mehta & Monteiro, 2014). « Les granulats ne sont pas de simples charges : ils participent activement à la performance du béton. » (Mindess, Young & Darwin, 2003, p. 187)

1.3.4.4. Critères de classification des granulats

Les granulats sont classés selon plusieurs critères :

Selon leur dimension :

Granulats fins : diamètre ≤ 4 mm (ex : sable)

Granulats gros : diamètre > 4 mm (ex : gravier, cailloux)

Selon leur origine :

Naturels : alluvionnaires (rivière, mer) ou concassés (roche)

Artificiels : produits par des procédés industriels (laitiers, argiles expansées)

Selon leur densité :

Normaux : 2,5–2,8 g/cm³ (béton ordinaire)

Légers : $< 2,0$ g/cm³ (béton allégé)

Lourds : $> 3,0$ g/cm³ (béton de protection contre les radiations)

1.3.4.5. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

Les principales caractéristiques des granulats sont :

- **Granulométrie** : distribution dimensionnelle, déterminée par tamisage, influence la compacité du béton (CEN, 2011).
- **Forme et texture** : les grains anguleux améliorent l'accrochage avec la pâte cimentaire, mais diminuent la maniabilité.
- **Propreté** : les impuretés (argile, matière organique) nuisent à l'adhérence et à la résistance (Neville, 2012).
- **Résistance à l'écrasement** : importante pour les granulats grossiers, mesurée par l'essai Los Angeles.
- **Absorption d'eau** : influe sur le dosage d'eau de gâchage.

Un bon granulat doit être dur, propre, stable chimiquement, et avoir une bonne affinité avec la pâte de ciment. Cela veut dire qu'il doit présenter une surface chimiquement compatible et suffisamment rugueuse pour assurer une adhésion intime avec la pâte de ciment, garantissant ainsi la cohésion du béton. Cette affinité améliore la résistance mécanique globale et limite la formation de zones de faiblesse à l'interface (Neville, A.M,2011).

1.3.5. Adjuvants

Les adjuvants sont des produits ajoutés en faible quantité (< 5 % du poids du ciment) pour modifier certaines propriétés du béton. Selon la norme EN 934-2 (CEN, .(2009). Adjuvants pour béton, mortier et coulis ; Adjuvants pour beton-Definition, exigences,conformité et marquage(EN 934-2), 2009), distingue les principaux types.

1.3.5.1. Principaux types d'adjuvants

- Plastifiants / Réducteurs d'eau : améliorent la maniabilité sans augmenter le rapport E/C.
- Superplastifiants : permettent un béton très fluide ou à haute performance.
- Retardateurs de prise : ralentissent le début de prise du béton, utiles par temps chaud ou pour les ouvrages massifs.
- Accélérateurs de prise/durcissement : favorisent la prise rapide, utiles en hiver ou pour décoffrage rapide.
- Incorporateurs d'air : améliorent la résistance au cycle gel/dégel.
- Hydrofuges : réduisent la perméabilité du béton.

1.3.5.2. Effets des adjuvants

Les adjuvants ont des effets significatifs sur les performances du béton :

- Amélioration de la maniabilité sans augmenter l'eau.
- Optimisation de la compacité et de la résistance.
- Réduction des fissures (par maîtrise du retrait ou de la chaleur d'hydratation).

- Prolongation ou accélération du temps de prise selon le besoin.
- Augmentation de la durabilité face aux cycles gel/dégel ou à l'agression chimique (Mindess et al. 2003).

« L'usage raisonné des adjuvants permet d'adapter finement le béton aux conditions d'exécution et aux performances attendues. » (Mehta & Monteiro, 2014, p. 242)

1.4. Types de béton

Le béton peut être classé en plusieurs catégories selon sa composition, ses performances ou son domaine d'utilisation. En voici les principaux types :

- Le béton ordinaire
- Béton de masse
- Béton armé
- Béton précontraint
- Béton post contraint
- Béton léger ou béton allégé
- Béton lourd
- Béton projeté *ou* béton **pompé**
- Béton réfractaire
- Béton autoplaçant (BAP)
- Béton à haute performance (BHP)
- Béton fibré

1.4.1. Béton ordinaire

C'est le béton le plus courant, composé de ciment Portland, d'eau, de granulats fins et grossiers. Il est utilisé pour la majorité des structures courantes (dalles, poutres, poteaux) (Neville, 2012).

1.4.2. Béton de masse

On appelle « **béton de masse** », un béton qui est prêt à l'emploi pour les éléments de forte épaisseur (> 80 cm) et les constructions qui présentent de grands volumes.

Sa composition doit être contrôlée car il est appelé à supporter beaucoup de charges. Les granulats doivent être de toutes dimensions pour avoir un béton le moins poreux possible.

Son domaine d'utilisation est conseillé pour la réalisation des fondations, des gros dallages et des parois épaisses.

1.4.3. Béton armé

On appelle « **béton armé** », un béton qui est obtenu par association du béton et des armatures en acier pour résister à la traction. Ce type de béton est utilisé dans la majorité des ouvrages de génie civil (Mehta & Monteiro, 2014).

Le béton résiste mieux à la compression (25 à 45 MPa à 28 jours d'âge) et moins à la traction (2 à 3 MPa à 28 jours d'âge) ; d'où on ajoute les aciers qui absorbent les efforts de traction dans les zones tendues. *Son domaine d'utilisation est conseillé pour la réalisation des poutres, poteaux, planchers (dalle+ poutre) etc...*

1.4.4. Béton précontraint

On appelle « **béton précontraint** », un matériau de construction composite figurant parmi les différents types de béton dans lequel on introduit, avant sa mise en service, des tensions opposées à celles qu'il devra subir. C'est-à-dire qu'il est soumis à des efforts de compression avant la mise en service, grâce à des câbles tendus, pour améliorer sa résistance aux charges (Mindess, Young & Darwin, 2003).

Il diffère du béton armé : dans le béton armé, les aciers d'armatures sont seuls chargés de résister aux efforts de traction tandis que pour le béton précontraint, le béton et les aciers s'unissent pour résister à ces efforts. Les éléments ainsi traités se comportent comme une masse homogène.

Son domaine d'utilisation : Elle s'applique à la préfabrication des hourdis pour plancher et de courtes poutres de pont.

1.4.5. Béton post-contraint

On appelle « **béton post contraint** », un béton précontraint par post tension.

La post tension est une technique de précontrainte consistant à mettre en tension les armatures de précontrainte - qui sont constituées de câbles d'acier à haute limite d'élasticité (HLE) coulissant à l'intérieur de conduits ou de gaines - après le durcissement du béton, par actionnement progressif de vérins.

Son domaine d'utilisation : La post-tension s'applique aux structures de plus grande taille comme les ponts et les réservoirs.

1.4.6. Béton léger ou béton allégé

On appelle « **béton léger** » ou béton allégé, un béton de ciment avec une masse volumique sec inférieure à celle d'un béton normal.

Le béton léger se différencie donc des autres types de béton, notamment par son poids bien inférieur à celui du béton classique. Une fois sec, celui-ci possède une densité pouvant aller de 300 à 1800 kg/m³, alors qu'un béton ordinaire se situe plutôt entre 2000 et 2300 kg/m³.

Il utilise des granulats légers (p. ex. argile expansée) pour réduire le poids du béton. Il est utilisé pour les structures non porteuses ou les isolations (Neville, 2012).

Son domaine d'utilisation est conseillé pour la construction des murs ne supportant que de faibles charges. Il ne peut pas être armé en raison d'une part des vides créés dans la masse, ce qui provoque une faible adhérence et d'autres part de sa faible résistance mécanique.

1.4.7. Béton lourd

Utilise des granulats très denses (ex. barytine) pour les structures de protection radiologique ou délestage.

1.4.8. Béton projeté *ou* béton pompé

On appelle « **béton projeté** » *ou* béton **pompé**, un béton propulsé, après malaxage, sur un support sous forme de jet.

Son domaine d'utilisation : Il permet de réaliser les formes les plus complexes (dômes, coques, etc.) ou difficiles d'accès (tunnels, travaux acrobatiques, etc.). Il est également souvent utilisé dans les travaux souterrains ou en technique de réparation ou de soutènement.

1.4.9. Béton réfractaire

On appelle « **béton réfractaire** », un **béton** de ciment capable de résister à des températures allant jusqu'à 2000°C au lieu de 300°C pour un **béton** normal.

Ils sont à base de ciment fondu ou alumineux.

Son domaine d'utilisation : Le **béton réfractaire** s'utilise principalement pour la **mise en œuvre** d'éléments de maçonnerie résistant à une forte chaleur et qui sont destinés entre autres aux feux ouverts, cheminées, boisseaux et barbecues.

1.4.10. Béton autoplaçant (BAP)

Très fluide, il s'écoule et se compacte sous son propre poids, sans vibration. Il est adapté aux coffrages complexes ou aux zones d'accès difficile (EFNARC, 2005).

1.4.11. Béton à haute performance (BHP)

Il présente une résistance élevée (≥ 50 MPa) et une durabilité améliorée grâce à un rapport E/C très bas et l'utilisation d'adjuvants (Mehta & Monteiro, 2014).

1.4.12. Béton fibré

Contient des fibres métalliques, synthétiques ou naturelles, pour améliorer la résistance à la fissuration, à l'impact et à la traction.

1.5. Propriétés du béton frais et durci

1.5.1. Propriétés du béton frais

Le béton frais désigne le mélange encore plastique, avant durcissement. Ses propriétés conditionnent la qualité de la mise en œuvre.

1.5.1.1. Maniabilité

C'est l'aptitude du béton à être mis en place, compacté et fini sans ségrégation ni ressuage excessif. Elle dépend de la composition du béton, du rapport eau/ciment et des adjuvants (Neville, 2012).

1.5.1.2. Ouvrabilité

Souvent considérée comme synonyme de maniabilité, elle intègre également la fluidité et la cohésion du béton. Elle est généralement mesurée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Mehta & Monteiro, 2014). « Une bonne ouvrabilité permet une mise en place rapide et sans défauts, essentielle à la durabilité du béton. » (Mindess, Young & Darwin, 2003, p. 157)

1.5.1.3. Temps de prise

La prise du béton correspond au début de durcissement du mélange ciment-eau-granulats. Elle se fait en deux étapes : la prise initiale et la prise finale. Le temps de début et de fin de prise marque la transition entre l'état plastique et rigide du béton.

- Temps de début de prise du béton :

En général, le béton commence à prendre prise environ 1h30 à 2h après le mélange ciment-eau+ granulats (début de prise). Ce moment marque le début de la perte de plasticité : le béton ne peut plus être travaillé facilement.

- Temps de fin de prise du béton :

En moyenne, la prise finale se situe entre 4 à 6 heures après le mélange.

C'est le moment où le béton commence à durcir de manière plus rigide et ne peut plus être mis en forme.

Ces temps dépendent de plusieurs facteurs :

- Type de ciment (ex. CEM I prend plus rapidement que CEM III)
- Température ambiante (plus chaud = prise plus rapide)
- Dosage en eau et en adjuvants
- Conditions d'humidité

Selon Neville (2011), la prise initiale du ciment Portland ordinaire commence autour de 1h30 et se termine vers 4h après le gâchage.

1.5.1.4. Temps de durcissement

Le durcissement est le processus de développement progressif de la résistance par hydratation du ciment. Il commence après la prise et dure plusieurs jours voire semaines. La norme considère 28 jours comme l'âge de référence (Neville, 2012).

1.5.2. Propriétés du béton durci

Le béton durci est celui qui a terminé sa prise. Ses propriétés mécaniques et physiques déterminent sa résistance, sa durabilité, et sa stabilité dimensionnelle.

1.5.2.a) Résistance à la compression

C'est la propriété mécanique la plus importante du béton. Elle est déterminée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques à 7, 14, et 28 jours. Les valeurs courantes vont de 20 à 60 MPa pour les bétons ordinaires, et jusqu'à 100 MPa pour les BHP (Mehta & Monteiro, 2014).

1.5.2.b) Résistance à la traction

Le béton est naturellement faible en traction ($\approx 10\%$ de sa résistance en compression). Elle est mesurée par essai de fendage ou traction directe (Mindess et al, 2003).

1.5.2.c) Résistance à la flexion

Mesure la résistance du béton aux efforts combinés de compression et de traction (cas des dalles, poutres). Elle est environ 15 % de la résistance à la compression.

1.5.2.d) Durabilité

C'est la capacité du béton à résister aux agressions chimiques, physiques et climatiques (gel/dégel, sulfates, carbonatation, corrosion). Elle dépend de la compacité, de la teneur en ciment et de la qualité de l'enrobage des armatures (Neville, 2012).

1.5.2.e) Perméabilité

La perméabilité mesure la faculté du béton à laisser passer les liquides ou gaz. Un béton très perméable est vulnérable à la corrosion des armatures. Elle diminue avec un rapport E/C bas et une bonne cure (Mehta & Monteiro, 2014).

1.5.2.f) Retrait

C'est la réduction de volume du béton due à la perte d'eau par évaporation ou hydratation. Il peut provoquer des fissures si le béton est empêché de se déformer. Il existe plusieurs types : plastique, hydraulique, autogène et de dessiccation.

« Le retrait est inévitable dans un béton, mais sa maîtrise est essentielle pour éviter les fissures et préserver l'intégrité de l'ouvrage. » (Neville, 2012, p. 298)

1.6. Cure du béton

1.6.1. Définition

La cure du béton est l'ensemble des mesures prises après le coulage pour maintenir le béton dans des conditions d'humidité et de température favorables à l'hydratation du ciment. Elle vise principalement à éviter l'évaporation prématurée de l'eau contenue dans le béton frais, afin de garantir le développement optimal de ses propriétés mécaniques et durables (Neville, 2011).

1.6.2. Objectifs de la cure

L'objectif principal de la cure est :

Prévenir l'évaporation prématurée de l'eau contenue dans le béton, car cette eau est indispensable à l'hydratation complète du ciment, processus indispensable à la prise et au durcissement du béton ;

- Une résistance mécanique accrue (compression, traction, flexion) ;
- Une meilleure durabilité face aux agressions chimiques et climatiques ;
- Éviter la fissuration due à un retrait plastique ou thermique excessif (Mehta & Monteiro, 2014).
- Une réduction de la porosité et donc une meilleure compacité ;
- Améliorer la durabilité du béton (résistance à la carbonatation, à la pénétration de chlorures, au gel/dégel...).

1.6.3. Méthodes de cure

1.6.3.1. Cure à l'eau (cure humide)

Recouvrir le béton avec de l'eau (aspersion, immersion, nappes humides). Elle consiste à maintenir le béton constamment humide en arrosant ou en recouvrant sa surface avec des matériaux saturés (sacs de jute, toiles humides, nappes). C'est la méthode la plus courante et la plus efficace pour éviter la perte d'eau par évaporation, surtout dans les climats chauds (Mehta & Monteiro, 2014).

Durée minimale recommandée : 7 jours (ou plus si le ciment est à prise lente)

1.6.3.2. Cure par revêtement (ou membrane de cure)

Empêchent l'évaporation de l'eau sans nécessiter d'arrosage par application de produits de cure (film plastique, agents chimiques filmogènes). Cette méthode utilise des produits filmogènes (hydrocarbures, paraffine, polymères) pulvérisés sur la surface du béton. Ces produits forment une fine pellicule empêchant l'évaporation de l'eau (ACI 308R-01, 2001).

1.6.3.3. Cure thermique

Principalement utilisée dans la préfabrication, cette méthode accélère l'hydratation du ciment à travers un apport de chaleur (vapeur d'eau, chauffage électrique, infrarouges). Elle est utile dans les régions froides ou pour le béton à haute performance (Neville, 2011).

1.6.3.4. Cure naturelle

Lorsque les conditions climatiques sont naturellement favorables (humidité élevée et faible température), la cure peut être assurée naturellement, mais cette méthode reste risquée sans contrôle. Elle est moins recommandée car elle ne garantit pas une hydratation optimale. Les normes recommandent tout de même l'application d'une méthode active (EN 13670, 2009).

1.6.4. Durée de la cure

La durée minimale de cure dépend du type de ciment utilisé, des conditions climatiques et des performances recherchées. Les recommandations générales sont :

- 7 jours pour un ciment courant (CEM I) ;
- 10 à 14 jours dans les zones chaudes et sèches ;
- Prolongée jusqu'à 28 jours pour des structures exposées à des conditions sévères aux agressions extérieures (EN 13670&ACI 308,2009).

Selon Neville (2011), un béton mal curé peut perdre jusqu'à 50 % de sa résistance à 28 jours.

1.6.5. Conséquences d'une cure insuffisante

Une mauvaise cure peut entraîner plusieurs défauts durables dans la structure :

- Faible résistance mécanique ; c'est-à-dire résistance à la compression réduite.
- Fissures superficielles (retrait plastique) ;
- Mauvaise adhérence entre béton et armatures ;
- Durabilité réduite, notamment contre les cycles gel/dégel ou les attaques chimiques (Mehta & Monteiro, 2014) ;
- Augmentation de la perméabilité et du retrait hydraulique (ACI, 2001).
- Décollement de la surface (faible compacité).

1.7. Importance des granulats dans le béton

Les granulats représentent entre 60 % et 80 % du volume du béton, ce qui en fait les constituants majoritaires. Leur rôle ne se limite pas au simple remplissage : ils influencent la maniabilité, la compacité, la résistance mécanique, la durabilité et même le retrait du béton. Une bonne sélection et préparation des granulats sont donc indispensables pour garantir des performances optimales du béton (Neville & Brooks, 2010).

1.7.1. Classification des granulats

Les granulats se classifient principalement selon leur taille, leur origine et leur forme :

Selon la taille, on distingue :

Les granulats fins (sable) dont le diamètre est inférieur à 5 mm ;

Les granulats grossiers (graviers) dont le diamètre est supérieur à 5 mm (NF EN 12620, 2008).

Selon l'origine :

Naturels : extraits des rivières, carrières, ou plages ;

Artificiels : obtenus par concassage ou traitements industriels ;

Recyclés : issus de déchets de démolition (Mehta & Monteiro, 2014).

Selon la forme :

Roulés : issus des rivières, avec surface lisse et forme arrondie ;

Concassés : issus des roches, avec forme anguleuse et rugueuse.

Chaque catégorie influence différemment la mise en œuvre et les propriétés mécaniques du béton.

1.7.2. Propriétés physiques des granulats

Les principales propriétés physiques des granulats influençant le béton sont :

- Granulométrie : elle désigne la distribution dimensionnelle des grains. Une granulométrie bien répartie permet un meilleur enrobage du ciment et réduit la quantité de pâte nécessaire (Neville, 1996).
- Forme et texture : les granulats roulés facilitent l'ouvrabilité mais réduisent l'adhérence ; les granulats anguleux améliorent l'ancrage mécanique mais peuvent nuire à la maniabilité (Mamlouk & Zaniewski, 2017).
- Taille maximale : un gros granulat réduit la surface spécifique et donc la demande en ciment, mais peut diminuer l'homogénéité du mélange si mal adapté à la section de l'élément coulé (Mindess et al., 2003).
- Propreté : la présence de fines, d'argile ou de matières organiques peut interférer avec la liaison pâte-granulat et affaiblir le béton (Neville & Brooks, 2010).

1.7.3. Influence des granulats sur la résistance du béton

Les granulats participent directement à la résistance mécanique du béton. Ils agissent comme squelette solide, réduisant les déformations et augmentant la résistance à la compression. Toutefois, leur qualité mécanique (résistance propre, dureté) et leur adhésion à la pâte cimentaire sont cruciales. Un granulat de faible résistance peut devenir le point de rupture du béton (Mehta & Monteiro, 2014).

Par ailleurs, la forme joue un rôle important : les granulats anguleux assurent une meilleure accroche mécanique avec la pâte, augmentant ainsi la résistance à la traction indirecte (splitting) et à la compression (Mindess et al., 2003).

1.7.4. Effet de la granulométrie sur la compacité et la résistance du béton

Une granulométrie continue (présence équilibrée de fines et de gros grains) permet de réduire les vides dans le mélange. Cette compacité accrue diminue la porosité et augmente la résistance à la compression, tout en améliorant la durabilité du béton (Neville, 1996).

Inversement, une granulométrie discontinue entraîne une mauvaise compacité, nécessitant plus de pâte de ciment pour enrober les granulats, ce qui peut provoquer un retrait excessif et des fissures. Le module de finesse et les courbes granulométriques sont utilisés pour vérifier l'aptitude des granulats à atteindre une compacité optimale (NF EN 933-1, 2012).

1.8. Normes relatives aux matériaux du béton

Plusieurs normes techniques encadrent la qualité des matériaux utilisés dans le béton pour assurer des performances constantes et durables.

- **Pour le ciment :**

Norme EN 197-1 (Ciment § Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants) ; Elle définit les différents types de ciments Portland et leurs propriétés physico-chimiques.

- **Pour les granulats :**

Norme NF EN 12620 : spécifie les exigences pour les granulats utilisés dans le béton ;

Norme NF EN 933-1 : décrit les méthodes d'essai pour l'analyse granulométrique ;

Norme NF EN 1097-6 : pour la détermination de la masse volumique et de l'absorption d'eau.

- **Pour les essais mécaniques :**

Norme EN 12390-3 : "Essai pour le béton durci – Résistance à la compression des éprouvettes cubiques ou cylindriques" ;

Norme EN 12350-2 : "Essai pour béton frais – Essai d'affaissement (Slump test)".

Le respect de ces normes garantit la reproductibilité des résultats expérimentaux et permet la comparaison avec les données issues de la littérature internationale (AFNOR, 2021).

1.9. Conclusion

Au terme de cette revue de littérature, il apparaît que les propriétés physico-mécaniques et durables du béton dépendent étroitement de la nature, de la qualité de ses constituants et surtout de la granularité des granulats qui le composent en ce sens qu'ils occupent environ entre 60 et 80% du volume total du mélange de béton (Neville, A. M., 2011). Le chapitre suivant abordera en détail l'influence de différentes distributions granulométriques sur les propriétés mécaniques du béton.

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU TAMISAGE DES GRANULATS SUR LA RESISTANCE DU BETON

2.1. Introduction

La performance mécanique du béton, notamment sa résistance à la compression, dépend non seulement du rapport eau/ciment mais aussi de la qualité et de la granulométrie des granulats utilisés. Une distribution granulométrique permet une meilleure compacité et une réduction des vides, favorisant ainsi un béton plus dense et plus résistant (Neville, 2011). Ce chapitre analyse l'influence du tamisage des granulats sur les propriétés mécaniques du béton, en s'appuyant sur des études expérimentales et théoriques.

2.2. Définition et importance du tamisage des granulats

2.2.1. Définition du tamisage des granulats

Le tamisage est une opération mécanique consistant à séparer un ensemble granulaire en plusieurs fractions granulométriques à l'aide d'une série de tamis à mailles normalisées. Cette technique est utilisée pour classer les particules solides selon leur taille, afin d'évaluer la granulométrie d'un échantillon ou d'améliorer sa distribution granulaire pour des utilisations spécifiques, comme dans la formulation du béton (NF EN 933-1, 2012).

2.2.2. Importance du tamisage des granulats

Le tamisage est fondamental dans le contrôle de la qualité des granulats. Il permet de :

- Vérifier la conformité aux courbes granulométriques normatives ;
- Connaître la composition granulométrique d'un matériau ;
- Contrôler la qualité des granulats selon les normes en vigueur ;
- Optimiser les proportions dans le dosage du béton pour améliorer sa résistance, sa durabilité et sa maniabilité ;
- Optimiser la compacité du béton en limitant les vides ;
- Améliorer la résistance mécanique du béton ;
- Réduire les risques de ségrégation dans le béton frais (Mehta & Monteiro, 2014).

Un bon tamisage permet d'éviter les défauts tels que la ségrégation, la porosité excessive, ou encore les faiblesses mécaniques du béton durci.

2.3. Objectifs du tamisage

2.3.1. Homogénéité granulométrique

Un des principaux objectifs du tamisage est d'obtenir une répartition homogène des granulats. Une distribution régulière des tailles permet un bon enrobage des grains par la pâte cimentaire, évitant les concentrations de particules fines ou grossières dans certaines zones du béton (Neville, 1996 & Brooks, 2010).

2.3.2. Propreté

Le tamisage contribue également à éliminer les particules fines indésirables, telles que les poussières, argiles, le limon ou matières organiques. Ces impuretés peuvent nuire à l'adhésion entre les granulats et la pâte de ciment, et diminuer la résistance mécanique du béton. Une teneur excessive en fines peut augmenter la demande en eau et diminuer la résistance mécanique (Mamlouk & Zaniewski, 2017).

2.3.3. Compacité

Une granulométrie bien répartie grâce au tamisage permet d'obtenir une meilleure compacité du béton. Cela réduit la porosité, améliore la durabilité et limite l'utilisation excessive de ciment, ce qui est à la fois économique et écologique (Mindess et al. 2003).

2.4. Méthodes de tamisage

2.4.1. Tamisage à sec

Le tamisage à sec est la méthode la plus courante. Il consiste à faire vibrer un échantillon de granulats secs à travers une série de tamis normalisés. Cette méthode est rapide mais peut être insuffisante si les particules sont humides ou collantes. Elle est adaptée aux environnements de laboratoire (NF EN 933-1, 2012).

2.4.2. Tamisage humide

Le tamisage humide est utilisé lorsque les granulats contiennent des fines qui pourraient adhérer aux grains. L'échantillon est lavé à travers les tamis à l'aide d'eau, ce qui permet une meilleure séparation et élimination des particules fines argileuses collantes (Mehta & Monteiro, 2014).

2.4.3. Tamisage mécanique vs manuel

Le tamisage manuel est plus simple mais moins précis ;

Le tamisage mécanique, effectué avec des tamiseuses électriques, assure une répétabilité et une uniformité des résultats, notamment pour les essais normalisés en laboratoire.

2.5. Analyse granulométrique

2.5.1. Courbe granulométrique

La courbe granulométrique est un graphique représentant la distribution en pourcentage des différentes tailles de particules d'un granulat. Elle permet d'évaluer si le granulat suit une distribution continue ou discontinue, ce qui influence la compacité du béton (Neville & Brooks, 2010).

La courbe granulométrique représente, en abscisse, le diamètre des particules (en mm) et, en ordonnée, le pourcentage passant cumulatif. Elle permet d'identifier :

- Une granulométrie continue (courbe régulière) favorable à la compacité ;
- Une granulométrie discontinue (sauts sur la courbe) qui peut générer des vides.

2.5.2. Module de finesse (MF)

Le module de finesse est un indice numérique permettant d'estimer la finesse d'un sable. Il se calcule à partir de la somme des pourcentages cumulés de rétention sur une série de tamis standard, divisée par 100. Un module de finesse compris entre 2,3 et 3,1 est généralement considéré comme acceptable pour un sable de béton (N.E.12620, 2008).

Il est calculé selon la formule suivante :

$$MF = \frac{\text{Somme des \% rétention cumulés sur tamis normalisés}}{100}$$

Un MF trop bas indique un sable trop fin, ce qui augmente la demande en eau.

Un MF trop élevé désigne un sable trop grossier, difficile à travailler (NF EN 12620, 2008).

2.5.3. Distribution des tailles de particules – Granulométrie idéale

Une granulométrie idéale implique une répartition équilibrée des tailles, ce qui permet un bon emboîtement des grains, réduit les vides et assure une meilleure compacité. Des modèles empiriques (ex. courbe de Fuller) sont utilisés pour approcher cette distribution (Fuller & Thompson, 1907). Les formulations de béton modernes cherchent à s'approcher de cette granulométrie idéale pour maximiser la performance avec un dosage en liant optimisé (Mamlouk & Zaniewski, 2017).

2.5.4. Classes des granulats

2.5.4.1. Les différentes classes des granulats

Les classes de granulats sont des intervalles de dimensions granulométriques normalisés. Elles permettent de catégoriser les granulats selon la norme NF EN 933-1 (AFNOR, 2012). On distingue :

- Granulats fins (Sable) : 0/2 mm, 0/4 mm, parfois jusqu'à 0/6 mm
- Granulats moyens (Gravillons) : 4/8 mm, 6.3/14 mm, etc.
- Granulats grossiers (Graviers) : 8/16 mm, 16/22.4 mm, 20/31.5 mm, etc.

Chaque classe est définie par deux tamis normés : la dimension d (grains les plus fins), et la dimension D (grains les plus gros) exprimés en millimètres, et notée d/D.

« La classification granulométrique est indispensable pour assurer la cohésion et la compacité du béton » (Neville, 2012, p. 140).

2.5.4.2. Classes les plus utilisées

- **Granulats fins (sable) : 0/2 mm ; 0/4 mm**

Le sable 0/4 mm est le plus utilisé dans les bétons pour les éléments structuraux. Il assure une bonne répartition dans la pâte et facilite la maniabilité du béton (Neville, 2012).

Le sable 0/2 mm est parfois préféré pour les bétons fins ou les mortiers.

- **Granulats grossiers (graviers ou gravillons)**

4/8 mm (gravillons fins) ; 8/16 mm (graviers moyens) ; 16/22.4 mm (graviers grossiers)

La classe 8/16 mm est la plus utilisée dans le béton armé et le béton prêt à l'emploi, car elle permet une bonne compacité et réduit les vides entre les grains (Mehta & Monteiro, 2014).

- La classe 16/22.4 mm est utilisée pour les bétons de structure en forte épaisseur (dalles, semelles).
- La classe 4/8 mm est souvent mélangée avec une classe plus grosse pour améliorer la granularité continue.

« Une courbe granulométrique continue et bien répartie entre les différentes classes améliore la compacité, réduit la porosité et augmente la résistance du béton » (Neville, 2012, p. 139).

2.5.4.3. Pourquoi ces classes sont-elles les meilleures ?

- 1⁰) Bonne compacité : Moins de vide à combler avec la pâte de ciment → béton plus dense.
- 2⁰) Réduction du dosage en ciment : Moins de pâte nécessaire → économique.
- 3⁰) Bonne maniabilité : Évite la ségrégation et facilite la mise en œuvre.
- 4⁰) Adaptées à la plupart des structures : bâtiments, ouvrages d'art, dalles, etc.
- 5⁰) Conformes aux normes : Notamment la norme NF EN 12620 pour granulats pour béton.

2.6. Effets du tamisage sur la qualité du béton

2.6.1. Uniformité et amélioration de la compacité

Le tamisage permet de normaliser la taille des grains, ce qui améliore la répétabilité des dosages et la qualité du béton. Une granulométrie uniforme facilite l'atteinte d'une densité optimale, favorable à une bonne résistance (Mehta & Monteiro, 2014).

2.6.2. Réduction des vides

Un bon tamisage permet de combler les vides entre les grains plus grossiers avec des grains plus fins. Cela réduit le volume de pâte nécessaire et améliore la résistance du béton durci (Neville, 1996).

2.6.3. Réduction des impuretés

Les particules fines comme l'argile ou les débris végétaux sont souvent éliminés par tamisage humide, ce qui augmente la pureté des granulats et donc la qualité finale du béton (Mindess et al., 2003).

2.6.4. Impact du tamisage des granulats sur la durabilité du béton

La compacité du béton est fortement influencée par la distribution granulométrique. Le tamisage permet d'ajuster cette distribution et d'obtenir une compacité maximale, condition essentielle pour la durabilité et la performance mécanique mais aussi la résistance à la pénétration de l'eau et aux agents agressifs, prolongeant la durée de vie du béton (Neville & Brooks, 2010).

2.6.5. Tamisage et classes des granulats sur la qualité du béton

La qualité du béton dépend fortement du tamisage et classement des granulats :

- Granulats bien classés et tamisés → meilleure compacité → moins de vides → plus de résistance.
- Granulats mal classés ou non tamisés → mauvaise compacité → plus de porosité → faible résistance (Neville, 2012).

Des études montrent que des variations de la granulométrie peuvent faire varier la résistance à la compression de 10 à 25 % à formulation constante (Mindess et al., 2003).

2.7. Principaux essais de laboratoire sur les granulats complémentaires au tamisage

2.7.1. Que désignent les essais au laboratoire ?

Les essais au laboratoire désignent l'ensemble des procédures expérimentales réalisées dans un environnement contrôlé (laboratoire) dans le but de caractériser les propriétés physiques, mécaniques ou chimiques des matériaux de construction.

Dans le domaine du génie civil, ces essais concernent notamment les sols, les granulats, le ciment, les aciers, le béton, l'asphalte, etc. Ils permettent d'évaluer la qualité des matériaux de base, notamment les granulats, qui entrent dans la composition du béton, des couches de chaussée ou d'autres ouvrages ainsi que la conformité des matériaux aux normes en vigueur, de prédire leur comportement en service et d'optimiser les formules des mélanges.

Leur rôle est essentiel pour garantir la durabilité, la stabilité et la performance des ouvrages. (Neville & Brooks, 2010,2012).

Les granulats doivent par exemple être soumis à une série d'essais au laboratoire afin de vérifier leur conformité aux normes en vigueur et leur aptitude à être utilisés dans les ouvrages. Ces essais incluent, outre le tamisage des granulats, d'autres tests permettant de mieux caractériser le comportement de ces derniers.

2.7.2. Types d'essais de laboratoire complémentaires au tamisage des granulats

Ces principaux essais de laboratoire sont notamment :

- Essai los Angeles
- Essai Micro-Dévale essai d'usure
- Essai d'analyse granulométrique : pour déterminer la distribution des tailles des grains dans un matériau.
- Détermination de classes des granulats
- Détermination de la dimension du plus gros granulat
- Module de finesse MF
- Essai d'équivalent de sable
- Essai de densité
- Détermination du coefficient d'aplatissement et d'allongement
- Essai de propreté des graviers
- Essai de porosité : -compacité, - indice des vides
- Détermination de la teneur en eau des granulats
- Conception des mélanges et réalisation des éprouvettes d'essais
- Essai de compression du béton : pour mesurer la capacité du béton à résister à des forces de compression.

2.7.2.1 Essai Los Angeles

2.7.2.1.a) Description de l'essai

L'essai Los Angeles est destiné à évaluer la résistance mécanique des granulats aux chocs et à l'usure. Il consiste à placer un échantillon de granulats avec des boulets de fonte normalisés dans un tambour cylindrique rotatif. Après un nombre déterminé de révolutions (habituellement 500), on mesure la perte de masse du matériau, ce qui reflète sa résistance à la fragmentation. Cet essai est particulièrement important pour les granulats destinés aux couches de roulement de chaussées ou aux bétons soumis à des efforts importants. Un faible pourcentage de perte indique une meilleure résistance (AFNOR, 1996 ; Neville, 2012).

2.7.2.1. b) Objectif de l'essai

L'objectif est de déterminer l'aptitude des granulats à résister à la fragmentation mécanique, simulant les contraintes qu'ils subissent durant le transport, le malaxage ou encore dans la structure finie du béton (Neville, 2012).

2.7.2.2. Essai Micro-Dévale

2.7.2.2.a) Description de l'essai

L'essai Micro-Dévale permet d'évaluer la résistance des granulats à l'usure par frottement dans un environnement humide. Il est particulièrement adapté aux granulats utilisés pour les chaussées, car il simule mieux les conditions climatiques réelles. Contrairement à l'essai Los Angeles, celui-ci reproduit mieux les conditions réelles, notamment l'action de l'eau et les sollicitations abrasives.

Le principe repose sur le même système de tambour rotatif, mais les granulats sont immergés dans de l'eau avec des billes d'acier c'est-à-dire qu'ils sont placés dans un cylindre (ou une jarre tournante) contenant de l'eau et des billes en acier, puis on les fait tourner pendant une durée déterminée (généralement de 2h00'). Après l'essai, la fraction fine produite est mesurée pour évaluer l'usure. Cet essai est particulièrement pertinent pour les matériaux de chaussées soumis à l'humidité (Chabanat, 2016).

Il est normalisé par la norme NF EN 1097-1, et permet de mieux évaluer la durabilité des granulats soumis à des cycles d'humidité (AFNOR, 1996).

2.7.2.2. b) Objectif de l'essai

Cet essai complète l'essai Los Angeles en mettant en évidence l'influence de l'eau sur l'usure, facteur crucial pour les granulats utilisés dans des environnements humides ou exposés (AFNOR, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats (NF EN 1097), 2010).

2.7.2.3. Essai d'analyse granulométrique

2.7.2.3.a) Description de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la répartition dimensionnelle des particules composant un échantillon des granulats par tamisage successif.

2.7.2.3.b) Objectif de l'essai

Elle permet de vérifier si les granulats possèdent une courbe granulométrique continue, condition nécessaire pour une bonne compacité et une bonne maniabilité du béton (Neville, 2012).

Les granulats non tamisés révèlent des discontinuités, avec des excès de fines et de gros éléments mal répartis. Cela se traduit par une meilleure compacité potentielle des granulats tamisés (NF EN 211., 2002).

2.7.2.4. Module de Finesse

2.7.2.4.a) Description de l'essai

Le module de finesse (MF) est un indice global de la granulométrie d'un sable. Il est obtenu en additionnant les pourcentages de refus cumulatifs sur une série de tamis normalisés, puis en divisant la somme par 100.

2.7.2.4.b) Objectif de l'essai

Le MF permet de caractériser la finesse ou la grosseur d'un sable, ce qui influence la demande en eau et la maniabilité du béton (Neville, 2012).

2.7.2.5. Essai d'équivalent de sable

2.7.2.5.a) Description de l'essai

Cet essai mesure la propreté du sable, en quantifiant la proportion d'éléments fins argileux par rapport aux éléments siliceux dans un échantillon susceptibles d'affecter la qualité du béton. Il consiste à remplir un cylindre avec un mélange granulats-solution floculante, à agiter, puis à mesurer les hauteurs respectives de sable et de limons décantés.

L'équivalent de sable (ES) est le rapport entre la hauteur du sable et la hauteur totale du dépôt. Un ES élevé (> 70 %) indique une faible teneur en particules argileuses et donc une meilleure qualité des granulats (Neville, 2012). Cet essai est essentiel pour les granulats fins utilisés dans le béton ou les couches de base.

2.7.2.5.b) Objectif de l'essai

Déterminer la teneur en fines argileuses qui peuvent altérer l'adhérence pâte-granat dans le béton (AFNOR, 2010).

2.7.2.6. Essai de densité des granulats

Cet essai consiste à déterminer la masse volumique des granulats. On distingue :

- La densité réelle ou absolue des granulats
- La densité apparente des granulats

Ces deux propriétés influencent directement la formulation du béton, sa compacité et son poids propre. Une bonne connaissance de ces densités est indispensable pour le dosage en masse et pour le calcul du rendement (Mindess, Young & Darwin, 2003).

2.7.2.6.1.a) Description de l'essai de densité réelle des granulats par pesée hydrostatique

La densité réelle ou densité absolue des granulats est mesurée à l'aide d'un pycnomètre, par déplacement d'eau. Elle représente la masse volumique des grains solides sans tenir compte des vides intergranulaires. En d'autres termes la densité réelle ou densité absolue est le rapport de la masse sèche du granulat à son volume réel, excluant les vides entre grains.

2.7.2.6.1.b) Objectif de l'essai

Évaluer la densité réelle du matériau utilisé dans le béton pour optimiser la formulation (Mehta & Monteiro, 2014).

2.7.2.6.2.a) Description de l'essai de densité apparente des granulats (sable + gravier)

La densité apparente, quant à elle, inclut les vides entre les grains dans un volume donné, mesuré par remplissage d'un récipient normalisé. En d'autres termes La densité apparente est le rapport entre la masse d'un échantillon de granulat sec et le volume qu'il occupe, y compris les vides entre grains.

2.7.2.6.2.b) Objectif de l'essai

L'essai de densité apparente sert à estimer la compacité d'un granulat en vrac, ce qui influence la formulation du béton (Neville, 2012).

2.7.2.7. Coefficient d'aplatissement et d'allongement (Forme des granulats)

La forme des granulats a un impact sur la maniabilité du béton frais et sur sa compacité. Des granulats trop allongés ou trop plats créent des points faibles dans la structure du béton et nuisent à sa durabilité.

Le coefficient d'aplatissement est déterminé en mesurant le pourcentage de grains dont l'épaisseur est inférieure à 0,6 fois la plus grande dimension, tandis que, le coefficient d'allongement s'obtient en calculant le pourcentage de grains dont la longueur dépasse 1,8 fois la dimension moyenne (BSI, 2013). Des valeurs trop élevées sont généralement proscrites dans les bétons de haute performance.

2.7.2.8. Teneur en fines (Argiles et particules inférieures à 0,063 mm)

Cette mesure permet de quantifier la fraction très fine contenue dans les granulats, souvent argileuse ou limoneuse. Une teneur excessive en fines peut augmenter la demande en eau du béton, perturber l'hydratation du ciment et diminuer la résistance mécanique.

La norme exige généralement une teneur en fines inférieure à 1 % à 2 %, selon la classe du granulat et l'usage prévu. Cet essai est réalisé par tamisage humide ou par analyse sédimentométrique (Neville & Brooks, 2010).

2.7.2.9. Essai de porosité

2.7.2.9. a) Description

La porosité du matériau est le rapport entre le volume de vides et le volume total de celui-ci.

L'essai de porosité consiste à mesurer le rapport entre le volume des vides présents dans les granulats (pores accessibles ou fermés) et leur volume total. Elle s'exprime en pourcentage (%). Elle caractérise donc la compacité interne des granulats, ce qui veut dire que plus un granulat est poreux, plus il contient de vides capables de retenir de l'air ou de l'eau.

Cependant, la porosité n'est pas une grandeur directement mesurable ; elle est déterminée à partir des mesures de densités (masse volumique absolue et masse volumique apparente).

Cet essai repose sur la comparaison entre :

- La masse volumique absolue (ρ_a) : qui est le rapport de la masse sèche des granulats sur le volume des solides uniquement sans tenir compte des pores.
- La masse volumique apparente (ρ_{app}) : qui est le rapport de la masse sèche des granulats sur le volume global, c'est-à-dire solide + pores.

La porosité P est alors donnée par la formule : $P = \frac{\rho_a - \rho_{app}}{\rho_a} \times 100$

Où P=Porosité en %

ρ_a =masse volumique absolue (g/cm³ ou kg/m³)

ρ_{app} =masse volumique apparente (g/cm³ ou kg/m³)

2.7.2.9. b) Objectif

L'objectif de l'essai de porosité des granulats est de déterminer la proportion de vides contenus dans la masse granulaire, c'est-à-dire la part de volume non occupé par la matière solide mais remplie par de l'air ou éventuellement de l'eau.

Ainsi l'essai de porosité permet de :

- 1) Caractériser la structure interne des granulats : connaître la quantité des pores ouverts et fermés.
- 2) Evaluer la quantité et la durabilité des granulats. Il faut savoir que :
 - Des granulats très poreux absorbent plus d'eau, ce qui peut influencer l'adhérence pâte de ciment-granulats et la résistance du béton.
 - Une forte porosité peut également rendre les granulats sensibles au gel-dégel.
- 3) Prédire le comportement du béton :
 - Influence mécanique ; c'est-à-dire béton moins résistant si les granulats sont trop poreux.
 - Influencer sur la perméabilité et donc la durabilité du béton.
 - Influencer sur le dosage en eau : c'est dire que les granulats poreux exigent plus d'eau pour la gâchée.
- 4) Classer et comparer les granulats selon leur aptitude à être utilisés dans les bétons hydrauliques, routiers ou autres ouvrages.

Bref cet essai vise à évaluer la capacité d'absorption et la proportion de vides dans les granulats, afin de juger de leur aptitude à la fabrication de bétons résistants et durables.

(Mindess et al. 2003).

2.7.2.10. Détermination de la dimension maximale, Dmax

Un Dmax trop élevé peut induire une ségrégation dans le béton.

2.7.2.11. Classe des granulats

2.7.2.12. Mise en œuvre et fabrication des éprouvettes d'essais

Les éprouvettes sont souvent fabriquées selon la norme NF EN 12390-1 (Europe/France).

Les cubes d'essai pour le béton sont généralement fabriqués avec des dimensions standards de $150 \times 150 \times 150$ mm. Ce format est largement utilisé pour déterminer la résistance à la compression du béton, conformément aux recommandations des normes internationales, notamment la norme NF EN 12390-3 qui régit l'essai de compression sur éprouvettes en béton (AFNOR, 2019)

Contexte Normatif

Selon les normes européennes et françaises, notamment la norme EN 12390-1 à 12390-7, les cubes d'un côté de 150 mm permettent de garantir des conditions d'essai représentatives et reproductibles. Cette dimension est choisie pour assurer une bonne représentativité des propriétés mécaniques du béton et faciliter la manipulation en laboratoire (AFNOR, 2019).

Importance du Choix des Dimensions

L'utilisation de cubes de 150 mm de côté permet de garantir :

- Une homogénéité dans les résultats, en limitant les effets d'échelle sur la résistance mesurée (Neville & Brooks, 2010),
- Une comparabilité entre différents essais, puisqu'il s'agit du format de référence reconnu internationalement (Mindess, Young, & Darwin, 2003),
- Une bonne répartition des contraintes lors de l'essai de compression, grâce aux surfaces planes des cubes moulés avec soin (Mehta & Monteiro, 2014).

Autres Formats Possibles

Bien que le cube de $150 \times 150 \times 150$ mm soit le format standard en Europe, d'autres dimensions sont utilisées dans certaines régions, notamment les cylindres de 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur en Amérique du Nord. Ces formats répondent à d'autres normes, comme l'ASTM C39 (ASTM, 2022). Toutefois, les essais réalisés avec des dimensions différentes nécessitent des facteurs de conversion pour comparer les résultats avec les cubes standards (Neville & Brooks, 2010).

2.7.2.13. Essai d'affaissement (Slump test)

2.7.2.13.a) Description

L'essai d'affaissement (ou essai d'affaissement au cône d'Abrams) est un essai simple et courant en Génie Civil. Ce test permet d'évaluer la consistance et l'ouvrabilité ou la maniabilité du béton frais par mesure de son affaissement après retrait du cône d'Abraham.

2.7.2.13.b) Objectif

Vérifier la maniabilité du béton pour le coulage (AFNOR, 2010).

2.7.2.14. Essai de compression des éprouvettes en béton

2.7.2.14. a) Description

Essai normalisé mesurant la résistance mécanique d'éprouvettes cubiques ou cylindriques soumises à une charge croissante de compression jusqu'à rupture. Chaque éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à rupture à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 2000 kN.

2.7.2.14. b) Objectif

Déterminer la résistance à la compression du béton après 7, 14 et 28 jours de cure. Enfin de compte il faut comparer les résultats des résistances qui seront donnés par ces essais de compression au laboratoire pour les éprouvettes du béton réalisé avec les granulats naturels non tamisés d'un côté ainsi que les éprouvettes du béton réalisé avec les granulats naturels tamisés de l'autre côté puis nous ferons l'analyse et la discussion de ces résultats.

La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

$$RC = \{F\} / \{A\} \text{ où}$$

R_c = résistance à la compression (MPa),

F = charge maximale à la rupture (kN),

A = surface de la section (cm²).

2.7.3. Importance des essais de laboratoire sur les granulats

Les essais de laboratoire sur les granulats sont indispensables pour garantir la qualité des matériaux utilisés dans les ouvrages de génie civil. Chacun des essais complémentaires au tamisage des granulats joue un rôle bien défini dans l'évaluation des propriétés qui influencent la performance du béton ou des couches de chaussée. Leur mise en œuvre selon des normes rigoureuses assure la fiabilité des résultats et la durabilité des constructions.

2.8. Composition et formulation du béton

2.8.1. Composition du béton

2.8.1.a) But de la composition du béton

La composition du béton a pour but de déterminer le dosage de 1 m³ du béton, c'est-à-dire donc les proportions optimales de chacun de ses constituants (granulats, ciment et eau) en vue de produire un matériau qui aura les propriétés appropriées à l'utilisation qu'on veut faire et qui coûtera le moins cher possible.

2.8.1.b) Méthodes de la composition du béton

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la composition du béton proposées et appliquées dans différents pays du monde.

Parmi ces méthodes, on peut citer :

- Méthode des Abaques,
- Méthode d'Abrams,
- Méthode de BOLOMEY,
- Méthode de DREUX GORISSE,
- Méthode de FLEURY,
- Méthode GENERALE DU CENTRE D'ESSAIS DES STRUCTURES,
- Méthode de JOISEL,
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.

2.8.1.c) Choix de méthode de détermination de la composition du béton

Dans notre étude, nous avons voulu utiliser la méthode des VOLUMES ABSOLUS appelée méthode « SCRAMTAIEV » car c'est une méthode la plus rationnelle (Skramtaev, 1958). Il s'agit d'une méthode qui consiste à :

- Calculer la somme de tous les composants du béton frais qui doit être égale à 1000 litres ou $1m^3$
- La porosité $P = 0$ pour un béton damé.

Pour confectionner un béton, il faut calculer des dépenses en matières premières et leur mise en œuvre. C'est-à-dire qu'il faut choisir les composants du béton d'une façon convenable dans de proportions bien définies.

Cette méthode repose sur le fait qu'un béton lourd, damé à l'état frais, se rapproche de la compacité absolue, ce qui signifie que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un m^3 est égale au volume de la composition du béton damé.

Les données de base pour effectuer les calculs de cette méthode sont :

- La classe de résistance requise du béton (R_b),
- La grosseur maximale des grains de gros granulats D_{max} ,
- Le degré de fluidité ou de consistance du béton,
- Les caractéristiques des matériaux d'origine :
 - Activité du ciment (R_b),
 - Masse spécifique du ciment,

Masse volumique et Masse spécifique du sable ou du gravier (pierre concassée) à l'état sec.

La porosité des pierres concassées ou du gravier calculé après sa masse volumique apparente et masse spécifique.

La composition du béton est établie approximativement par le calcul ensuite, elle est précisée par la méthode d'essai de dosage expérimental du mélange de béton.

2.8.2. Présentation de la méthode des VOLUMES ABSOLUS

Cette méthode a été pour la première fois formulée par l'académicien de l'ex-URSS B.G. Scramtaiev. Elle a été considérée comme la plus rationnelle au concours en Ex-URSS EN 1960. Le professeur SCRAMTAIEV a établi les relations suivantes, qui donnent la valeur de la résistance du béton (Rb) en fonction du rapport C/E et des quantités du liant et des granulats.

a) Définition du rapport (C/E)

Pour béton C/E < 2,5 béton plastique et TF on a : $R_b = A \cdot R_c [(C/E - 0,5)]$ (1)

Pour béton C/E > 2,5 béton ferme et TF, on a : $R_b = A \cdot R_c [(C/E + 0,5)]$ (2)

Rb : Classe du béton (résistance à la compression du béton a 28 jours)

Rc : Activité ou classe du ciment.

TF : Taux de fines qui est le pourcentage de particules très fines (généralement **passant au tamis de 0,08mm**) présentes dans les granulats (sable surtout).

A, A' : Coefficient admissible d'après le tableau selon les propriétés et la qualité des matériaux.

C/E : Rapport du poids de ciment au poids de l'eau donc l'unité de volume du mélange.

Tableau 3: Coefficient admissible selon les propriétés et la qualité des matériaux

Granulats et liants	A	A'
De qualités supérieures	0,65	0,43
Ordinaires	0,60	0,40
De qualités inférieures	0,55	0,37

b) Détermination de la grosseur maximale des grains de gros granulats Dmax

La grosseur maximale des grains de gros granulats Dmax dans notre étude est : Dmax= 25mm

c) Détermination de la fluidité requise du béton ou la consistance du béton

La fluidité requise du béton est donnée d'après le tableau ci- dessous :

Tableau 4: Fluidité des bétons frais (Abrams, 1958)

Type des constructions ou des éléments de construction	Affaissement du cône d'Abrams (cm)
➤ Lits des fondations des bâtiments et des chaussées, sols ;	0
➤ Revêtements des routes et d'aérodromes, constructions massives sans armatures (murs d'appuis, blocs massifs, fondations) ;	0-2
➤ Dalles, poutres, poteaux de grandes et moyennes sections ;	2-4
➤ Constructions à parois minces à armatures très dense.	4-6

d) Détermination des caractéristiques des matériaux utilisés.

Activité du ciment (R_c).

Masse spécifique du ciment.

Masse volumique et Masse spécifique des granulats [Sable, gravier (pierre concassée)] tamisés et non tamisés.

La porosité du gravier concassé calculée après sa masse volumique apparente et masse spécifique.

e) Détermination de la dépense en eau

D'après le tableau qui tient compte de la qualité des matériaux, la quantité d'eau de gâchage pour $1m^3$ de béton frais par rapport à la grosseur du gros granulats est établie approximativement.

Tableau 5: Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton (BERNIER, 2014)

Propriétés des bétons		Quantité d'eau dans 1m ³ du béton par rapport à la grosseur du gros granulat en (mm)			
Affaissement au cône d'Abrams	Maniabilité, sec	Granulats roulés			
		10	20	40	70
0	200-150	145	130	120	115
0	120-90	150	135	125	120
0	80-60	160	145	130	125
0	50-30	165	150	135	130
0	30-15	175	160	145	140
2-1	-	185	170	155	145
4-3	-	195	180	165	160
6-5	-	200	185	170	165
8-7	-	205	190	175	170
10-9	-	215	200	185	175

Remarque. Il faut donc savoir que :

- Les données du tableau sont justes pour les bétons au ciment portland, au sable moyen et au gravier utilisé comme gros granulat.
- Dans les conditions différentes, la quantité d'eau indiquée dans le tableau augmente :
 - ✓ En cas d'utilisation du ciment portland pouzzolanique, (de 15 à 20 L/m³) ;
 - ✓ Au cas où le gravier est remplacé par des pierres concassées, (de 10 à 18l/m³) ;
 - ✓ Pour le sable fin, (de 10 à 15l/m³).

f) Détermination de la dépense en ciment

Le dosage en ciment est déterminé par la formule suivante :

$$C=[E*\left(\frac{C}{E}\right)] \text{ (Kg)}$$

g) Détermination de la dépense en gravier

La détermination du dosage en agrégats doit remplir la condition suivante : la somme des volumes absolus de tous les composants du béton est égale à 1m^3 (c'est à dire 1000 l).

$$\frac{C}{\rho C} + \frac{E}{\rho E} + \frac{S}{\rho S} + \frac{G}{\rho G} = 1000L \quad (3) \text{ Avec ;}$$

$\rho C, \rho E, \rho S$ et ρG : masses spécifiques de ciment, eau, sable et graviers en (kg/m^3) ;
C, E, S et G sont respectivement les dosages en ciment, eau, sable et graviers en (Kg).

$$E + \frac{S}{\rho S} + \frac{C}{\rho C} = P_g \cdot \frac{G}{\gamma_g} \cdot \alpha \quad (4) \text{ Où}$$

P_g : Porosité des pierres (graviers) ;

$\frac{G}{\gamma_g}$: Volume des pierres(graviers) ;

$P_g \cdot \frac{G}{\gamma_g}$: Volume des vides ;

α : coefficient d'écartement des grains (ou coefficient d'excès de mortier). α est directement donné par le tableau suivant :

Tableau 6: Valeurs du coefficient α en fonction des dosages en eau dans les bétons (BERNIER, 2014)

Dosage en ciment (kg) dans 1m^3 de béton frais	Valeur de α				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,30	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,40	1,46	-	-	-

En résolvant simultanément les équations, (3) et (4), on en détermine la quantité du gravier (kg) pour 1m^3 du béton frais :

$$G = \frac{1000}{p \cdot g \cdot \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}} \quad (5)$$

h) Détermination des dépenses en sable

Après avoir déterminé les dépenses en graviers, on fait le calcul des dépenses en sables pour 1m^3 de béton frais.

La quantité du sable est déterminée à partir de l'équation (3)

$$S = [1000 - (\frac{C}{\rho C} + \frac{E}{\rho E} + \frac{G}{\rho G})] \cdot \rho S \quad (6)$$

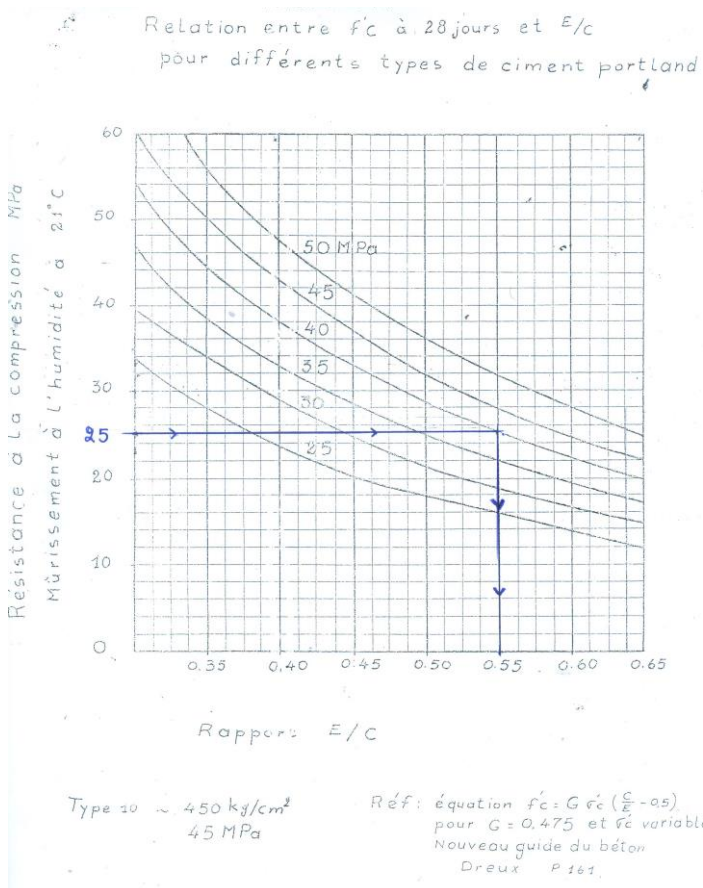
2.8.3. Calculs de la méthode des VOLUMES ABSOLUS

1. Affaissement se trouvent souvent dans l'intervalle de : 50 à 100mm

2. Les dimensions des gros granulats : $\Phi_{\max} = \frac{e}{3} = \frac{100\text{mm}}{3} = 33,3\text{mm}$

Donc le granulats disponible de 16mm de diamètre convient car il est inférieur à 33,3mm

3. Le rapport : $E/C = 0,55$



4. Déterminations du dosage en eau

La quantité d'eau est : 200kg/m^3

5. La quantité du ciment à partir du dosage en eau et du rapport $\frac{E}{C} : \frac{200\text{ l}}{C} = 0,55$

$0,55 \times C = 200\text{kg} \Rightarrow C = \frac{200\text{ l}}{0,55} = 363,64\text{kg}$

6. La teneur en ciment minimale (tableau 4.5) = 320kg/m^3

\Rightarrow On adopte la quantité du ciment max = $363,64\text{kg}$

7. Déterminer le volume du gros granulats en vrac (tableau 4.6)

Module de finesse = 2,70 donc c'est entre 2,60 et 2,80

En interpolant on aura : $0,20\text{m}^3 \left\{ \begin{array}{l} 0,10 \left\{ \begin{array}{l} 2,60 \\ 2,70 \end{array} \right. \\ 2,80 \end{array} \right\} 0,020$

$\Rightarrow \frac{0,020 \times 0,10}{0,20} = 0,01\text{m}^3$

Le volume du gros granulats = $0,64\text{ m}^3 - 0,01\text{m}^3 = 0,63\text{ m}^3$

8. La masse du gros granulats = $\rho_{GX} v = 1600\text{ kg/m}^3 \times 0,63\text{ m}^3 = 1008\text{kg}$

9. Volumes de chacun des ingrédients déjà connu et en déduire le volume du sable à utiliser.

$$\text{Le volume de l'eau} = \frac{200\text{kg}}{1000\text{kg/m}^3} = 0,2 \text{ m}^3$$

$$\text{Le volume du ciment} = \frac{363,64\text{kg}}{3,14 \times 1000\text{kg/m}^3} = 0,116\text{m}^3 \quad (\text{la densité du ciment} \\ = 3,14) ; \text{ car } d_{corp} = \frac{\rho_{corp}}{\rho_{eau}}$$

$$\text{Le volume du gravier} = \frac{1008\text{kg}}{2,75 \times 1000\text{kg/m}^3} = 0,366\text{m}^3$$

$$\text{Volume du sable} = 1\text{m}^3 - V_{\text{eau}} - V_{\text{gravier}} - V_{\text{ciment}}$$

$$\Rightarrow \text{Le volume du sable} = 1\text{m}^3 - 0,2 \text{ m}^3 - 0,366\text{m}^3 - 0,116\text{m}^3 = 0,318\text{m}^3$$

10. La masse du sable à utiliser :

$$B = V_s \times \rho_s$$

$$\text{La masse du sable} = \rho_s \times V_s = 2,70 \times 1000\text{kg/m}^3 \times 0,318\text{m}^3 = 858,6\text{kg}$$

$$\text{La masse du béton frais} = 200\text{kg} + 363,64\text{kg} + 1008\text{kg} + 858,6\text{kg} = 2430,24\text{kg}$$

$$\text{La masse volumique du béton frais } (\rho \text{ en kg/m}^3) = \mu_E + \mu_C + \mu_G + \mu_S$$

$$\text{La masse volumique du béton frais} = 2430,24 \text{ kg/m}^3$$

11. Les proportions des granulats humides nécessaires dans les conditions d'humidité :

$$H = B \left(1 + \frac{h}{100}\right) ; \text{ avec } h = \frac{2}{1000}$$

$$\text{La masse humide de gravier} = \frac{1008\text{kg} \times 100,002}{100} = 1008,02\text{kg}$$

$$\text{La masse du sable humide} = \frac{858,6\text{kg} \times 105}{100} = 901,53\text{kg}$$

Masse de l'eau contenue dans les granulats :

$$\text{Pour sable} : 901,53\text{kg} - 858,6\text{kg} = 42,93\text{kg}$$

$$\text{Pour le gravier} : 1008,02\text{kg} - 1008\text{kg} = 0,02\text{kg}$$

$$\text{Masse de l'eau à utiliser} = 200\text{kg} - (42,93\text{kg} + 0,02\text{kg}) = 157,05\text{kg}$$

Pour l'essai d'affaissement (un cône d'Abrams) ; on a besoin de 16kg

$$\text{Pour les six essais on a besoin de } 16\text{kg} \times 6 = 96\text{kg}$$

$$\text{Total essai d'affaissement et 6 cylindres on a besoin} : 96\text{kg} + 16\text{kg} = 112 \text{ kg}$$

$$\text{Perte} = 10 \% \text{ de } 112\text{kg} \Rightarrow \text{Perte} = \frac{10 \times 112 \text{ kg}}{100} = 11,2 \text{ kg}$$

La masse du béton qu'on a besoin : $112\text{kg} + 11,2\text{kg} = 123,2\text{kg}$

Le coefficient multiplicateur $= \frac{123,2\text{kg}}{2430,24\text{kg}} = 0,05$

Les masses à ajouter pour assurer la sécurité ; Donc au total on aura besoin de :

Masse d'eau = $157,05\text{kg} \times 0,05 = 7,85\text{ kg}$ **Eau : 164,9kg**

Masse du ciment = $363,64\text{kg} \times 0,05 = 18,18\text{ kg}$ **C : 381,82kg**

Masse du sable = $858,6\text{kg} \times 0,05 = 42,93\text{ kg}$ **S : 901,53kg**

Masse du gravier = $1008\text{ kg} \times 0,05 = 50,4\text{kg}$ **G : 1058,4 kg**

La masse totale : $7,85\text{ kg} + 18,18\text{ kg} + 42,93\text{ kg} + 50,4\text{kg} = 119,36\text{ kg}$

Donc au total on aura besoin de : $164,9\text{kg} + 381,82\text{kg} + 901,53\text{kg} + 1058,4\text{ kg} = \mathbf{2506,65\text{kg}}$

2.9. Normes et recommandations relatives au tamisage des granulats

Les principales normes auxquelles nous nous sommes conformés encadrant le tamisage sont :

NF EN 933-1 : définit les méthodes de tamisage et de détermination de la granularité ;

NF EN 12620 : spécifie les caractéristiques des granulats pour béton, y compris les plages granulométriques acceptables ;

NF EN 12390-1 à 12390-7 qui régissent les essais de compression sur des éprouvettes en béton ;

NF P18-560 : norme française complémentaire traitant des essais de granulométrie par tamisage ;

ASTM C136 : norme américaine décrivant les procédures de tamisage pour granulats fins et grossiers.

Ces normes précisent les dimensions des tamis, les modalités de séchage, les conditions de tamisage, de lavage, les erreurs admissibles, les méthodes de calcul des pourcentages, et les critères de classification selon la dimension des particules.

2.10. Conclusion

La distribution granulométrique des granulats joue un rôle crucial dans la performance mécanique du béton. Une granulométrie bien maîtrisée favorise la compacité, réduit les vides, améliore la résistance à la compression et facilite la mise en œuvre. Le chapitre suivant présentera la méthodologie expérimentale adoptée pour évaluer ces influences dans le cadre de ce mémoire.

CHAPITRE 3 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE : CAS DES GRANULATS DE LA RIVIÈRE NTAHANGWA À BUJUMBURA

3.1 Introduction

Le présent chapitre présente la méthodologie adoptée pour évaluer l'impact du tamisage des granulats sur la résistance à la compression du béton. Elle décrit les matériaux utilisés, les procédures de préparation des échantillons, les essais réalisés ainsi que les conditions de conservation.

3.2. Objectif de l'étude expérimentale

Dans ce chapitre, nous allons procéder à la présentation des matériaux locaux utilisés dans la partie expérimentale réalisée au laboratoire des matériaux de construction à l'université du Burundi campus Kiriri (FSI & ISSA) puis les essais réalisés au sein de l'OBuha dans le Département des Etudes et Laboratoire (OBuha/DEL), à la description des méthodes et du matériel utilisés dans cette étude ainsi que les essais physico-mécaniques effectués sur l'ensemble des variantes étudiées sur la composition des constituants du mélange du béton. L'objectif principal de cette étude est de comparer la résistance à la compression du béton fabriqué à partir des granulats tamisés et non tamisés, tous issus de la rivière Ntakangwa. L'étude vise à démontrer l'impact du tamisage sur la performance mécanique du béton et à identifier les avantages potentiels d'un traitement préalable des granulats. Selon Santos (2018,2020), le tamisage des granulats améliore généralement la qualité du béton en réduisant les impuretés et en favorisant une meilleure compacité.

3.3. Origine et nature des matériaux

3.3.1. Granulats de la rivière Ntakangwa

Les granulats utilisés proviennent directement du lit de la rivière Ntakangwa, une rivière qui traverse la ville de Bujumbura. Ce sont des granulats roulés, souvent utilisés localement pour la construction, en raison de leur accessibilité et de leur coût réduit. Les granulats roulés sont réputés pour leur forme arrondie, ce qui peut entraîner une diminution de la résistance à la compression en raison de la moindre interconnexion entre les particules (Aïssaoui & El Moumen, 2019).

3.3.2. Présentation du site d'échantillonnage : la rivière Ntakangwa

La rivière Ntakangwa est une rivière urbaine qui prend sa source dans les collines de la province de Bujumbura et se jette dans le lac Tanganyika. Elle traverse des zones à forte densité urbaine, recevant divers apports alluviaux et parfois des matériaux pollués en période de crue. Le site de prélèvement se situe à hauteur des quartiers BWIZA (Jabe) et BUYENZI, une zone où les extractions sont fréquentes pour l'usage local en construction. Selon Nduwimana (2020), ce site est représentatif des caractéristiques locales des granulats alluviaux, qui peuvent varier considérablement en fonction de la saison et de l'activité humaine (lavage de véhicules, rejets domestiques).

3.3.3. Choix du site d'échantillonnage

3.3.3.1 But principal

Le but principal est de prélever des granulats représentatifs de la rivière Ntakangwa afin de comparer, de manière fiable et reproductible, l'effet du tamisage sur les propriétés physiques et la contribution à la résistance en compression du béton.

3.3.3.2. Objectifs spécifiques

- Obtenir des échantillons suffisamment volumineux et homogènes pour fabriquer les formulations expérimentales (granulats tamisés et non tamisés) et pour réaliser les essais physico-mécaniques (granulométrie, Los Angeles, micro-Deval, Equivalent de sable, densité, porosité, etc.)
- Prendre des échantillons répliqués (répétitifs) pour évaluer la variabilité spatiale (hétérogénéité des matériaux fluviaux)

3.3.3.3. Critères de choix

1⁰ Représentativité : Site qui reflète les usages locaux (zones d'extraction, zones bâties, zones naturelles)

2⁰ Accessibilité et sécurité : accès stable pour l'équipe et le matériel, absence de risque majeur (crues, circulation)

3⁰ Variabilité géomorphologique : points avec différents profils (partie en Amont du pont à côté du pont, en aval du pont, banc de graviers exposés).

4⁰ Influences anthropiques : un site proche des ponts de rejet, routes et chantiers pour capturer possible contamination, et un site plus naturel pour comparaison.



Prélèvement et transport d'échantillons (sable et gravier) de la rivière Ntakangwa. Photo du 22/8/2025

Figure 2: Prélèvements d'échantillons dans la rivière Ntakangwa à Bujumbura.

« Source : photos prises par l'auteur »

3.3.4. Défis et traitements spécifiques des granulats extraits de la rivière Ntakangwa

Les granulats extraits de la rivière Ntakangwa à Bujumbura présentent des caractéristiques particulières.

3.3.4.a) Caractéristiques naturelles

Les granulats de la rivière Ntakangwa sont principalement roulés, avec une forme arrondie, peu angulaire. Cette forme améliore la maniabilité mais peut réduire l'adhérence avec la pâte de ciment (Neville & Brooks, 2010).

Ils présentent une variabilité granulométrique importante en raison du mode d'extraction artisanal, ce qui rend le tamisage essentiel pour homogénéiser les matériaux avant leur incorporation dans le béton.

3.3.4.b) Présence d'impuretés

Ces granulats contiennent souvent des fines argileuses, voire des matières organiques en période de crue. Leur granulométrie est souvent irrégulière, car peu ou pas tamisés avant usage. C'est cela qui justifie l'usage de tamisage humide et de lavage systématique.

3.3.4.c) Traitements spécifiques recommandés

- Pré tamisage sur site pour éliminer les éléments trop grossiers ou fins ;
- Tamisage de contrôle en laboratoire pour l'analyse granulométrique ;
- Lavage à l'eau claire pour éliminer les particules fines nuisibles ;
- Stockage sur dalles propres pour éviter la contamination par le sol.

Ces traitements permettent d'améliorer la qualité des granulats de Ntakangwa et de garantir une formulation plus performante du béton.

Ces conditions pourraient souligner la nécessité du tamisage pour éliminer les fines, ajuster la granulométrie et assurer une compacité optimale. Un tamisage soigné, accompagné d'un lavage éventuel, permet d'améliorer significativement la qualité des granulats et donc la résistance du béton produit (Mamlouk & Zaniewski, 2017).

Deux types d'échantillons ont été prélevés :

Granulats non tamisés : Utilisés dans leur état brut après extraction ;

Granulats tamisés : Séchés et classés selon des tamis normalisés conformément à la norme NF EN 933-1 (2012).

3.4. Les granulats non tamisés

3.4.1. Les granulats non tamisés

Les granulats non tamisés sont utilisés tels qu'extraits du site naturel, sans opération préalable de tri granulométrique. Cela signifie qu'ils contiennent un mélange hétérogène de particules de tailles variées, allant des fines particules aux gros cailloux. Cette hétérogénéité peut influencer négativement la compacité du béton, sa mise en œuvre et sa résistance mécanique finale (Neville, 2010). En l'absence de tamisage, ces granulats peuvent contenir des impuretés (argiles, matières organiques, particules fines excédentaires) qui affectent l'adhérence pâte-ciment/granulats et altèrent la durabilité du béton (Santos, 2018).

3.4.2. Méthodologie utilisée pour le prélèvement d'un échantillon

Le prélèvement d'un échantillon se définit comme une opération qui consiste à collecter une quantité représentative des matériaux (ici, des granulats) depuis une source (rivière, carrière, stock, etc.), dans le but de l'analyser ou de l'utiliser pour des essais en laboratoire.

Objectif :

Obtenir un échantillon qui reflète fidèlement les caractéristiques moyennes du gisement ou du stock, afin que les résultats des essais soient valides et applicables à l'ensemble du matériau.

Le prélèvement a été effectué manuellement sur les berges de la rivière Ntakangwa, selon une procédure visant à obtenir un échantillon représentatif :

Zone ciblée : Trois points de prélèvement espacés sur un tronçon de 100 mètres de la rivière, afin de capter la variabilité naturelle des dépôts.

Technique : Utilisation de pelles et de seaux pour prélever à différentes profondeurs (5–50 cm).

Poids total prélevé : Environ 450 kg, répartis équitablement sur les trois points.

Mélange et homogénéisation : Sur bâche propre, pour constituer un échantillon composite.

Transport : Les granulats ont été ensachés dans des sacs plastiques solides et étiquetés.

Cette méthodologie suit les recommandations de la norme NF EN 932-1 (AFNOR, 1997) relative à la qualité des échantillons d'agrégats pour essais physiques.

3.4.3. Étapes typiques du prélèvement :

1⁰. Choix du point de prélèvement : différents endroits du tas ou de la rivière.

2⁰. Nombre de prélèvements partiels : plusieurs petites quantités (souvent 3 à 5) prises à différents endroits pour éviter les biais.

3⁰. Mélange et homogénéisation : les prélèvements partiels sont mélangés pour constituer un échantillon composite.

4⁰. Réduction de l'échantillon : on peut réduire la masse de l'échantillon à l'aide de techniques comme le quartage, pour obtenir une quantité compatible avec les essais de laboratoire.

3.5. Les granulats tamisés

Les granulats tamisés sont obtenus après une opération de séparation granulométrique visant à éliminer les particules trop fines ou trop grosses, et à obtenir une répartition bien définie des tailles de grains. Le tamisage améliore la compacité du squelette granulaire, réduit la porosité du béton, et favorise une meilleure répartition des contraintes mécaniques (Aïssaoui & El Moumen, 2019).

Un échantillon de tamisage (sable et graviers) est une portion représentative de granulats (sable ou graviers) prélevée dans le but de déterminer leur distribution granulométrique, c'est-à-dire la répartition des tailles de particules qui le composent.

3.5.1. Objectif du tamisage

Le tamisage permet :

- De connaître la granulométrie des granulats,
- D'identifier leur module de finesse (pour le sable),
- De vérifier leur conformité aux normes de béton (NF EN 933-1, NF EN 12620),
- D'évaluer leur compacité, leur homogénéité, et leur influence sur la résistance du béton.

3.5.2. Constitution d'un échantillon de tamisage

3.5.2.1 Pour le sable (granulats fins)

Poids recommandé : 0,5 à 1 kg pour les essais de laboratoire.

Série de tamis utilisée : 4 mm – 2 mm – 1 mm – 0,5 mm – 0,25 mm – 0,125 mm – 0,063 mm

Méthode : Séchage du sable au soleil ou à 105 °C pour éliminer l'humidité, Pesée initiale,

Tamisage à sec pendant 10 minutes à l'aide d'un tamiseur vibrant,

Pesée de la fraction retenue sur chaque tamis.

3.5.2.2 Pour les graviers (granulats grossiers)

Poids recommandé : 3 à 5 kg.

Série de tamis utilisée : 32 mm – 25 mm – 20 mm – 16 mm – 12,5 mm – 10 mm – 8 mm.

Méthode : similaire au sable (séchage, tamisage, pesées).

3.5.2.3. Résultats attendus

Courbe granulométrique : graphique du pourcentage des passants cumulés suivant la taille des tamis.

Module de finesse (MF) : applicable surtout pour le sable.

Évaluation de la courbe idéale selon les exigences d'un béton de qualité (compacité, faible porosité).

Normes de référence

NF EN 933-1 : Tamisage pour déterminer la granulométrie.

NF P18-560 : Module de finesse du sable.

NF EN 12620 : Spécifications des granulats pour béton.

3.5.3. Processus de tamisage appliqué

Tamisage à sec réalisé en laboratoire à l'aide d'un ensemble de tamis normalisés de diamètre décroissant : 20 mm, 16 mm, 12,5 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm et 0,063 mm.

Fraction retenue pour l'étude : Granulométrie conforme aux exigences du béton ordinaire (particules de 4 mm à 20 mm).

Matériels utilisés : Tamis mécaniques vibrants, balance de précision, étuves.

Temps de tamisage : 10 minutes par échantillon de 5 kg.

Élimination des fines : Les particules passant au tamis 0,063 mm ont été rejetées pour éviter une demande en eau excessive et un affaiblissement de la pâte de ciment.

Cette opération a été conduite selon la norme NF EN 933-1 (2012) et permet d'obtenir des granulats plus propres, homogènes et compacts, favorisant une résistance à la compression plus élevée du béton (Neville, 2010 ; Mehta & Monteiro, 2014).

3.6. Réalisation de différents essais au laboratoire des matériaux de construction à Kiriri (FSI&ISSA) et à l'OBuha/Département des Etudes et Laboratoire

3.6.1. Essai Los Angeles

3.6.1.1. Matériels utilisés

Tambour de Los Angeles avec compteur de tours

Billes d'acier normalisées (11-12)

Balance de précision

Tamis de 1,6 mm

Four pour séchage à 105 °C

3.6.1.2. Réalisation de la granulométrie pour l'essai Los Angeles

	Granulats tamisés	Granulats non tamisés
Diamètres Maximal des Tamis (Ø)	Masses des Refus Cumulés (en grammes)	Masses des Refus Cumulés (en grammes)
31,50	130	1760
25	1009	2653
20	3429	2747
16	3805	3265
12,50	4102	3558
10	4522	3909
8	4805	4111
6,3	5000	5000

Ainsi, dans le tambour tournant on a utilisé pour les granulats tamisés 12 boules de 437g chacune c'est à dire 5244g au total et 11 boules c'est-à-dire 4807g au total pour les granulats non tamisés au moment de la réalisation de l'essai Los Angeles.

Enfin, après 500 tours, on a fait le tamisage à l'aide du tamis de 1,6mm pour éliminer les éléments inférieurs à cette dimension de 1,6mm.



Pesée et tamisage de gravier

Photos du 25/8/2025



Fixation et mise en marche du tambour de Los Angeles

Elimination des éléments inférieurs à 1,6

Figure 3: Photos de réalisation de l'essai Los Angeles
 « Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.1.3. Résultats de l'essai

Tableau 7: Résultats d'essais LOS ANGELES

Tous venants	Masse prise d'essai en g (M)	Masse des éléments après les essais en g		Formule $\frac{m}{M} \times 100$	Coeff.LA
		> 1,6mm (m')	<1,6mm (m) (M-m')		
De la rivière Ntahangwa					
Granulats non tamisés	5000	3553,5	1446,5	$\frac{1446,5}{5000} \times 100$	28,93 %
Granulats tamisés	5000	3971	1029	$\frac{1029}{5000} \times 100$	20,58 %

LES CONCASSES DE LA RIVIERE NTAHANGWA	Masse prise d'essai en g (M)	Masse des éléments après les essais en g		Formule $\frac{m}{M} \times 100$	Coeff.LA
		> 1,6mm (m')	<1,6mm (m) (M-m')		
Granulats non tamisés	5000	2904	2096	$\frac{2096}{5000} \times 100$	41,92 %
Granulats tamisés	5000	3468	1532	$\frac{1532}{5000} \times 100$	30,64 %

« Source : établi par l'auteur ».

3.6.2. Essai Micro-Deval

3.6.2.1. Matériels utilisés

Appareil Micro-Deval

Bagues d'usure et jarres

Eau distillée

Billes d'acier

Tamis de 1,6 mm

Etuve pour séchage à 105 °C.

3.6.2.2. La granulométrie

	Granulats tamisés	Granulats non tamisés
Diamètres Maximal des Tamis (Ø)	Masses des Refus Cumulés (en grammes)	Masses des Refus Cumulés (en grammes)
16	20	-
12,50	126	-
10	233	-
8	355	-
6,3	500	500
Durée	10h30-12h30	11h16-13h16

Avec mêmes granulats, on prend une masse de 500g sur les tamis de 16 à 6,3mm. On y ajoute 2,5l d'eau avec 2000g de petites billes d'acier puis l'appareil micro-Déval fait tourner le mélange pendant 2heures.



Tamissage et pesée de granulats pour l'essai micro-Deval



Fixation de l'appareil micro-Deval

Cylindre de l'appareil micro-Deval en rotation

Photo du 26/8/2025

Figure 4: Photos de réalisation de l'essai Micro-Deval
« Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.2.3. Résultats de l'essai

Tableau 8: Tableau des résultats d'essais Micro-DEVAL

Types de granulats	Masse prise d'essai en g (M)	Masse des éléments après les essais en g			Formule $\frac{m}{M} \times 100$	COEFF. Micro-DEVAL
		(M_h)	> 1,6mm (M_s)	<1,6mm (m) ($M-M_s$)		
Granulats non tamisés	500	445	370	130	$\frac{130}{500} \times 100$	26 %
Granulats tamisés	500	369	438	62	$\frac{62}{500} \times 100$	12,4 %

« Source : établi par l'auteur ».

3.6.3. Essai d'analyse granulométrique

3.6.3.1. Matériels utilisés

Colonne de tamis normalisés (0,08 à 32 mm) ; Agitateur mécanique de tamis

Balance de précision ; Bac de prélèvement ; Brosse souple



Disposition et conservation des tamis au laboratoire



Tamisage successif sur les tamis de 25 et

Pesée des tamisats

Photos du 3/9/2025

Figure 5: Photos de réalisation de l'Analyse granulométrique des graviers

« Source : photos prises par l'auteur ».

Tableau 9: Résultats d'analyses granulométriques

3.6.3.2. Analyse granulométrique des graviers non tamisés

Poids utilisé pour l'essai (g)	Ouverture Ø des tamis (mm)	Module des tamis	Poids du refus cumulé	% des Refus cumulés	Complément A 100% des Refus Cumulés
2000	63	0	0	0	100
	31,5		600	30	70
	16		1060	53	47
	8		1330	66,5	33,5
	4		1460	73	27
	2		1570	78,5	21,5
	1		1660	83	17
	0,5		1790	89,5	10,5
	0,25		1870	93,5	6,5
	0,125		1890	94,5	5,5
	0,0625		2000	0	0
	Fond	-	-	-	-
$M_f = \frac{100 + 70 + 47 + 33,5 + 27 + 21,5 + 17 + 10,5 + 6,5 + 5,5}{100} = \frac{3385}{100} = 3,385$					

3.6.3.3. Analyse granulométrique des graviers tamisés

Poids utilisé pour l'essai (g)	Ouverture Ø des tamis (mm)	Module des tamis	Poids du refus cumulé	% des Refus cumulés	Complément A 100% des Refus Cumulés
2000	63		0	0	100
	31,5		130	6,5	93,5

	16		1730	86,5	13,5
	8		1980	99	1
	4		2000	100	0
	$M_f = \frac{93,5 + 13,5 + 100 + 1}{100} = \frac{208}{100} = \mathbf{2,08}$				

3.6.3.4. Analyse granulométrique du sable

	Fraction et Masse	Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaires (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
		8	0	0	100
		4	10	0,05	99,95
		2	80	4	96
		1	420	21	79
		0,5	1410	70,5	29,5
		0,25	1900	95	5
		0,125	1940	97	3
		0,0625	2000	100	0
		Fond	-	-	-
		$M_f = \frac{99,95 + 96 + 79 + 29,5 + 5 + 3 +}{100} = \frac{312,45}{100} = \mathbf{3,1245}$			

3.6.3.5. Résultats de l'essai

Les granulats non tamisés révèlent des discontinuités, avec des excès de fines et de gros éléments mal répartis.

Les granulats tamisés présentent une courbe granulométrique continue et bien répartie, avec un bon étalement des tailles de grains. Cela se traduit par une meilleure compacité potentielle des granulats tamisés (ACI Committee 211, 2002).

3.6.4. Module de Finesse

3.6.4.1. Matériels utilisés

Tamis normalisés (0,16 mm à 5 mm)

Agitateur de tamis

Balance ; Sable sec

3.6.4.2. Résultats

Type d'échantillons	Module de finesse (MF)
Granulats non tamisés (sable grossier)	= 3,12
Granulats tamisés (sable moyen)	= 2,76

Un sable trop grossier peut réduire la cohésion du béton, tandis qu'un sable moyen favorise une bonne maniabilité (Mehta & Monteiro, 2014).

3.6.5. Essai d'équivalent de sable

3.6.5.1. Matériels utilisés

Cylindre gradué transparent de 40cm de haut (\varnothing intérieur \approx 40 mm).

Solution de lavage (Mélange d'eau distillée + solution de chlorure de calcium et formaldéhyde selon la norme)

Eprouvette de Sable séché à l'air (40g à 50 g)

Pipette et entonnoir

Agitateur mécanique ou manuel

Tige de battage

Chronomètre



Pesée de 110g du sable tamisé



Mise du sable, puis mélange avec l'eau dans une éprouvette graduée



Attente de la sédimentation (20 min)



Mise de l'éprouvette dans l'agitateur mécanique

Photos du 03/9/2025



Agitation et suspension des particules fines pendant 30secondes



Placement de l'éprouvette sur un support horizontal



Attente de la décantation de la solution (10min)



Lecture des hauteurs des deux niveaux

Photos du 03/9/2025

Figure 6: Photos de réalisation de l'essai d'équivalent de sable
 « Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.5.2. Résultats pour le sable non tamisé

$ES = \frac{H2}{H1} \times 100$		1^{er} ESSAI	2 ^{ème} ESSAI
	NUMERO DE L'EPROUVETTE	1	M
	POIDS DE L'ECHANTILLON (Grf) A 0 % D'EAU	110,0	110,0
	NIVEAU H1	7,9	8,4
	NIVEAU H2	5,1	5,6
	$ES = \frac{H2}{H1} \times 100$	64,55	66,66
	VALEUR MOYENNE	65,6 %	

3.6.5.3. Résultats pour le sable tamisé

$ES = \frac{H2}{H1} \times 100$		1 ^{er} ESSAI	2 ^{ème} ESSAI
	NUMERO DE L'EPROUVETTE	1	M
	POIDS DE L'ECHANTILLON (Grf) A 0 % D'EAU	110,0	110,0
	NIVEAU H1	8.9	9
	NIVEAU H2	8,4	8,8
	$ES = \frac{H2}{H1} \times 100$	94,38	97,77
	VALEUR MOYENNE	96,08 %	

3.6.6. Caractéristiques physico-mécaniques des granulats

Une caractérisation complémentaire a été réalisée en laboratoire pour les granulats prélevés, portant sur la densité apparente, la densité absolue ainsi que l'absorption d'eau.

3.6.6.1. Densité apparente

3.6.6.1.a) Matériels utilisés

Cylindre métallique de volume connu

Balance

Règle de nivellement



Remplissage du récipient de 5000ml



Pesée du récipient échantillon



Remplissage du sable dans le récipient de 2000ml



Pesée de la masse de l'échantillon + récipient

Photos du 3/9/2025

Figure 7: Photos de réalisation de l'essai de densité apparente des granulats
« Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.6.1.b) Résultat de la densité apparente pour les graviers non tamisés

No de l'échantillon	Masse du récipient(g)	Volume (ml)	Masse du récipient+ échantillon(g)	Masse de l'échantillon (g)	Densité apparente
1	3288	5000	11430	8142	1.62
2	3288	5000	11426	8138	1.62
3	3288	5000	11433	8150	1.63
MOYENNE=1.62					

3.6.6.1.c) Résultat de la densité apparente pour les graviers tamisés

No de l'échantillon	Masse du récipient(g)	Volume (ml)	Masse du récipient+ échantillon(g)	Masse de l'échantillon (g)	Densité apparente
1	3288	5000	11518	8230	1.646
2	3288	5000	11500	8212	1.642
3	3288	5000	11520	8232	1.646
					MOYENNE=1.64

3.6.6.1.d) Résultat de la densité apparente pour le sable non tamisé

No de l'échantillon	Masse du récipient(g)	Volume (ml)	Masse du récipient+ échantillon(g)	Masse de l'échantillon(g)	Densité apparente
1	1690	2000	4340	2650	1.36
2	1690	2000	4289	2599	1.39
3	1690	2000	4380	2690	1.42
					MOYENNE=1.39

3.6.6.1.e) Résultat de la densité apparente pour le sable tamisé

No de l'échantillon	Masse du récipient (g)	Volume (ml)	Masse du récipient+ échantillon(g)	Masse de l'échantillon (g)	Densité apparente
1	1690	2000	4600	2910	1.45
2	1690	2000	4572	2882	1.44
3	1690	2000	4590	2900	1.45
					MOYENNE=1.44

3.6.6.2 Détermination de la densité absolue par pesée hydrostatique

3.6.6.2.a) Matériels utilisés

Pycnomètre
 Balance hydrostatique
 Eau distillée
 Étuve



Choix de l'échantillon(2000g)



Mise du mélange échantillon + eau sur un pycnomètre



Lecture de la densité absolue par pesée hydrostatique

Photos du 3/9/2025

Figure 8: Photos de réalisation de l'essai de densité absolue des granulats
 « Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.6.2.b) Résultats pour les graviers non tamisés

N° de L'échantillon	Poids de l'échantillon dans l'air (g)	Poids de l'échantillon dans l'eau + Panier (g)	Poids du Panier (g)	Poids de L'échantillon (g)	Volume de L'échantillon (ml)	Ys g/cm ³
1	2000	1838	635	1203	797	2.50
2	2000	1852	635	1217	783	2.55
3	2000	1865	635	1230	770	2.60
MOYENNE=2.55						

Avec : Poids de l'échantillon = (Poids de l'échantillon dans l'eau + panier) - Poids du panier
 Volume de l'échantillon = Poids de l'échantillon dans l'air – Poids de l'échantillon

$$\gamma_s = \frac{\text{Poids de l'échantillon dans l'air}}{\text{Volume de l'échantillon}}$$

3.6.6.2.c) Résultats pour les graviers tamisés

N° de L'échantillon	Poids de l'échantillon dans l'air (g)	Poids de l'échantillon dans l'eau + Panier (g)	Poids du Panier (g)	Poids de L'échantillon (g)	Volume de L'échantillon (ml)	Ys g/cm ³
1	2000	1882	635	1247	753	2.65
2	2000	1875	635	1240	760	2.63
3	2000	1880	635	1245	755	2.64
						MOYENNE = 2.64

3.6.6.3. Essai de détermination du coefficient d'aplatissement et d'élongation

3.6.6.3.a). Matériels utilisés

Du matériel de tamisage et de préparation d'échantillons

Balance de précision

Récipients et plateau de pesée

Des gabarits normalisés (calibres d'aplatissement et d'élongation): appareil métallique comportant des ouvertures de dimensions égales à 1, 8× la dimension nominale des granulats servant à vérifier l'aplatissement ou l'allongement).

3.6.6.3.b). Résultats du coefficient d'aplatissement et d'élongation des granulats.

<i>Tamisage Sur tamis</i>					
<i>Classes granulaires d/D (mm)</i>	<i>M_{gi}</i>	<i>APLATISSEMENT</i>		<i>ELONGATION</i>	
		<i>Passant</i>	<i>Refus</i>	<i>Passant</i>	<i>Refus</i>
		<i>M_{ei} (g)</i>	<i>A_i</i>	<i>M_{ei} (g)</i>	<i>A_i</i>
6.3-10	111,7	50,1	61,6	45,4	76,1
10.-14	250,7	111,7	139	95,2	135,1
14-20	500,1	250,7	249,4	201,7	105,2
20-31,5	500	500	0	157,7	136,8
$\sum M_{ei} =$		912,5		500,0	
$M = \sum M_{gi} =$	1362,5				
$M_0 = \sum A_i =$			450		453,2
$A = (\sum M_{ei} / \sum M_{gi}) \times 100 =$		66,97		36,70	

3.6.6.4. Essai de porosité

3.6.6.4.a) Matériels utilisés

Balance hydrostatique

Récipient de saturation

Éprouvettes, Etuve de séchage des échantillons.



Pesée, lavage et essuyage des granulats (de 1000g de l'échantillon)



Mise d'échantillons dans l'étuve (24h)

Détermination de la masse sèche des échantillons

Photos du 3/9/2025

Figure 9: Photos de réalisation de l'essai de porosité des granulats
« Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.6.4.b) Résultats pour les graviers non tamisés

M0	M1	POROSITE en %
1000g	972g	
$\text{Por} = \frac{M0-M1}{1000} * 100$		$\frac{1000-972}{1000} * 100 = 2,8$

3.6.6.4.c) Résultats pour les graviers tamisés

M0	M1	POROSITE en %
1000g	982,2g	
$\text{Por} = \frac{M0-M1}{1000} * 100$		$\frac{1000-982,2}{1000} * 100 = 1,78$

3.6.6.5. Essai de propreté

3.6.6.5.a) Résultats pour les graviers non tamisés

M _{GS}	M _S	PROPRETE en %
1000g	250g	
$\text{Pro} = \frac{M_{GS}-M_S}{1000} * 100$		$\frac{1000-250}{1000} * 100 = 75$

3.6.6.5.b) Résultats pour les graviers tamisés

M _{GS}	M _S	PROPRETE en %
1000g	110g	
$\text{Pro} = \frac{M_{GS}-M_S}{1000} * 100$		$\frac{1000-110}{1000} * 100 = 89$

Avec :M₀ = Masse humide des graviers

M₁ = Masse Sèche des graviers

M_{GS} = Masse brute des graviers + saletés

M_S = Masse des saletés

3.6.6.6. Résultats de la compacité

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue. Il s'agit donc du volume absolu des grains au volume apparent du matériau (Mamlouk & Zaniewski, 2017).

La compacité $C=1-n$ selon Mamlouk, M.S., & Zaniewski, J.P. (2017)

Type d'échantillons	Valeur de la Compacité
Granulats non tamisés	= 97,2 %
Granulats tamisés	= 98,22 %

3.6.6.7. Résultats de l'indice des vides

L'indice des vides pour un matériau est le rapport de son volume de vides sur le volume du solide.

Indice de vides $e = n / (1 - n)$ selon Neville, A.M. (2011), Foret, R. (1994)

Type d'échantillons	Indice des vides
Granulats non tamisés	= 0,029
Granulats tamisés	= 0,018

3.6.6.8. Résultats de l'absorption d'eau

Type de granulats	Masse humide en (g)	Masse sèche en (g)	Masse d'eau absorbée en (g)
Granulats non tamisés	1000	972	28
Granulats tamisés	1000	982,2	17,8

Ces propriétés influencent fortement l'ouvrabilité et la résistance du béton (Neville, 2010 ; Aïssaoui & El Moumen, 2019).

3.6.6.9. Choix de la dimension maximale, Dmax

Granulats tamisés : Dmax = 25 mm

Granulats non tamisés : Dmax = 31,5 mm

Un Dmax trop élevé peut induire une ségrégation dans le béton.

3.6.7. Classe des granulats

Selon la norme NF EN 12620, les granulats ont été classés en :

Granulats tamisés : 0/4 mm (sable : sable de rivière propre et bien gradué) ;

: 5/8 ; 8/16 ; 16/25mm (graviers) ;

Granulats non tamisés : mélange hétérogène non classé (graviers)

: mélange hétérogène non classé (sable)

Tableau 10: Tableau des résultats des essais de laboratoire caractéristiques des granulats utilisés

N ₀	Types ou paramètres caractéristiques des essais nécessaires aux granulats issus de la rivière NTAHANGWA	Granulats non tamisés		Granulats tamisés	
		Graviers	Sable	Graviers	Sable
1	Coefficient LA	28,93 %	-	20,58 %	-
2	Coefficient MDA	28 %	-	12,4 %	-
3	Module de Finesse (MF)	3,38%	2,76%	2,08%	3,12%
4	Equivalent de sable (ES)	-	65,6 %	-	96,08 %
5	Densité apparente	1,62 t/m ³	1,39 t/m ³	1,64 t/m ³	1,44 t/m ³
6	Densité absolue	2,54 g/cm ³	-	2,64 g/cm ³	-
7	Coefficient d'Aplatissement	-	-	66,97	-
8	Coefficient d'Elongation	-	-	36,70	-
9	Porosité	2,8 %	-	1,78 %	-
10	Propreté	75 %	-	89 %	-
11	Compacité	97,2 %		98,22 %	
12	Indice des vides	0,029		0,018	
13	Absorption d'eau	28 g		17,8 g	
14	Affaissement pour les bétons fabriqués avec (Slump test)	6,5 cm		4,8 cm	

« Source : établi par l'auteur »

3.6.8. Autres matériaux

Ciment : Ciment Portland CEM II/B DANGOTE 42,5R, conforme à NF EN 197-1 ;

Eau : Eau du robinet de laboratoire des matériaux (FSI & ISSA) et de OBUHA/DEL. Il s'agit d'une eau potable conforme à la norme NF P18-303 (Institut Européen de Normalisation, 2013).

3.6.9. Application de la méthode des volumes absolus (méthode SCRAMTAIEV)

3.6.9.A. Calcul de la composition du béton réalisé avec des granulats non tamisés

3.6.9.A.a) Les données nécessaires

- La grosseur maximale des grains du gros granulat : $D_{max} > 25\text{mm}$;
- La fluidité requise du béton frais est donnée dans le tableau.III-22

3.6.9.A.b) Caractéristiques des matériaux utilisés

- R_b : Classe du béton, $R_b=30$
- R_c : Activité ou classe du ciment, $R_c=42,5$
- A, A' : Coefficient admis d'après le tableau selon les propriétés et la qualité des matériaux ;

$A=0,60$ pour le béton ordinaire et $0,55$ pour le béton de qualité inférieure.

Pour le cas ci-présent, $A=0,55$ car c'est un béton de qualité inférieure.

- Le rapport $\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A.R_c} + 0,5 = \frac{30}{0,55 \times 42,5} + 0,5 = 1,783$
 $\frac{E}{C} = \frac{1}{1,676} = 0,56$

3.6.9.A.c) Détermination de la quantité d'eau de gâchage pour 1m^3 de béton frais

- L'affaissement $A_f=6\text{cm}$
Affaissement se trouvent souvent dans l'intervalle de : 50 à 100mm
- La dimension maximale du gros granulat : $D_{max}=16\text{mm}$
Les dimensions des gros granulats (Tableau 4.2) : $\Phi_{max} = \frac{e}{3} = \frac{100\text{mm}}{3} = 33,3\text{mm}$
Donc le granulat disponible de 16mm de diamètre convient car il est inférieur à $33,3\text{mm}$
- La quantité d'eau dans 1m^3 de béton par rapport à la dimension maximale du gros granulat
 $E=200\text{L}$.

3.6.9.A.d) Détermination de la quantité de ciment pour 1m^3 de de béton frais

$$C = E \cdot \left(\frac{C}{E}\right) \Rightarrow C = 200 \times 1,783 = 356,6\text{kg}$$

3.6.9.A.e) Détermination du coefficient d'écartement α

$$\alpha = 1,44 \quad \frac{E}{C} = 0,56 \approx 0,6$$

Tableau 11: Tableau de choix du coefficient d'écartement α

Dosage en ciment (kg) dans $1m^3$ de béton frais	Valeur de α				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,30	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,40	1,46	-	-	-

3.6.9.A.f) A partir des équations (3) et (4), on détermine la quantité du gravier (kg) pour $1m^3$ de béton

Pour le gravier de classe $4/16$

$$\rho_g=0,48 \quad ; \gamma_g=1,36 \quad ; \rho_g=3,2 \quad ; \alpha=1,44$$

$$G = \frac{1000}{p \cdot g \cdot \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}} = \frac{1000}{0,48 \cdot \frac{1,44}{1,36} + \frac{1}{3,2}} = \mathbf{1218,4196kg}$$

3.6.9.A.g) Calcul de la quantité du sable (Kg) pour $1m^3$ de béton frais

$$\rho_c=31 \quad ; \rho_E=1 \quad \rho_G=3,5 \quad \rho_S=2,56$$

$$S = [1000 - (\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_E} + \frac{G}{\rho_G})] \cdot \rho_s = [1000 - (\frac{350}{31} + \frac{200}{1} + \frac{1218,4196}{3,5})] \times 2,56 = \mathbf{1127,91kg}$$

Donc dans $1m^3$ du béton frais réalisé avec des granulats non tamisés, il y a :

$$E = 200L$$

$$C = 350Kg$$

$$G (5/16) = 1218,4196Kg$$

$$S = 1127,91Kg$$

3.6.9.A.h) Volume de mélange d'essais : pour le béton ordinaire

Volume de gâchage pour 9 éprouvettes cubiques $(15 \times 15 \times 15)cm^3$

$$\text{Pour une éprouvette : } V = 1m^3 \times 0,15 \times 0,15 \times 0,15 = 0,003375m^3$$

$$\text{Pour 9 éprouvettes : } V = 0,003375m^3 \times 9 = 0,030375m^3$$

$$\text{Volume humide nécessaire (9 cubes + 10% marge) } = 0,334125m^3$$

$$\text{Volume sec} = \text{volume humide} \times 1,54 = 0,334125 \times 1,54 = 0,05145525\text{m}^3$$

Répartition volumique selon 1 :2 :3

$$\text{Total de parts} = 1 + 2 + 3 = 6$$

$$\text{Volume du ciment} = \frac{1 \times 0,05145525}{6} = 0,008575875\text{m}^3$$

$$\text{Volume du sable} = \frac{2 \times 0,05145525}{6} = 0,01715175\text{m}^3. \quad \text{Or, } m = \rho_{corp} \cdot v$$

$$\text{Volume des graviers} = \frac{3 \times 0,05145525}{6} = 0,025727625\text{m}^3. \quad \text{Comme, } \rho_{corp} = \rho_{eau} \cdot d$$

Masses en kg en fonction des densités des constituants du béton : $m = \rho_{eau} \cdot \text{densité} \cdot v$

$$\text{Pour le ciment : } 0,008575875\text{m}^3 \times \frac{1440\text{kg}}{\text{m}^3} = 12,34926 \approx 12,35\text{kg}$$

$$\text{Pour le sable : } 0,01715175\text{m}^3 \times \frac{1390\text{kg}}{\text{m}^3} = 23,8409325 \approx 23,84 \text{ kg}$$

$$\text{Pour les graviers : } 0,025727625\text{m}^3 \times \frac{1620\text{kg}}{\text{m}^3} = 41,6787525 \approx 41,7\text{kg}$$

$$\text{Pour l'eau : } W/c = 0,50 \text{ masse du ciment} \times 0,50 = 12,34926\text{kg} \times 0,50 = 6,17463\text{kg} = 6,17\text{l}$$

3.6.9.A.i) Composition de mélange pour 9 éprouvettes cubiques d'un béton ordinaire

Eau (L)	Ciment (Kg)	Graviers non tamisés (Kg)	Sable non tamisé (Kg)
6,17	12,35	41,7	23,84

3.6.9.B. Calcul de la composition du béton réalisé avec des granulats tamisés

3.6.9.B.a) Caractéristiques des matériaux utilisés

- Rb : Classe du béton, Rb=30
- Rc : Activité ou classe du ciment, Rc=42,5
- A, A' : Coefficient admis d'après le tableau selon les propriétés et la qualité des matériaux ;

A=0,60 pour le béton ordinaire et 0,55 pour le béton de qualité inférieure.

Pour le cas ci-présent, A= 0,60 car il s'agit d'un béton de qualité appréciable.

- Le rapport $\frac{C}{E} = \frac{Rb}{A \cdot Rc} + 0,5 = \frac{30}{0,60 \times 42,5} + 0,5 = 1,676$
 $\frac{E}{C} = \frac{1}{1,676} = 0,59$

3.6.9.B.b) Détermination de la quantité d'eau de gâchage pour $1m^3$ de béton frais

- L'affaissement $A_f=5cm$
- La dimension maximale du gros granulat : $D_{max}=25$
- La quantité d'eau dans $1m^3$ de béton par rapport à la dimension maximale du gros granulat
 $E=200L+10L=210L$;(La quantité d'eau est augmentée de $10l/m^3$ si on utilise des graviers concassés).

3.6.9.B.c) Détermination de la quantité de ciment pour $1m^3$ de de béton frais

$$C=E \cdot \left(\frac{C}{E}\right) \Rightarrow C=210 \times 1,676=351,96Kg \approx 352Kg$$

3.6.9.A.d) Détermination du coefficient d'écartement α

$$\frac{E}{C}=0,59 \quad \alpha=1,44$$

3.6.9.B.e) A partir des équations (3) et (4), on détermine la quantité du gravier (kg) pour $1m^3$ de béton

Pour le gravier de classe $5/8$

$$\rho.g=0,48 \quad ; \gamma.g=1,36 \quad ; \rho.g=3,8 \quad ; \alpha=1,44$$

$$G=\frac{1000}{p.g \cdot \frac{\alpha}{\gamma.g} + \frac{1}{\rho.g}} = \frac{1000}{0,48 \cdot \frac{1,44}{1,36} + \frac{1}{3,8}} = 1296,355kg$$

Pour le gravier de classe $8/16$

$$\rho.g=0,48 \quad ; \gamma.g=1,36 \quad ; \rho.g=3,4 \quad ; \alpha=1,44$$

$$G=\frac{1000}{p.g \cdot \frac{\alpha}{\gamma.g} + \frac{1}{\rho.g}} = \frac{1000}{0,48 \cdot \frac{1,44}{1,36} + \frac{1}{3,4}} = 1246,334kg$$

Pour le gravier de classe $16/25$

$$\rho.g=0,48 \quad ; \gamma.g=1,36 \quad ; \rho.g=3,2 \quad ; \alpha=1,44$$

$$G=\frac{1000}{p.g \cdot \frac{\alpha}{\gamma.g} + \frac{1}{\rho.g}} = \frac{1000}{0,48 \cdot \frac{1,44}{1,36} + \frac{1}{3,2}} = 1218,4196kg$$

$$G=\frac{1296,355kg+1246,334kg+1218,4196}{3}=\mathbf{1253,703kg}$$

Dans un mélange d'essai, nous prenons respectivement $\frac{1}{3}$ de graviers tamisés classe $5/8$, classe $8/16$, classe $16/25$

Donc : $G (5/8) = 417,901 \text{ kg/m}^3$; $G (8/16) = 417,901 \text{ kg/m}^3$; $G (16/25) = 417,901 \text{ kg/m}^3$

3.6.9.B.f) Calcul de la quantité du sable (Kg) pour 1 m^3 de béton frais

$\rho_c = 31$; $\rho_E = 1$; $\rho_G = 3,2$; $\rho_S = 2,6$

$S = [1000 - (\frac{C}{\rho_C} + \frac{E}{\rho_E} + \frac{G}{\rho_G})] \cdot \rho_S = [1000 - (\frac{350}{31} + \frac{210}{1} + \frac{1253,703}{3,5})] \times 2,6 = 1093,33 \text{ kg}$

Donc dans 1 m^3 du béton frais, réalisé avec des granulats tamisés il y a :

$E = 210 \text{ L}$

$C = 350 \text{ Kg}$

$G (5/16) = 417,901 \text{ kg/m}^3$; $G (8/16) = 417,901 \text{ kg/m}^3$; $G (12/16) = 417,901 \text{ kg/m}^3$

$S = 1093,33 \text{ Kg}$

3.6.9.B.g) Volume de mélange d'essais : pour le béton ordinaire au laboratoire des matériaux à Kiriri

Volume de gâchage pour 9 éprouvettes cubiques $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$

Pour une éprouvette : $V = 1 \text{ m}^3 \times 0,15 \times 0,15 \times 0,15 = 0,003375 \text{ m}^3$

Pour 9 éprouvettes : $V = 0,003375 \text{ m}^3 \times 9 = 0,030375 \text{ m}^3$

Si on effectue une majoration de 10% en volume sur les dépenses des différents constituants :

Volume humide nécessaire (9 cubes + 10% marge) = $0,334125 \text{ m}^3$

Volume sec = $\text{volume humide} \times 1,54 = 0,334125 \times 1,54 = 0,05145525 \text{ m}^3$

Répartition volumique selon 1 : 2 : 3

Total de parts = $1 + 2 + 3 = 6$

Volume du ciment = $\frac{1 \times 0,05145525}{6} = 0,008575875 \text{ m}^3$

Volume du sable = $\frac{2 \times 0,05145525}{6} = 0,01715175 \text{ m}^3$

Volume des graviers = $\frac{3 \times 0,05145525}{6} = 0,025727625 \text{ m}^3$

Masses en kg en fonction des densités des constituants du béton : $m = v \times \text{densité}$

Pour le ciment : $0,008575875 \text{ m}^3 \times \frac{1440 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 12,34926 \approx 12,35 \text{ kg}$

Pour le sable : $0,01715175m^3 \times \frac{1440kg}{m^3} = 24,69852 \approx 24,7 \text{ kg}$

Pour les graviers : $0,025727625m^3 \times \frac{1640kg}{m^3} = 42,193305 \approx 42,2 \text{ kg}$

Pour l'eau : $W/c = 0,50 \text{ masse du ciment} \times 0,50 = 12,34926 \text{ kg} \times 0,50 = 6,17463 \text{ kg} = 6,17 \text{ l}$.

3.6.9.B.h) Composition de mélange pour 9 éprouvettes cubiques d'un béton ordinaire

Tableau 12: Composition de mélange pour 9 éprouvettes cubiques d'un béton ordinaire

Eau (L)	Ciment (Kg)	Graviers tamisés selon les classes (5/8) ; (8/16) ; (16/25). (Kg)	Sable (Kg)
6,17	12,35	42,2 ≈ [(14,07) ; (14,07) ; (14,07)]	24,7

« Source : établi par l'auteur »

3.6.10. Formulation du béton

Les mélanges de bétons ont été fabriqués selon la même formulation en masse pour garantir une comparaison fiable ; c'est-à-dire que les éprouvettes en béton ont été préparées en prenant un dosage en ciment constant de 350 kg pour $1m^3$ de béton dans toutes les séries de bétons produites.

Deux séries ont été réalisées :

Série A : béton avec granulats non tamisés ;

Série B : béton avec granulats tamisés.

3.6.11. Méthodologie expérimentale

3.6.11.a) Mise en œuvre et préparation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été fabriquées selon la norme NF EN 12390-1 (Europe/France). Elles ont été moulées dans des éprouvettes cubiques de 15 cm de cote. Au total, dix-huit éprouvettes en guise de 18 essais ont été préparées. Ceci implique que nous avons d'une part utilisé neuf éprouvettes cubiques de dimensions 150 mm de côté pour les granulats naturels non tamisés et d'une autre part neuf éprouvettes de mêmes dimensions pour les granulats tamisés. Après un premier compactage mécanique, chaque éprouvette a été laissée à durcir dans des conditions contrôlées au laboratoire constituant les conditions de cure du béton.

3.6.11.b) Conditions de cure du béton

Conformément aux recommandations de NF EN 12390-2 pour le démoulage, le stockage et la cure des éprouvettes, les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures puis conservées dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à l'âge de l'essai (c'est à dire entre 18 et 22°C).

Les conditions de cure du béton sont notamment :

- Immersion des éprouvettes dans un bac métallique ou plastique de cure ;
- Conservation des éprouvettes dans l'eau dans un environnement à température maintenue constante c'est à dire $20 \pm 2^\circ\text{C}$ afin de garantir une hydratation optimale du ciment ;
- L'humidité relative est maintenue élevée et contrôlée à $\geq 95\%$ pour prévenir toute évaporation prématurée de l'eau de gâchage ;
- Limitation stricte de l'exposition à la lumière directe, aux variations thermiques et aux courants d'air pour assure une maturation uniforme du matériau ;
- Protection contre les vibrations.

3.6.12. Essai de compression des éprouvettes en béton

Les essais ont été réalisés selon le mode opératoire de la norme NF EN 12390-3. Chaque éprouvette a été soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN.

6 éprouvettes par essai de compression : c'est-à-dire :

3 pour béton avec granulats non tamisés et 3 pour béton avec granulats tamisés.

Total d'éprouvettes : (3x2 typesx3 âges) = 18 éprouvettes testées au total.

3.6.12.A. Equipements utilisés

Tamis normalisés (selon NF EN 933-1).

Éprouvettes 15x15cm

Bain de cure ou Étuve pour cure ;

Balance électronique ;

Presse hydraulique : Presse de compression calibrée (Automatique) ; Chronomètre

3.6.12.B. Calcul de la résistance

La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

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

Où :

R_C = résistance à la compression (MPa),

F= charge maximale à la rupture (kN),

A= surface de la section de l'éprouvette en compression (cm²).

1Pa= 1N/m²

1MPa= 10⁶ Pa =10⁶N/m²= $\frac{10^6}{10^6}$ N/mm²=1N/mm²=10bars



Enlèvement des éprouvettes du bain de cure, puis ensoleillement

Photo du 2/9/2025



Mise en marche de presses hydrauliques (manuelles et automatiques) Par les techniciens

Photo du 15/9/2025



Mise des éprouvettes dans la machine de compression

Photo du 29/9/2025

Compression des éprouvettes

Photo du 29/9/2025

Figure 10: Photos de réalisation des essais de compression des éprouvettes en béton

« Source : photos prises par l'auteur ».

3.6.12.C. Résultats des résistances à la compression des éprouvettes en béton

3.6.12.C.a) Résistances à la compression des cubes de béton après 7 jours de cure

Cubes de Béton Fabriqués avec des Granulats non Tamisés				
N° de Cube	Masse (en kg)	Force de rupture (KN)	Section de l'Éprouvette (cm²)	Résistance à la compression (MPa)
1 ⁰	7,18	341,617	225	15,183
2 ⁰	7,85	449,325	225	19,970
3 ⁰	7,24	416,565	225	18,514
Résistance Moyenne				17,889
Cubes de Béton Fabriqués avec des Granulats Tamisés				
1 ⁰	6,89	409,545	225	18,202
2 ⁰	7,34	506,543	225	22,513
3 ⁰	6,55	484,853	225	21,549
Résistance Moyenne				20,754

3.6.12.C.b) Résistances à la compression des cubes de béton après 14 jours de cure

Cubes de Béton Fabriqués avec des Granulats non Tamisés				
N° de Cube	Masse (en kg)	Force de rupture (KN)	Section de l'Éprouvette (cm²)	Résistance à la compression (MPa)
1 ⁰	8,11	447,2775	225	19,879
2 ⁰	7,90	458,64	225	20,384
3 ⁰	6,99	416,1375	225	18,495
Résistance Moyenne				19,586
Cubes de Béton Fabriqués avec des Granulats Tamisés				
1 ⁰	8,21	564,84	225	25,104
2 ⁰	9,0	546,9075	225	24,307
3 ⁰	7,07	505,5526	225	22,469
Résistance Moyenne				23,960

3.6.12.C.c) Résistances à la compression des cubes de béton après 28 jours de cure

Cubes de Béton Fabriqués avec des Granulats non Tamisés				
N° de Cube	Masse (en kg)	Force de rupture (KN)	Section de l'Eprouvette (cm²)	Résistance à la compression (MPa)
1 ⁰	8,22	529,425	225	23,530
2 ⁰	9,71	551,5425	225	24,513
3 ⁰	7,99	493,605	225	21,938
Résistance Moyenne				23,327
Cubes de Béton Fabriqués avec des Granulats Tamisés				
1 ⁰	9,80	690,615	225	30,694
2 ⁰	7,50	669,33	225	29,748
3 ⁰	8,46	725,6025	225	32,249
Résistance Moyenne				30,897

3.7 Conclusion

La méthodologie expérimentale adoptée vise à isoler l'effet de la granulométrie des granulats sur les propriétés du béton notamment sa résistance à la compression. Les résultats des essais, présentés dans le chapitre suivant, permettront de comparer objectivement les performances obtenues et de tirer des conclusions concrètes sur l'importance du tamisage dans la formulation du béton d'une part avec les granulats non tamisés et d'autre part avec les granulats tamisés.

CHAPITRE 4 : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1. Introduction

Ce chapitre est le cœur de notre travail, car il met en relation les résultats expérimentaux avec la théorie et les études antérieures. Il présente l'analyse et la discussion des résultats issus des essais de compression réalisés sur les éprouvettes de béton confectionnées avec les granulats de la rivière Ntahangwa, tamisés et non tamisés. L'objectif est de comparer la résistance mécanique obtenue dans chaque cas, d'interpréter les écarts observés et de mettre en évidence l'influence du tamisage sur la performance globale du béton. Les observations permettent d'établir des corrélations entre la qualité du tamisage des granulats et les propriétés mécaniques du béton.

Les résultats seront présentés de manière progressive : d'abord une interprétation brute des données obtenues, ensuite une comparaison entre les deux types de béton, suivie de l'analyse des écarts. L'étude se poursuivra avec une discussion par rapport aux résultats de la littérature, une mise en évidence des limites expérimentales, et se conclura par des perspectives de recherche et des suggestions pratiques.

4.2. Analyse et interprétation des résultats d'essais Los Angeles et Micro-Déval

4.2.1. Résultats Los Angeles et Micro-Deval

Type d'échantillons	Coefficient los Angeles pour les granulats concassés	Coefficient los Angeles pour les tous venants	Coefficient Micro-Déval pour les tous venants
Granulats non tamisés	= 41,92%	= 28,93%	= 26%
Granulats tamisés	= 30,64%	= 20,58%	= 12,4%

4.2.2. Interprétation des Résultats Los Angeles

A première impression, la valeur 41,92 du coefficient los Angeles pour les granulats concassés non tamisés est supérieure à 40 ce qui leur confère une qualité médiocre à mauvaise qualité tandis que celle des granulats concassés tamisés 30,64 est comprise entre 25 et 40 ce qui permet d'apprécier qu'ils sont de qualité moyenne à faible ; On constate alors que les granulats concassés de la rivière Ntahangwa qu'ils soient tamisés ou non, sont tous de mauvaise qualité et par conséquent ; ils ne sont pas fiables à l'utilisation pour la formulation du béton.

Les résultats pour les tous venants indiquent une meilleure résistance mécanique des granulats tamisés et non tamisés avec des valeurs (28,93% et 20,58%) inférieures à 30 %, seuil généralement recommandé pour les bétons de structure (Mindess, Young & Darwin, 2003).

Selon la norme NF EN 1097-2 les valeurs limites d'acceptation de l'essai Los Angeles sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13: Valeurs limites d'acceptation de l'essai Los Angeles

Valeurs de coefficient LOS Angeles	Appréciation
LA<15	Très bon à bon
15<LA≤25	Bon à moyen
25 <LA ≤40	Moyen à faible
LA>40	Médiocre à mauvaise qualité

La valeur 28,93 du coefficient Los Angeles est située pour les granulats non tamisés entre 25 et 40, d'où la résistance aux chocs par la fragmentation moyenne à faible tandis qu'elle est de 20,58 c'est à dire située entre 15 à 25 pour les granulats tamisés ce qui montre que leur résistance aux chocs est donc bonne à moyen pour la confection des bétons ordinaires.

Plus le coefficient Los Angeles est faible ; plus la résistance aux chocs des granulats est élevée.

4.2.3. Interprétation des résultats Micro Deval

Les granulats tamisés présentent une meilleure résistance à l'usure humide, confirmant leur qualité pour des ouvrages durables (Mehta & Monteiro, 2014).

Les valeurs de coefficient Micro-Deval indiquent la nature du gravier et permettent d'apprécier leur qualité pour composer un béton comme le présente le tableau suivant :

Tableau 14: Valeurs limites d'acceptation selon le coefficient de l'essai MDE

Valeurs de coefficient Micro-Deval	Appréciation
MDE<10	Très bon à bon
De 10 à 20	Bon à moyen
20 à 30	Moyen à faible
<i>MDE > 35</i>	Médiocre

Pour les graviers non tamisés le coefficient Micro-déval est 26, valeur se trouvant entre 20 et 30, ce qui permet d'apprécier qu'ils soient d'une qualité moyenne à faible. Par contre celui des granulats tamisés est 12,4 ; valeur qui est située entre 10 et 20, d'où, on est en présence de graviers bon à moyen pour confectionner les bétons ordinaires. Plus le pourcentage d'usure est bas, plus l'échantillon est résistant à l'usure. Source : NF EN 1097-1.

4.3. Résultats et analyse du module de finesse des granulats

Type de Granulats	Valeur du module de finesse (%)	Observations
Sable non tamisés (avec fines, poussières et impuretés naturelles)	2,76	Sans tamisage, la présence de particules fines diminue le MF sable plus «fin», souvent moins favorable à la résistance mécanique.
Sable tamisés (propres, sans fines excessives)	3,12	Le tamisage élimine les fines et homogénéise la granulométrie. Le MF augmente (Sable plus «grossier»).

4.3.1. Valeurs moyennes de module de finesse du sable

Tableau 15: Valeurs moyennes de module de finesse du sable selon ASTM C33(2016), Brooks & Neville (2010), Mehta & Monteiro (2014), Mindess et al. (2003)

Type de Sable	Plage courante du module de finesse	Valeur moyenne inductive du MF	Observations
Sable non tamisé	2,2-2,5	2,3	Présence de fine et impuretés, sable plus fin, risque d'augmenter la demande en eau et de réduire la résistance.
Sable tamisé	2,6-3,0	2,8	Granulométrie homogène, moins de fines, bon compromis pour la résistance du béton.

4.3.2. Analyse

Le sable non tamisé, présente de fines, avec un MF plus faible, ce qui peut augmenter la porosité et diminuer la résistance si la correction de formulation n'est pas faite.

Par contre le sable tamisé de la rivière Ntchangwa a un MF plus élevé, ce qui signifie qu'il est plus grossier et généralement plus favorable à la résistance mécanique.

4.4. Résultats de l'Equivalent de Sable

Type d'échantillons	Equivalent de sable (Es)
Sable non tamisé	=65,6 %
Sable tamisé	= 96,08 %

Les granulats tamisés sont donc plus propres, ce qui améliore la durabilité du béton (ACI 211, 2002).

4.4.1. Interprétation des valeurs de l'équivalent de sable

Tableau 16: Interprétation des valeurs de l'équivalent de sable

Valeur de l'ES (%)	Qualité du sable	Interprétations/Utilisations
>70	Très propre	Sable de très bonne qualité, faible teneur en fines argileuses, adapté aux bétons de haute performance et aux couches de roulement en routes.
50-70	Moyennement propre	Acceptable pour les bétons ordinaires et couches de fondation. Nécessite parfois un contrôle supplémentaire.
35-50	Limite d'acceptabilité	Sable contenant une proportion importante de fines argileuses. Risque de retrait, fissuration ou baisse de résistance du béton.
<35	Sale/impropre	Sable non conforme. Excès d'argiles gonflantes 'n béton impropre à la construction et inadéquat pour couches routières.

4.5. Analyse et interprétation des résultats des densités apparentes et absolues des granulats

4.5.1. Résultats de densité apparente des graviers

Type d'échantillons	Masse volumique de la Densité apparente
Graviers non tamisés	=1,62 t/m ³
Graviers tamisés	= 1,64 t/m ³

Les graviers tamisés ont une densité plus élevée, preuve d'une meilleure compacité.

4.5.2. Résultats de densité apparente pour le sable

Type d'échantillons	Densité apparente
Sable non tamisé	=1,39 t/m ³
Sable tamisé	= 1,44 t/m ³

Même constat que précédemment.

4.5.3. Résultats de la densité absolue des graviers par pesée hydrostatique

Type d'échantillons	Valeur de la Densité absolue
Graviers non tamisés	= 2,54 g/cm ³
Graviers tamisés	= 2,64 g/cm ³

4.5.4. Valeurs moyennes usuelles des densités apparentes et absolues pour les granulats tamisés et granulats non tamisés

Tableau 17: Synthèse des valeurs moyennes usuelles des densités apparentes et absolues pour les granulats tamisés et granulats non tamisés selon ASM International. (2012) et Ibearugblem, O.M. (2019)

Types d'agrégats	Masse volumique apparente (lâche/loose bulk Density) valeur indicative	Masse volumique des grains/ densité absolue) Kg/m ³	Commentaires
Graviers non tamisés	≈1500-1800	≈2400-2750 g/cm ³	La présence des fines comble les vides entre gros grains 'n souvent densité apparente plus élevée.
Graviers tamisés	≈1400-1650	≈2400-2700(2,4-2,7) g/cm ³	Le tamisage réduit les fines : pour les graviers grossiers cela peut augmenter les vides et donc diminuer la densité apparente.
Sables non tamisés	≈1550-1850	≈2500-2750	Les fines minérales (non organiques augmentent souvent la masse volumique apparente en comblant les vides ; si les fines sont organiques ou très

			poreuses, la densité peut diminuer.
Sables tamisés	≈1450-1650	≈2500-2700	Les sables tamisés et lavés sont plus réguliers, la densité apparente dépend fortement de la finesse et du tri.

Synthèse des résultats pour les densités apparente et absolue des granulats

Pour les granulats non tamisés, la valeur $1,62\text{t/m}^3$ de la densité apparente des graviers se trouve entre $1500\text{-}1800\text{ kg/m}^3$ et elle est de $1,39\text{ t/m}^3$ inférieure à 1550 et 1850 kg/m^3 pour le sable.

Pour les granulats tamisés, la valeur $1,64\text{t/m}^3$ de la densité apparente des graviers se trouve entre $1400\text{-}1650\text{ t/m}^3$ et elle est de $1,44\text{ t/m}^3$ se trouvant entre $1450\text{-}1650\text{kg/m}^3$ pour le sable.

En ce qui concerne densité absolue par pesée hydrostatique, nous avons trouvé $2,54\text{ g/cm}^3$, valeur qui est entre $2400\text{-}2750\text{kg/m}^3$ pour les graviers non tamisés alors qu'elle est de $2,64\text{g/cm}^3$ se trouvant entre $2,4\text{-}2,7\text{g/cm}^3$ pour les ravier tamisés.

Comme nous voudrions prendre en compte les vides dans les granulats, et passer du volume aux masses pesées au laboratoire, pour garantir la reproductibilité, la cohérence des dosages pour refléter le comportement réel du matériau frais dans le béton ; c'est pourquoi nous avons utilisé dans la formulation du béton les résultats des densités apparentes trouvées au niveau des essais au laboratoire d'une part pour les granulats non tamise et les granulats tamisés d'autres part mais non pas les résultats des densités absolues données par la pesée hydrostatique.

4.6 Résultats du coefficient de forme (aplatissement) et d'élongation

Types de coefficients pour les granulats tamisés	Valeurs de Coefficient
Coefficient de forme (Aplatissement)	= 66,97
Coefficient d'Elongation	= 36,70

4.6.1 Valeurs moyennes du coefficient d'aplatissement et d'élongation

Tableau 18: Tableau des valeurs moyennes du coefficient d'aplatissement et de l'indice des vides

	Valeur moyenne du Coefficient d'aplatissement exprimé en %	Valeur moyenne de L'indice d'élongation exprimée en %
Graviers non tamisés	55-62	34-40
Graviers tamisés	60-66	38-45

4.6.2 Analyse des résultats pour le coefficient d'aplatissement et d'élongation

Les résultats que nous avons montrés indiquent que les granulats tamisés sont allongés de façon normale car leur allongement reste limité dans l'intervalle de la moyenne tandis qu'ils possèdent un aplatissement qui est un peu supérieur à la moyenne.

4.7 Résultats de Porosité et de propreté des granulats

Type d'échantillons	Valeur de la Porosité en%	Valeur de la Propreté en %
Graviers non tamisés	= 2,8 %	= 75 %
Graviers tamisés	= 1,78 %	= 89 %

4.7.1. Valeurs moyennes de Porosité et de la propreté des granulats

Type d'échantillons	Porosité en %	Propreté en %
Granulats non tamisés	≈ (1.5–4.0)	≈ (30– 70)
Granulats tamisés	≈ (1.0–2.5)	≈ (60–90)

4.7.2 Analyse de résultats de porosité et de propreté des granulats

Ici il faut entendre la porosité interne des grains (en %), qui est distincte de l'« indice des vides » entre particules ; mais il existe aussi la porosité de l'élément béton.

Si la porosité interne est $\approx < 3\%$ ceci traduit une faible porosité ; tandis que dans le cas contraire la porosité est plus élevée. Le tamisage n'altère pas forcément la porosité interne des grains, mais enlève les fines et les fragments les plus poreux, d'où une moyenne plus faible pour les granulats « tamisés ».

4.8 Résultats de Compacité, indice de vides et l'absorption d'eau

4.8.1. Compacité et indice des vides.

Types de granulats	Valeur de la Compacité exprimé en %	Valeur de L'Indice des vides
Graviers non tamisés	97,2	0,029
Graviers tamisés	98,22	0,018

Tableau 19: Valeurs moyennes de Compacité et d'indice des vides

Types de granulats	Valeur moyenne de la Compacité exprimée en %	Valeur moyenne de L'indice des vides
Granulats non tamisés	(55-62)	(0,015-0,030)
Granulats tamisés	(60-66)	(0,012-0,020)

4.8.2. Interprétation des valeurs de l'indice des vides

Pour les granulats non tamisés, l'indice de vides est **0,029** alors qu'il est de **0,018** pour les granulats tamisés. Il est évident que l'indice des vides dépend fortement de la granulométrie, du calibrage et de la cohérence des grains. Ceci explique pourquoi les mélanges bien gradués (après tamisage et tri) ont souvent moins de vides (meilleure compacité) que les matériaux non triés.

4.8.3 Indice des vides et absorption d'eau

Type de granulats	Masse humide en (g)	Masse sèche en (g)	Masse d'eau absorbée en (g)	Absorption d'eau en (%)
Graviers non tamisés	1000	972	28	2,88
Graviers tamisés	1000	982,2	17,8	1,8

4.8.4. Interprétation des valeurs d'absorption d'eau

Les résultats du tableau ci-dessus montrent que les granulats non tamisés absorbent plus d'eau que les granulats tamisés ; ce qui prouve également que les granulats non tamisés renferment plus de vides que les granulats tamisés.

4.9. Analyse et interprétation des résultats des résistances à la compression des éprouvettes de béton après 7,14 et 28 jours de cure

4.9.1 Analyse des résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 7 jours de cure

Type d'échantillons	Valeur de la résistance à la compression (MPa)
Graviers non tamisés	17,889
Graviers tamisés	20,754

4.9.2 Analyse des résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 14 jours de cure

Type d'échantillons	Valeur de la résistance à la compression (MPa)
Graviers non tamisés	19,586
Graviers tamisés	23,960

4.9.3 Analyse des résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 28 jours de cure

Type d'échantillons	Valeur de la résistance à la compression (MPa)
Graviers non tamisés	23,327
Graviers tamisés	30,897

4.9.4 Interprétation et discussion des résultats des résistances à la compression de béton après 7,14 et 28 jours de cure

Les résultats des essais de compression réalisés sur les 18 éprouvettes montrent une évolution classique de la résistance mécanique avec l'âge du béton : une augmentation progressive entre 7, 14 et 28 jours.

Cette tendance est conforme aux lois générales de l'hydratation du ciment, où la résistance est liée à la formation progressive des hydrates de silicate de calcium (Neville & Brooks, 2010).

Les bétons fabriqués avec des granulats tamisés présentent globalement des résistances plus élevées que ceux réalisés avec des granulats non tamisés. Cela s'explique par une meilleure compacité de la matrice granulaire obtenue grâce au respect des courbes granulométriques optimales (Mehta & Monteiro, 2014). En revanche, les granulats non tamisés, contenant une distribution irrégulière de particules fines et grossières, induisent une moindre homogénéité et donc une diminution de la résistance à la compression.

4.9.5. Valeurs moyennes de résistance en fonction de l'âge du béton

Tableau 20: Résistances moyennes à la compression du béton ordinaire selon ACI (2019), Neville, A.M. (2011) ; Mendes, S, young, J.F., & Darwin. (2003)

Age du béton	Résistance moyennes (MPa)	Commentaire
7 jours	10-20	Correspond à \approx 60-70 % de la résistance finale à 28 jours
14 jours	15-25	Environ 75-85% de la résistance finale
28 jours	20-40	Résistance normalisée ; classes usuelles C20/25 à C30/37
90 jours	25-50	Gain supplémentaire lié à l'hydratation tardive des silicates

Béton ordinaire : béton à base de granulats normaux (densité $\approx 2400 \text{ kg/m}^3$), sans ajouts spéciaux.

Résistance à la compression : mesurée sur cube (150mm) ou cylindre (150×300mm), après cure standard (souvent 28 jours).

En Général, la résistance est notée **fck** (caractéristique, 28 jours) selon l’Eurocode 2.

Plages normalisées (Eurocodes 2, ACI)

Classes usuelles de bétons ordinaires :

- C20/25 \Rightarrow fck, cube=25 MPa (fck, cylindre= 20 MPa)
- C25/30 \Rightarrow fck, cube= 30 MPa (fck, cylindre= 25 MPa)
- C30/37 \Rightarrow fck, cube=37 MPa (fck, cylindre= 30 MPa)

Bétons courants dans les ouvrages : 20 à 40 MPa à 28 jours.

4.9.6 Analyse comparative des résistances à la compression entre les deux types de béton (7 ; 14 et 28 jours de cure)

La comparaison des résistances entre les bétons avec granulats non tamisés et ceux avec granulats tamisés montre une performance nettement supérieure dans le second cas. À chaque âge de mesure (7, 14 et 28 jours), le béton confectionné avec des granulats tamisés enregistre des résistances supérieures à celles du béton réalisé avec les granulats non tamisés.

À 7 jours, la résistance à la compression du béton avec granulats tamisés est supérieure de 10 à 14 % à celle du béton non tamisé. Cet écart s’accroît à 14 jours, atteignant près de 18 %, et devient encore plus significative à 28 jours, où l’écart peut dépasser 20 %. Cela met en évidence l’importance du tamisage comme facteur déterminant pour la qualité et la durabilité du béton (Mehta & Monteiro, 2014).

À 28 jours, le béton tamisé atteint une résistance conforme à une classe de béton C25/30 selon la norme EN 206-1, tandis que le béton non tamisé demeure proche d’une classe inférieure (C20/25).

Cette supériorité est liée à la meilleure compacité des granulats tamisés, qui réduit les vides et améliore l’adhérence pâte-granulats (Alexander & Mindess, 2010).

Ces résultats confirment que le tamisage améliore la performance mécanique en permettant une meilleure répartition des vides et une diminution de la porosité résiduelle (ACI Committee 211, 2009). En comparaison, les bétons non tamisés présentent un comportement plus hétérogène, avec des zones de concentration de vides qui fragilisent la résistance.

Tableau 21: Comparaison des résistances à la compression du béton (7 ; 14 et 28 jours de cure) (MPa)

Âge (jours)	Béton avec granulats non tamisés (MPa)	Béton avec granulats tamisés (MPa)	Différence (Les écarts de résistances) (MPa)	Améliorations de la résistance en compression (%)		
				Après 7 jours par rapport à 17,88MPa	Après 14 jours par rapport à 19,58MPa	Après 28 jours par rapport à 23,32MPa
7	17,889	20,754	2,865	16 %	-	-
14	19,586	23,960	4,374	-	22,33 %	-
28	23,327	30,897	7,57	-	-	32,4516 ≈ 32,5%

« Source : établi par l'auteur ».

4.9.7 Interprétation des écarts observés

L'écart de résistance observé entre les deux types de béton s'explique principalement par trois phénomènes principaux :

- **La compacité** : les granulats tamisés suivent une courbe granulométrique plus proche de la norme de Fuller, ce qui favorise une densité maximale (Alexander & Mindess, 2010).
- **La réduction de la porosité** : la présence excessive de fines dans le béton non tamisé engendre une consommation supplémentaire d'eau de gâchage, ce qui augmente le rapport E/C effectif et réduit la résistance (Baroghel-Bouny, 2011).
- **L'homogénéité** : un meilleur calibrage des granulats permet une répartition uniforme des contraintes lors des charges appliquées, ce qui limite l'apparition de microfissures lors des essais de compression.

4.10. Influence du tamisage sur la résistance à la compression du béton

Le tamisage des granulats influe directement sur la compacité et la porosité du béton, déterminants majeurs de sa résistance à la compression. Une granulométrie bien graduée réduit les vides, améliore l'adhérence pâte-granulat, tandis qu'une mauvaise distribution favorise un excès de vides et entraîne une diminution de résistance. Dans notre travail nous avons trouvé après 28 jours de cure du béton, une amélioration de résistance à la compression de 32,45%. Or des recherches antérieures qui ont été menées successivement à l'université de Wuhan et Tianjin en Chine confirment que le béton formulé avec des granulats tamisés présente une densité et une résistance supérieures à celui réalisé avec des granulats non tamisés avec un gain maximal de 23,49% (Chao Wang, 2024). L'optimisation de la graduation constitue ainsi un moyen simple et efficace pour renforcer la durabilité et les performances mécaniques du béton (Yogita Malewar S. S., 2017).

4.11. Impact du tamisage sur la performance mécanique

L'analyse du tableau 21 montre que le béton tamisé atteint une résistance conforme à la classe de résistance C25/30 (selon la norme EN 206-1), alors que le béton non tamisé reste dans une classe inférieure, proche de C20/25.

Le tamisage a nettement amélioré la performance mécanique en optimisant entre 14 à 24,5% de la résistance à la compression du béton. Il contribue donc à l'atteinte des performances attendues, en particulier dans les zones urbaines de Bujumbura où la qualité des granulats alluvionnaires peut varier considérablement (Ndayisenga, 2018). Ces observations rejoignent les travaux de (Barnett, 2009), qui démontrent que la correction granulométrique permet d'optimiser le module de finesse et d'améliorer de 15 à 25 % la résistance du béton à long terme.

4.12. Discussion par rapport aux résultats de la littérature

Les résultats de cette étude confirment largement les tendances rapportées dans la littérature. En effet, Mehta & Monteiro (2014) soulignent que la distribution granulométrique optimale est un facteur déterminant de la compacité et de la résistance du béton.

De même, l'ACI Committee 211 (2009) recommande un tamisage préalable des granulats pour garantir la conformité aux courbes granulométriques normalisées, condition indispensable pour obtenir un béton performant.

Des études similaires ont été menées par (Mutabaruka, 2016) au Rwanda sur les granulats volcaniques, et il a trouvé une amélioration se trouvant entre 15 à 25 % de la résistance grâce au tamisage, ce qui n'est pas trop éloigné des résultats obtenus avec les granulats de la rivière Ntahangwa.

4.13 Apports scientifiques et pratiques

Sur le plan scientifique : l'étude confirme que la granulométrie des granulats est un paramètre majeur dans les performances mécaniques du béton.

Sur le plan pratique : le tamisage représente une amélioration simple et économique pour les producteurs locaux, notamment au Burundi, dans les zones où les granulats sont extraits directement des rivières.

4.14 Limites expérimentales de l'étude

Bien que les résultats du tableau 21 soient clairs et cohérents, Cette recherche présente certaines limites :

- Le nombre limité d'éprouvettes (18) réduit la robustesse statistique des résultats.
- Les essais ont porté uniquement sur la résistance à la compression, sans prendre en compte d'autres propriétés mécaniques (traction, flexion, module d'élasticité), de durabilité, le type de ciment ou l'ajout d'adjuvants.

- Les conditions de cure ont été réalisées en laboratoire et ne reflètent pas toujours les conditions réelles de chantier.
- La provenance unique des granulats (rivière Ntahangwa) limite la généralisation des conclusions à d'autres gisements locaux.

4.15 Perspectives de recherche futures

Il serait intéressant d'étendre cette étude à :

- D'autres sources et rivières de granulats du Burundi pour comparer les résultats.
- D'autres propriétés du béton : traction, flexibilité, durabilité, perméabilité, retrait, absorption d'eau et la résistance aux cycles gel-dégel.
- Explorer l'association du tamisage avec des adjuvants (superplastifiants) pour améliorer encore les performances du béton.
- Une analyse plus fine du béton, incluant la porosité capillaire et la durabilité face aux attaques chimiques, renforcerait la compréhension des effets du tamisage sur la longévité des ouvrages.
- Évaluer l'impact économique de l'opération de tamisage à grande échelle dans les projets urbains de construction locale sur le coût final du béton.
- L'utilisation de modèles numériques pour prédire le comportement du béton en fonction de la distribution granulométrique.
- Expérimenter des combinaisons optimisées de tamis pour obtenir des courbes granulométriques idéales.

4.16 Conclusion

L'influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton est nette et mesurable. Un tamisage rigoureux permettant d'obtenir une granulométrie continue est indispensable pour garantir des performances mécaniques élevées. Cette amélioration est attribuable à une meilleure compacité, une homogénéité accrue et une réduction de la porosité. L'étape suivante présentera la conclusion générale de cette étude ainsi que des suggestions pour les professionnels du béton au Burundi.

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était d'étudier l'influence du tamisage des granulats sur la résistance à la compression du béton. À travers une étude expérimentale rigoureuse sur des granulats provenant de la rivière Ntakangwa à Bujumbura, il a été mis en évidence que le tamisage améliore significativement les propriétés mécaniques du béton, en particulier la résistance à la compression.

Les résultats obtenus ont montré de manière claire et cohérente que : pour des bétons de même composition, ceux produits avec des granulats tamisés présentent des résistances supérieures à tous les âges (7, 14 et 28 jours) de cure que ceux produits avec des granulats non tamisés.

Bref, le béton réalisé avec une granulométrie continue offre la meilleure maniabilité, la meilleure compacité et la résistance à la compression la plus élevée. Par contre le béton formulé à partir de granulats discontinus ou non calibrés présente des performances mécaniques inférieures, avec une perte de résistance pouvant atteindre 24,5 %.

La qualité du tamisage des granulats est donc un facteur déterminant dans l'optimisation de la structure interne du béton et, par conséquent, de ses propriétés mécaniques.

Ces résultats corroborent les études théoriques et expérimentales antérieures, notamment celles de Neville (2011) et Mehta & Monteiro (2006), qui insistent sur l'importance d'une bonne compacité granulaire pour la durabilité du béton.

Ainsi, le recours au tamisage, bien que simple et peu coûteux, constitue une amélioration substantielle dans la maîtrise de la qualité des bétons produits localement. Les activités réalisées au cours de ce travail ont constitué une expérience riche, formatrice et concrète, tant sur le plan pratique, scientifique et académique, technique que personnel. Ce travail ouvre la voie à d'autres recherches sur les matériaux locaux et leur valorisation dans le secteur du génie civil au Burundi.

Suggestions

À la lumière de cette étude, des suggestions suivantes sont formulées ;

1) A l'Etat :

Au sein de l'ENS ; de mettre en place des Equipements nécessaires pour la réalisation des essais de laboratoire afin de permettre aux étudiants de Génie Civil d'avoir accès aux laboratoires de :

- Matériaux et de Construction ;
- Construction des Routes et Hydro-Sanitaires
- Mécanique des Sols
- Machines et Matériels de Chantier.

2) A l'endroit de l'ENS :

- De mettre en place une bibliothèque virtuelle, et l'enrichir de ressources documentaires actualisées, variées et accessibles à distance. L'optimisation de cet outil numérique favoriserait l'accès équitable à l'information scientifique, et renforcerait la visibilité académique de l'institution.
- De procéder à la Centralisation et synchronisation de l'ensemble des mémoires de master déjà approuvés par les conseils scientifiques de l'ENS et de la FSI à Kiriri. La mise en place d'une base des données commune, accessible aux étudiants et aux professeurs, permettrait non seulement de valoriser les travaux existants, renforcer la transparence et servir de référence pour améliorer la qualité méthodologique et scientifique des futurs mémoires, mais aussi de contribuer à la consolidation du patrimoine scientifique entre les deux institutions.

3) Pour les professionnels du génie civil :

- Contrôler régulièrement les caractéristiques des granulats locaux, notamment leur, dureté, densité, propreté et teneur en fines.
- Mettre en œuvre un tamisage systématique des granulats pour favoriser une granulométrie homogène avant toute formulation de béton, en particulier pour les projets d'envergure inférieure utilisant des granulats alluvionnaires où la performance est critique.
- Limiter la présence de fines en excès, en procédant si nécessaire à un tamisage humide ou à un lavage des sables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 12620, N. E. (2008). *Granulats pour beton*. Paris: AFNOR.
- 197-1, E. (28 Fevrier, 2019). *Cement-Part1: Composition Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*. Londres: British Standards Institution BSI.
- 211., A. C. (2002). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete.(ACI 211.1-91)*. Farmington Hills: ACI.
- 308R-01, A. (2001). *Guide to Curing Concrete(ACI 308R-01)*. American Concrete Institute. Farmington Hills: ACI.
- 933-1, N. E. (2012). *Essais pour determiner les caracteristiques geometriques des granulats parti 1:determination de la granulometrie par le tamisage*. Paris: AFNOR.
- Abram, M. (1958). *Properties of concrete*. London: Longmans, Green & co.
- AFNOR. (1996). *Essai pour determiner les caracteristiques mecaniques et physiques des granulats (Normes NF EN 933-1 a 933-3, NF EN 1097-1 a 6, NF P18-598)*. Paris: AFNOR.
- AFNOR. (2010). *Essais pour determiner les caracteristiques mecaniques et physiques des granulats (NF EN 1097)*. Paris: AFNOR.
- AFNOR. (2019). *NF EN 12390-3: Essais pour beton durci-Partie 3: Resistance a la compression des eprouvettes*. Association Francaise de Normalisation. Paris: AFNOR.
- Aitcin. (2000, September). *Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow*.
- Alonso, s. &. (2001). *Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio*. Amsterdam: Elsevier.
- Barnett, S. J. (2009). *Influence of Aggregate and Curing Regime on the Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC)*. London Wall: Elsevier Limited.
- BSI. (2013). *BS EN 933-3: Tests for geometrical properties of aggregates.Determination of particle shape- Flakiness index*. London: BSI.
- CEN. (2009). *CEN.(2009).Adjuvants pour beton, mortier et coulis-Partie 2: Adjuvants pour beton-Definition, exigences,conformite et marquage(EN 934-2)*. Bruxelles: CEN.
- CEN. (2011). *Cement-Part1:Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Bruxelles: CEN.
- CEN. (2011). *EN 197-1:2011-Cement- Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Bruxelles: CEN/British Standards Institution.
- Chabanat, E. V. (2016). *Essais sur les materiaux de chaussées*. Paris: Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussees.
- Chao Wang, Q. Q. (2024). *Concrete Aggregate-Gradation Effect and Strength-Criterion Modification for Fully Graded Hydraulic Concrete. Materials(Volume 17, numero 15, 2024)*, P.1&14.
- Dupont, J. (2018). *Technologie du beton et controle des granulats*. Paris: Presses Universitaires du Batiment.
- EFNARC. (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*. Uropean Federation of National Association Representing Producers and applicators of specialist building products. Farnham, Surrey: EFNARC.
- Harris, C. (2006). *Dictionary of Architecture and Construction (4th.ed.)*. San Francisco, Chicago, New York, London: McGraw-Hill Professional.
- Lea, F. M. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (4th ed.)*. Oxford: Elsevier-Buterworth-Heinemann.

- Mamlouk, M. Z. (2017). *Materials for Civil and Construction Engineers(4th ed.)*. Hoboken, N J: Pearson Education, inc.
- Mehta, P. K. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.)*. New York: McGraw-Hill Education.
- Mindess, S. D. (2003). *Concrete(2nd ed.)*. Upper Saddle River: Pearson Education.
- Mindess, S. Y. (2003). *Concrete*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Monteiro. (2005). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw-Hill Education.
- Monteiro, M. &. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw-Hill Education.
- Mutabaruka, J. D. (2016). Engineering Characteristics of Volcanic Rock Aggregates of Rwanda. *IAEME Publication*, 1-8.
- Ndayisenga, E. (2018). *Qualite des granulats alluvionnaires dans la construction au Burundi: Cas de la riviere Ntakangwa*. Bujumbura: Memoire de fin d'etudes, Universite du Burundi.
- Nduwimana, J. (2020). *Caracterisation des sediments alluvionnaires de la riviere Ntakangwa*. Bujumbura: Memoire de fin d'etudes Universite du Burundi.
- Neville, A. (2011). *Properties of Concrete (5th ed.)*. Harlow: Pearson Education.
- Neville, A. (2012). *Properties of Concrete (5th ed.)*. Harlow: Pearson Education.
- Neville, A. B. (2010). *Concrete Technology (2nd ed.)*. Harlow: Person Education.
- Neville, A. M. (1996). *Properties of Concrete (4th ed.)*. Harlow: Pearson Education.
- Neville, A. M. (2010). *Proprietes des betons (5e ed.)*. Paris: Eyrolles.
- Neville, A. M. (2011,2012). *Properties of Concrete (5th ed.)*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete (5th ed.)*. Harlow: Pearson Education.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete(5th ed.)*. Harlow: Pearson Education.
- Oluwasola, E. A. (2020). *Effect of Aggegate Shapes on the Properties of Concrete*. Ogbomoso: LAUTECH.
- Santos, P. R. (2018,2020). *Influence de la granularite sur les performances mecaniques du beton. Revisita Tecnica de Engenharia Civil, 34, 23-29*. Liege: Presses Universitaires de Liege.
- Skramtaev, B. ., (1958). *Standard Calculation Method for Concrete Mixtures (Yedinyy metod rascheta sostava betona)*.Standartizatsiya, (1) 24-28. Moscow: Standartizatsiya.
- Taylor, H. F. (1997). *Cement Chemistry (2nd ed.)*. London: Thomas Telford.
- Yogita Malewar, S. S. (2017). *Gap Grading of Aggregates & Its Effect on The Inherent Properties of Concrete, (Volume 2 number 1)*. Ghaziabad, Uttar Pradesh, (Inde): MAT Journals PVT.,Journal of Ceramics and Concrete Sciances (JoCCS).

ANNEXES

Annexe I



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT
ET DE LA CONSTRUCTION**

ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE		Echantillon :	
		SITE : RIVIERE NTAHANG WA	
Nature de l'échantillon : SABLE NON TAMISE		Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGW A	
Sujet : « <i>Influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton: cas des granulats de la rivière Ntahangwa à Bujumbura</i> »		Date : le 03/Septembre -2024	
H1 : Niveau supérieur de la suspension H2 : Niveau supérieur de la précipitation		Dossier N° : 0492/2024- 2025	
$E.S = \frac{H_2}{H_1} \times 100$		1^{er} ESSAI	2^{ème} ESSAI
	NUMERO DE L'EPROUVETTE	L	M
	POIDS DE L'ECHANTILLON (Grf) A 0 % D'EAU	110,0	110,0
	NIVEAU H1	7,9	8,4
	NIVEAU H2	5,1	5,6
	$E.S = \frac{H_2}{H_1} \times 100$	64,55	66,66
	VALEUR MOYENNE	65,6 %	



OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT

ET DE LA CONSTRUCTION

ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE		Echantillon :	
		SITE : RIVIERE NTAHANGW A	
Nature de l'échantillon : SABLE TAMISE		Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA	
Sujet : « <i>Influence du tamisage des granulats sur la résistance du béton : cas des granulats de la rivière Ntahangwa à Bujumbura</i> »		Date : le 03/Septembre- 2024	
H1 : Niveau supérieur de la suspension H2 : Niveau supérieur de la précipitation		Dossier N° : 0492/2024- 2025	
$E.S = \frac{H_2}{H_1} \times 100$		1^{er} ESSAI	2^{ème} ESSAI
	NUMERO DE L'EPROUVETTE	L	M
	POIDS DE L'ECHANTILLON (Grf) A 0 % D'EAU	110,0	110,0
	NIVEAU H1	8.9	9
	NIVEAU H2	8,4	8,8
	$E.S = \frac{H_2}{H_1} \times 100$	94,38	97,77
	VALEUR MOYENNE	96,08 %	

OBUHA / DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

Demandeur : Etudiant KARANGWA Barthélémy

Dossier : 0492/2024-2025

Sujet : « **Influence du tamisage des granulats sur la résistance
du béton: cas des granulats de la rivière**

Ntakangwa à Bujumbura »

Origine du matériau : RIVIERE NTAHANGWA

Nature du matériau : Grapiers non Tamisés

DETERMINATION DE LA DENSITE APPARENTE

No de l'échantillon	Masse du récipient	Volume	Masse du récipient+ échantillon	Masse de l'échantillon	Densité apparente
1	3288	5000	11430	8142	1.62
2	3288	5000	11426	8138	1.62
3	3288	5000	11433	8150	1.63
					MOYENNE=1.62

OBUHA/DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

Demandeur : Etudiant KARANGWA Barthélémy
Dossier : 0492/2024-2025

Sujet : « *Influence du tamisage des granulats sur la résistance
du béton: cas des granulats de la rivière
Ntakangwa à Bujumbura* »

Origine du matériau : RIVIERE NTAHANGWA

Nature du matériau : Gravier Tamisés

DETERMINATION DE LA DENSITE APPARENTE

No de l'échantillon	Masse du récipient	Volume	Masse du récipient+ échantillon	Masse de l'échantillon	Densité apparente
1	3288	5000	11518	8230	1.64
2	3288	5000	11500	8212	1.64
3	3288	5000	11520	8232	1.64
					MOYENNE=1.64

OBUHA/DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

Demandeur : Etudiant KARANGWA Barthélémy
Dossier : 0492/2024-2025

Sujet : « *Influence du tamisage des granulats sur la résistance
du béton: cas des granulats de la rivière
Ntakangwa à Bujumbura* »

Origine du matériau : RIVIERE NTAHANGWA

Nature du matériau : Sable non tamisé

DETERMINATION DE LA DENSITE APPARENTE

No de l'échantillon	Masse du récipient	Volume	Masse du récipient+ échantillon	Masse de l'échantillon	Densité apparente
1	1690	2000	4340	2650	1.36
2	1690	2000	4289	2599	1.39
3	1690	2000	4380	2690	1.42
					MOYENNE=1.39

OBUHA/DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

Demandeur : Etudiant KARANGWA Barthélémy
Dossier : 0492/2024-2025

Sujet : « **Influence du tamisage des granulats sur la résistance
du béton: cas des granulats de la rivière
Ntakangwa à Bujumbura** »

Origine du matériau : RIVIERE NTAHANGWA

Nature du matériau : Sable tamisé

DETERMINATION DE LA DENSITE APPARENTE

No de l'échantillon	Masse du récipient	Volume	Masse du récipient+ échantillon	Masse de l'échantillon	Densité apparente
1	1690	2000	4600	2910	1.45
2	1690	2000	4572	2882	1.44
3	1690	2000	4590	2900	1.45
					MOYENNE=1.44

OBUHA/DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA

Dossier : 0492/2024-2025

Sujet : « Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du béton : cas des Granulat de la Rivière Ntahangwa à Bujumbura »

Origine du matériau : RIVIERE NTAHANGWA

Nature du matériau : Gravier non tamisés

DETERMINATION DE LA DENSITE ABSOLUE PAR PRESEE HYDROSTATIQUE

N° de L'échantillon	Poids de l'échantillon dans l'air	Poids de l'échantillon dans l'eau + Panier	Poids du Panier	Poids de L'échantillon	Volume L'échantillon	Ys g/cm ³
1	2000	1838	635	1203	797	2.50
2	2000	1852	635	1217	783	2.55
3	2000	1865	635	1230	770	2.59
						MOYENNE=2.54

OBUHA/DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA

Dossier : 0492/2024-2025

Sujet : « Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du béton : cas des Granulat de la Rivière Ntahangwa à Bujumbura »

Origine du matériau : RIVIERE NTAHANGWA

Nature du matériau : Gravier tamisés

DETERMINATION DE LA DENSITE ABSOLUE PAR PRESEE HYDROSTATIQUE

N° de L'échantillon	Poids de l'échantillon dans l'air	Poids de l'échantillon dans l'eau + Panier	Poids du Panier	Poids de L'échantillon	Volume L'échantillon	Ys g/cm ³
1	2000	1882	635	1247	753	2.65
2	2000	1875	635	1240	760	2.63
3	2000	1880	635	1245	755	2.64
						MOYENNE=2.64

OBUHA/DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE

Détermination du coefficient de forme (aplatissement) et d'Elongation

Demandeur : KARANGWA Barthélémy

Echantillon : N° 1

Sujet : <<Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du Béton : Cas des Granulats de la Rivière Ntakangwa à Bujumbura>>

ORIGINE DU MATERIAU : Rivière Ntakangwa

DATE : 03/9/025

Nature du matériau : Grapiers 20mm

<i>Tamisage Sur tamis</i>					
<i>Classes granulaires d/D (mm)</i>	<i>M_{gi}</i>	<i>APLATISSEMENT</i>		<i>ELONGATION</i>	
		<i>Passant</i>	<i>Refus</i>	<i>Passant</i>	<i>Refus</i>
		<i>M_{ei} (g)</i>	<i>A_i</i>	<i>M_{ei} (g)</i>	<i>A_i</i>
6.3-10	111,7	50,1	61,6	45,4	76,1
10.-14	250,7	111,7	139	95,2	135,1
14-20	500,1	250,7	249,4	201,7	105,2
20-31,5	500	500	0	157,7	136,8
$\Sigma M_{ei} =$		912,5		500,0	
$M = \Sigma M_{gi} =$	1362,5				
$M_0 = \Sigma A_i =$			450		453,2
$A = (\Sigma M_{ei} / \Sigma M_{gi}) \times 100$ =		66,97		36,70	



OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION

ESSAI DE PROPETE DES GRANULATS

Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA	Dossier n° : 0903/2024-2025 Date : le 03/09/2025
Sujet : «Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du Béton : Cas des Granulats de la Rivière Ntakangwa à Bujumbura»	Opérateur : KARANGWA Barthélémy
Echantillon : n°1	Nature : GRAVIERS NON TAMISES

M_{Gs}	M_s	PROPETE en %
1000g	250g	1000-250
$\text{Pro} = \frac{M_{Gs} - M_s}{1000} * 100$		$\frac{\quad}{1000} \times 100 = 75$

OBUHA/ DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

ESSAI DE PROPLETE DES GRANULATS

Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA	Dossier n° : 0903/2024-2025 Date : le 03/09/2025
Sujet : «Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du Béton : Cas des Granulats de la Rivière Ntakangwa à Bujumbura»	Opérateur : KARANGWA Barthélémy
Echantillon : n°2	Nature : GRAVIERS TAMISES

M_{GS}	M_S	PROPLETE en %
1000g	110g	
$Pro = \frac{M_{GS} - M_S}{1000} * 100$		$\frac{1000-110}{1000} * 100 = 89$

OBUHA/ DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION

ESSAI DE POROSITE DES GRANULATS

Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA	Dossier n° : 0903/2024-2025 Date : le 03/09/2025
Sujet : «Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du Béton : Cas des Granulats de la Rivière Ntakangwa à Bujumbura»	Opérateur : KARANGWA Barthélémy
Echantillon : n°1	Nature : GRAVIERS NON TAMISES

M0	M1	POROSITE en %
1000g	972 g	$\frac{1000-972}{1000} * 100 = 2,8$
$Por = \frac{M0 - M1}{1000} * 100$		

OBUHA/ DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE



**OFFICE BURUNDAIS DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET
DE LA CONSTRUCTION**

ESSAI DE POROSITE DES GRANULATS

Demandeur : Etudiant Barthélémy KARANGWA	Dossier n° : 0903/2024-2025 Date : le 03/09/2025
Sujet : «Influence du Tamisage des Granulats sur la Résistance du Béton : Cas des Granulats de la Rivière Ntakangwa à Bujumbura»	Opérateur : KARANGWA Barthélémy
Echantillon : n°2	Nature : GRAVIERS TAMISES

M0	M1	POROSITE en %
1000g	982,2 g	
$Por = \frac{M0 - M1}{1000} * 100$		$\frac{1000 - 982,2}{1000} * 100 = 1,78$

OBUHA/ DEPARTEMENT DES ETUDES ET LABORATOIRE

Annexe 14

¹Résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 7 jours de cure

Composition théorique du béton :(CEM II/D.P.DANGOTE.42,5R) : Dosage : 350kg/m ³								
Cubes de béton réalisés avec des granulats non tamisés								
Graviers tamisés=13,9kg			Sable tamisé=7,95kg			Ciment=4,117kg ; Eau=2,057l		
N° de Cube	Date de Coulage	Date de l'Essai	Ages (Jours)	Poids de Cube (kg)	Section (Cm ²)	Compression		Observations
						Charge totale (KN)	Contrainte (MPa)	
1 ⁰	1 ^{er} /09/2025	08/09/2025	7	7,18	225	341,617	15,183	Ecrasement assisté par Ing. IRABARUTA Ides et Mr. SIBOMANA Alexis
2 ⁰	1 ^{er} /09/2025	08/09/2025	7	7,85	225	449,325	19,970	
3 ⁰	1 ^{er} /09/2025	08/09/2025	7	7,24	225	416,565	18,514	
Résistance moyenne							17,889	
Cubes de béton réalisés avec des granulats tamisés								
Graviers tamisés=14,07kg			Sable tamisé=8,24kg			Ciment=4,117kg		Eau=2,057l
1 ⁰	1 ^{er} /09/2025	08/09/2025	7	6,89	225	409,545	18,202	Ecrasement assisté par Ing. IRABARUTA Ides et Mr. SIBOMANA Alexis
2 ⁰	1 ^{er} /09/2025	08/09/2025	7	7,34	225	506,543	22,513	
3 ⁰	1 ^{er} /09/2025	08/09/2025	7	6,55	225	484,853	21,549	
Résistance moyenne							20,754	

Laboratoire des Matériaux et de Construction de l'FSI & ISSA à KIRIRI

¹ Pas d'homologation sur les résultats du Laboratoire des Matériaux et de Construction de l'FSI & ISSA à KIRIRI (UB) en tant qu'étudiants par manque de conventions.

²Résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 14 jours de cure

Composition théorique du béton :(CEM II/D.P.DANGOTE 42,5R) : Dosage : 350kg/m ³								
Cubes de béton réalisés avec des granulats non tamisés								
Graviers tamisés=13,9kg			Sable tamisé=7,95kg			Ciment=4,117kg ; Eau=2,057l		
N ^o de Cube	Date de Coulage	Date de l'Essai	Ages (Jours)	Poids de Cube (kg)	Section (Cm ²)	Compression		Observations
						Charge totale (KN)	Contrainte (MPa)	
1 ^o	1 ^{er} /09/2025	15/09/2025	14	8,11	225	447,2775	19,879	Ecrasement assisté par Ing. IRABARUTA Ides et Mr. SIBOMANA Alexis
2 ^o	1 ^{er} /09/2025	15/09/2025	14	7,90	225	458,64	20,384	
3 ^o	1 ^{er} /09/2025	15/09/2025	14	6,99	225	416,1375	18,495	
Résistance moyenne							19,586	
Cubes de béton réalisés avec des granulats tamisés								
Graviers tamisés=14,07kg			Sable tamisé=8,24kg			Ciment=4,117kg		Eau=2,057l
1 ^o	1 ^{er} /09/2025	15/09/2025	14	8,21	225	564,84	25,104	Ecrasement assisté par Ing. IRABARUTA Ides et Mr. SIBOMANA Alexis
2 ^o	1 ^{er} /09/2025	15/09/2025	14	9,0	225	546,9075	24,307	
3 ^o	1 ^{er} /09/2025	15/09/2025	14	7,07	225	505,5526	22,469	
Résistance moyenne							23,960	

Laboratoire des Matériaux et de Construction de la FSI & ISSA à KIRIRI

² Pas d'homologation sur les résultats du Laboratoire des Matériaux et de Construction de l'FSI & ISSA à KIRIRI (UB) en tant qu'étudiants par manque de conventions.

³Résultats des résistances à la compression des cubes de béton après 28 jours de cure

Composition théorique du béton :(CEM II/D.P.DANGOTE.42,5R) : Dosage : 350kg/m ³								
Cubes de béton réalisés avec des granulats non tamisés								
Graviers tamisés=13,9kg			Sable tamisé=7,95kg			Ciment=4,117kg ; Eau=2,057l		
N ^o de Cube	Date de Coulage	Date de l'Essai	Ages (Jours)	Poids de Cube (kg)	Section (Cm ²)	Compression		Observations
						Charge totale (KN)	Contrainte (MPa)	
1 ⁰	1 ^{er} /09/2025	29/09/2025	28	8,22	225	529,425	23,530	Ecrasement assisté par Ing. IRABARUTA Ides et Mr. SIBOMANA Alexis
2 ⁰	1 ^{er} /09/2025	29/09/2025	28	9,71	225	551,5425	24,513	
3 ⁰	1 ^{er} /09/2025	29/09/2025	28	7,99	225	493,605	21,938	
Résistance moyenne							23,327	
Cubes de béton réalisés avec des granulats tamisés								
Graviers tamisés=14,07kg			Sable tamisé=8,24kg			Ciment=4,117kg		Eau=2,057l
1 ⁰	1 ^{er} /09/2025	29/09/2025	28	9,80	225	690,415	30,694	Ecrasement assisté par Ing. IRABARUTA Ides et Mr. SIBOMANA Alexis
2 ⁰	1 ^{er} /09/2025	29/09/2025	28	7,50	225	669,33	29,748	
3 ⁰	1 ^{er} /09/2025	29/09/2025	28	8,46	225	725,6025	32,249	
Résistance moyenne							30,897	

Laboratoire des Matériaux et de Construction de la FSI & ISSA à KIRIRI

³ Pas d'homologation sur les résultats du Laboratoire des Matériaux et de Construction de l'FSI & ISSA à KIRIRI (UB) en tant qu'étudiants par manque de conventions.