UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Etude comparative de l’impact de la réutilisation partielle des granulats roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton : cas du Burundi

Bigirimana, Ferdinand; Sous la direction de : Dr-Ir. Nibasumba Paul

2023
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1948

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année Académique: 2021-2022

ETUDE COMPARATIVE DE L'IMPACT DE LA REUTILISATION PARTIELLE DES GRANULATS ROULES ET CONCASSES SUR LA RESISTANCE MECANIQUE DU BETON : CAS DU BURUNDI.

Mémoire

Présenté publiquement par :

BIGIRIMANA Ferdinand

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

Soutenu le 14/8/2023 devant le jury composé de :

Dr-Ir. MINANI Jérémie	**: Président**
Dr-Ir. MASEKANYA Jean Pierre	**: Lecteur principal**
Dr-Ir. NIBASUMBA Paul	**: Directeur**
Dr-Ir. BIZINDAVYI Josias	**: Membre**

Bujumbura, Août 2023

Etude comparative de l'impact de la réutilisation partielle des granulats roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton : cas du Burundi

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Dr-Ir. MINANI Jérémie : Président

Dr-Ir. MASEKANYA Jean Pierre : Lecteur principal

Dr-Ir. NIBASUMBA Paul : Directeur

Dr-Ir. BIZINDAVYI Josias : Membre

DEDICACES

Du profond de mon cœur, je dédie ce mémoire :

- A Dieu Tout Puissant ;
- A mon cher père NYANDWI Laurent, aucune dédicace ne serait exprimée l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.
- A ma très chère mère NKORIBIGAWA Eugénie qui m'a donné la vie et qui a guidé mes premiers pas dans la recherche du savoir et de la réussite. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. Je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée.
- A ma chère épouse KWIZERA Nadia : tes sacrifices, ton soutien moral, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études.
- A mes frères et sœurs, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous et vos familles.
- A mes oncles et tantes qui m'ont toujours soutenu et encouragé.
- A mes cousins et cousines pour le soutien et affection.
- A tous mes amis et amies qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre

Je dédie ce mémoire

Etude comparative de l'impact de la réutilisation partielle des granulats roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton : cas du Burundi

REMERCIEMENTS

A la fin de cette œuvre ; je tiens à signifier toute ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et plus particulièrement :

- A mon directeur de mémoire Dr-Ir NIBASUMBA Paul, enseignant à l'université du Burundi pour les conseils et orientations prodigués. Je vous remercie pour votre confiance, votre aide scientifique, vos efforts et votre soutien permanent.
- A tous le corps enseignant pour la qualité de formation reçue.

Un grand merci à ma famille à qui je dois ce que je suis devenu.

Etude comparative de l'impact de la réutilisation partielle des granulats roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton : cas du Burundi

RESUME

La réutilisation des granulats issus du béton déconstruit est une nécessité pour préserver l'environnement, économiser les ressources naturelles, épuisables et satisfaire aux exigences de la réutilisation. Par ailleurs, lorsque les granulats naturels sont substitués partiellement ou complètement par des granulats réutilisés, certaines propriétés sont altérées en raison de la présence d'ancienne pâte de ciment contenue dans les granulats réutilisés. De ce fait, la perte de maniabilité ainsi que la perte de résistance à la compression sont importante lorsque ces granulats sont incorporés au béton.

L'objectif principal du présent travail est d'étudier l'impact de l'usage partiel des granulats réutilisés roulés et concassés afin de prédire la perte de résistance mécanique du béton, de savoir à quel degré de substitution la perte de résistance n'est pas significative. Il s'agit aussi de montrer parmi ces deux types de granulats le quel est plus approprie pour être réutilisé avec des granulats naturels, étant donné qu'il entraine une plus faible perte de résistance du béton.

Une étude expérimentale a été conduite sur des bétons confectionnés au laboratoire pour déterminer les différentes propriétés des granulats. Les propriétés du béton à l'état frais sous différents taux de substitutions (15%,30%,50% et 75%) des graviers et la résistance mécanique du béton à l'état durci ont été déterminées.

Les résultats montrent qu'en mélangeant les granulats réutilisés avec des granulats naturels, on enregistre une perte de maniabilité causée par la porosité des granulats réutilisés.

La chute de la résistance des bétons ainsi confectionnés est dans l'ordre de 1,5% jusqu'à 25% pour le taux de substitution n'excédant pas 75%. Elle n'est pas significative lorsque ce taux est inférieur à 30%.

Les résultats révèlent aussi que de tels bétons présentent une porosité élevée dans l'ordre de 5fois que celle du béton de référence. De plus, on observe une diminution de la masse volumique du béton de 1,3% et plus. Par conséquent, un avantage s'observe au cas où on réalise des ouvrages en béton léger.

Mots-clés : granulats réutilisés, maniabilité, absorption, E/C, résistance à la compression.

Etude comparative de l'impact de la réutilisation partielle des granulats roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton : cas du Burundi

ABSTRACT

The reuse of aggregates emanating from deconstructed concrete is crucial for it helps preserve the environment, saves the natural resources that are likely to undergo deterioration, and meets the needs in reformation. Furthermore, when natural aggregates and the reused ones are partially or completely mixed up, some properties fade away owing to the availability of the former cement paste containing within the reused aggregates. Therefore, the loss in both workability and resistance to compression grow quite considerable when such aggregates get involved into the concrete.

This work mainly aims at studying the impact of the partial presence of the reused aggregates, either rolled or crushed; in order to predict the loss in mechanical resistance, to know to what extent in the mixture the loss in resistance is not high and to find out which between both systems presents a low loss in resistance so that, when both types of reused aggregates are incorporated in natural aggregates, we can be aware of the better choice after knowing the efficient and appropriate one.

An experimental study has been dealt with on constructed concretes performed on laboratory to determine different properties of aggregates, the concrete for normal features under different rates of mixture of gravels (15% ,30% ,50%, and 70%), and mechanical resistance of the rough concrete has been discovered.

The results show that when mixing reused aggregates with natural aggregates, there is a loss of workability caused by the porosity of the reused aggregates.

The drop in strength of the concrete thus produced is in the order of 1,5% to 25% for the substitution rate not exceeding 75%.It is not significant when this rate is less than 30%.

The results also reveal that such concretes have a high porosity in the order of 5times that of the reference concrete. In addition, a decrease in the density of the concrete of 1,3% and more is observed. Therefore, an advantage is observed when lightweight concrete structures are built.

Key words: reused aggregate, workability, assimilation, E/C, persistence to compression.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i

DEDICACES ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES xi

SIGLES ET ABREVIATIONS xiii

AVANT-PROPOS xiv

CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE 1

I.1 Contexte du sujet 1

I.2 Problématique 2

I.3 Objectif global de l'étude 2

I.4 Objectif spécifique de l'étude 3

I.5 Délimitation du sujet 3

I.6 Démarche méthodologique 3

I.7 Résultats attendus 4

CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTERATURE 5

II.1 Introduction 5

II.2 Les granulats au Burundi 6

II.3 Généralité sur les granulats dans les bétons 6

II.3.1 Définition 6

II.3.2 Les différents types des granulats 6

II.3.3 Les caractéristiques des granulats 7

II.4 Les granulats réutilisés 9

II.4.1 Production des granulats réutilisés 9
II.4.2 Caractéristiques des granulats réutilisés 11
II.4.3 Propriétés physiques des granulats réutilisés 12
II.4.4 Propriétés mécaniques des granulats réutilisés 14
II.5 Béton de granulats réutilisés 16
II.5.1 Propriétés à l'état frais 17
II.5.2 Caractéristiques physiques à l'état durci 17
II.5.3 Propriétés mécaniques des bétons incorporant des granulats réutilisés 18
II.6 Impacts négatifs liés à l'extraction et à l'utilisation des granulats naturels sur l'environnement 20
II.7 Comportement des structures en béton réutilisés 21
II.8 Conclusion 21
CHAPITRE III: METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPERMENTALE 22
III.1 Introduction 22
III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés 22
III.2.1 Ciment 22
III.2.2 L'eau 22
III.2.3 Le sable 22
III.2.3.1 Teneur en eau 23
III.2.3.2 Masse volumique absolue 23
III.2.3.3 Masse volumique apparente 25
III.2.3.4 Module de finesse 26
III.2.4 Le gravier 27
III.2.4.1 Teneur en eau 28
III.2.4.2 Masse volumique absolue 29
III.2.4.3 Masse volumique apparente 31
III.2.4.4 Absorption d'eau 32

III.3. L'Analyse granulométrique des granulats utilisés dans le présent travail..... 34
III.4 Formulation des bétons de l'étude..... 38
III.5 Confection des échantillons de béton. 49
III.6 Essais macrostructuraux 51
III.7 Conclusion..... 52
CHAPITRE IV: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS 53
IV.1 Introduction 53
IV.2 Résultats de l'étude 54
IV.2.1 Propriétés des bétons à l'état frais..... 54
IV.2.2 Propriétés des bétons à l'état durci..... 55
IV.3 Discussion des résultats..... 60
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION 63
Conclusion générale 63
Recommandations 65
BIBLIOGRAPHIE 66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 :séries de tamis employés 7
Tableau II-2 :Propriétés physiques des granulats utilisés dans le cadre des projets 14
Tableau III-1 : Teneur en eau du sable 23
Tableau III-2 : Masse volumique absolue du sable 25
Tableau III-3 :Masse volumique apparente du sable 25
Tableau III-4 :Paramètres physiques du sable utilisé 27
Tableau III-5 :Calcul de la teneur en eau 29
Tableau III-6 :Masse volumique absolue du gravier 31
Tableau III-7 :Masse volumique apparente du gravier 31
Tableau III-8 : Absorption du gravier 32
Tableau III-9 : Paramètres physiques du gravier roulé utilisé 33
Tableau III-10 Paramètres physiques du gravier concassé utilisé 33
Tableau III-11 : Paramètres physiques du gravier concassé réutilisé mis en place. 33
Tableau III-12 : Paramètres physiques du gravier roulé réutilisé mis en place. 34
Tableau III-13 : Granulométrique du sable de la rivière Mugere 35
Tableau III-14 : Granulométrique du gravier de la rivière mugere 36
Tableau III-15 : Granulométrique du gravier du site de Gakungwe 36
Tableau III-16 :Granulométrique du gravier réutilisé concassé 36
Tableau III-17 :Granulométrique du gravier réutilisé roulé 36
Tableau III-18 : Données de base pour la formulation du béton 39
Tableau III-19 : correction sur le dosage en eau 40
Tableau III-20 : les valeurs de K en fonction du dosage en ciment, forme de granulats et l'efficacité du serrage 41
Tableau III-21 : Formulation du béton de l'étude 44
Tableau III-22 : Données de base pour la formulation du béton 44
Tableau III-23 : Formulation du béton de l'étude 46
Tableau III-24 : substitution volumique des graviers réutilisés roulés 46
Tableau III-25 : substitution massique des graviers réutilisés roulés 47
Tableau III-26 : Masse des granulats nécessaires pour la formulation du béton(BO-GRR) 47
Tableau III-27 :substitution volumique des graviers réutilisés concassées 48
Tableau III-28 : substitution massique des graviers réutilisés concassés 48
Tableau III-29 : Masse des granulats nécessaires pour la formulation du béton(BO-GRC) 49

Tableau IV-1 : Valeurs des affaissements en fonction de la nature des granulats 54
Tableau IV-2 :Valeurs de la masse volumique en fonction de la nature des granulats..... 55
Tableau IV-3 :Valeurs de l'absorption en fonction de la nature des granulats 56
Tableau IV-4 : Valeurs de la contrainte de rupture et moyenne en fonction de la nature des granulats du béton (BO-GR) et (BO-GRR)..... 57
Tableau IV-5 : Valeurs de la contrainte de rupture et moyenne en fonction de la nature des granulats du béton (BO-GC) et (BO-GRC)..... 58

LISTE DES FIGURES

Figure II-1 Répartition des granulats en France ; 9
Figure II-2 Secteurs de provenance des matériaux ; 9
Figure II-3 :Techniques d'élaboration des granulats réutilisés. 10
Figure II-4 :Aspect des granulats naturels et réutilisés [4]..... 12
Figure II-5 :Evolution de la capacité d'absorption en fonction de la teneur en mortier attaché [30]. 13
Figure II-6 : Relation entre la teneur en mortier et la résistance à la fragmentation [34] 15
Figure II-7 a) Effet du coefficient d'absorption sur le paramètre Los Angeles(LA) des granulats recyclés, b) Effet du taux de substitution massique sur le paramètre Los Angeles(LA) des granulats [34] ; 16
Figure II-8 :Evolution de la maniabilité au cours du temps [4] 17
Figure II-9 :Résistances à la compression des bétons C25/30 et C35/45..... 19
Figure II-10 :Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution..... 20
Figure II-11 :Impact de l'extraction des granulats dans les lits de rivière au Burundi ; 21
Figure III-1 : Mesure de la masse volumique absolue du sable 24
Figure III-2 :Mesure de la masse volumique apparente du sable..... 26
Figure III-3 : les graviers utilisés dans le présent travail ; 28
Figure III-4 : Mesure de la masse volumique absolue du gravier..... 30
Figure III-5 :Masse volumique apparente du gravier..... 32
Figure III-6 :Série des tamis utilisée pour faire l'analyse granulométrique selon la norme NF EN 993-1 35
Figure III-7 :Courbes granulométriques des granulats utilisés 37
Figure III-8 :Abaque d'estimation du dosage en ciment..... 40
Figure III-9 :Estimation des proportions de granulats..... 43
Figure III-10 :Estimation des proportions de granulats 45
Figure III-11 :Organigramme de la fabrication des éprouvettes 50
Figure III-12 :Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau 51
Figure III-13 : Presse hydraulique programmable 52
Figure IV-1 : Evaluation de maniabilité à l'aide de la mesure d'affaissement par le type des granulats ; 54
Figure IV-2 :Evaluation de la masse volumique par la nature des granulats 55

Figure IV-3 : Evaluation de la capacité d'absorption par la nature des granulats 56
Figure IV-4 : Evaluation de la contrainte de rupture des bétons par la nature des granulats... 58
Figure IV-5 :Evaluation du taux de Petre de résistance mécanique des bétons en fonction du pourcentage des granulats réutilisés ;..... 59

SIGLES ET ABREVIATIONS

BO –GC : Bétons ordinaire confectionné avec des granulats concassés ;

BO –GR : Bétons ordinaire confectionné avec des granulats roulés ;

BO-GRC : Bétons ordinaire confectionné avec des granulats concassés et avec Substitution des granulats réutilisés concassés ;

BO-GRR : Bétons ordinaire confectionné avec des granulats roulés et avec substitution granulats réutilisés roulés ;

BTP : Bâtiments des Travaux Publics ;

E/C : rapport eau sur ciment ;

N.F : Norme Française ;

R.C (%) : Refus cumulés en pourcentage ;

R.C (g) : Refus cumulés en gramme ;

UNPG : Union Nationale des Producteurs de Granulats ;

WA24 : Teneur d'absorption après 24heures .

AVANT-PROPOS

Le besoin croissant des granulats au Burundi provoque un épuisement des ressources naturelles. Ainsi, l'usage des granulats réutilisés dans la fabrication du béton de structure ou de bétons de faible performance est un moyen de répondre aux besoins tout en sauvegardant l'environnement dans une approche durable.

Afin d'étudier l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassés, le présent travail a été mené sur des bétons réalisés avec un seul type de sable, un seul type de ciment et avec substitution des graviers sous un taux de 15%,30%,50% et 75%. Afin de répondre à des objectifs du présent travail, Ce mémoire est fait des chapitres dont chacun dresse une étude détaillée en la matière sur laquelle il repose. Ainsi, aucun chapitre ne ressemble l'autre ; chacun a son propre objet d'étude.

Néanmoins, ils sont tous attachés à la recherche profonde qui repose sur l'étude comparative de la réutilisation partielle des granulats roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton. En effet, la partie conclusive suggère le type de granulat conseillé à être utilisé entre les granulats réutilisés roulés et concassés compte tenu de leur moindre perte de résistance.

Etant donné qu'il y a une demande croissante en granulats dans le secteur de la construction, plus particulièrement au cours de la saison sèche, la motivation de ce sujet n'est autre que de vérifier si réellement l'usage de l'un des granulats réutilisés qui est suggéré peut résoudre ce problème.

CHAPITRE I:INTRODUCTION GENERALE

I.1 Contexte du sujet

Le BURUNDI est un pays africain qui produit de déchets de chantier [1]. La solution viable pour valoriser ces déchets et pour minimiser l'approvisionnement des ressources naturelles consiste à utiliser ces déchets en tant que granulats en substitution aux granulats naturels pour la fabrication du béton des structures. La valorisation des granulats issus de la démolition des bâtiments et des ouvrages achevant leur durée de vie permet de satisfaire à l'exigence burundaise de la réutilisation.

La pratique de l'usage des granulats réutilisés n'est pas nouvelle pour le secteur des travaux publics. L'utilisation des granulats issus de la déconstruction des ouvrages de génie civil est un enjeu majeur du développement durable et apparait comme la solution d'avenir pour préserver les ressources naturelles et limiter les zones de stockage. Néanmoins, les granulats réutilisés possèdent des propriétés différentes de celles des granulats naturels à cause de la présence du mortier et de la pâte de ciment résiduel qui restent attachés aux grains naturels après le processus de production. Ces caractéristiques particulières des granulats réutilisés influent directement sur la performance du béton à court et à long terme.

L'objectif principal du présent travail est d'étudier l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassées sur la résistance mécanique du béton afin de prédire la perte de résistance mécanique, de connaitre le degré de substitution où la perte de résistance n'est pas importante et de suggérer le type de granulat réutilisé, roulé ou concassé à être utilisé en vue de la moindre perte de résistance du béton. Afin de répondre à ces objectifs, le présent mémoire est présenté en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'introduction générale du présent travail ;

Le deuxième chapitre est dédié à une étude bibliographique qui dresse un état de l'art des travaux antérieurs menés sur le béton des granulats réutilisés ;

Le troisième chapitre extrait la caractérisation des matériaux utilisés pour l'étude expérimentale ;

Le quatrième chapitre du présent travail porte sur l'analyse et la discussion des résultats ;

Le présent travail se termine par la conclusion générale et une recommandation.

I.2 Problématique

En 2020, le gouvernement burundais a découvert qu'il y a l'exploitation anarchique des granulats des lits des rivières et des montagnes et a constaté que cela peut causer des problèmes environnementaux tels que la destruction des ouvrages de franchissement suite au dragage des granulats des lits des rivières, glissement des terrains pour les espaces montagneux et la pollution de l'environnement en générale.

C'est ainsi qu'il a décidé de suspendre l'extraction des granulats naturels des lits de rivière et des carrières. Cette mesure a perturbé le travail des chantiers de construction par manque des solutions de rechange. Ceci a amené à penser que l'usage des granulats réutilisés issus de démolition des constructions existantes serait une alternative dans de telles situations d'où l'idée du présent sujet de recherche.

Ce sujet de mémoire mène une étude expérimentale pour évaluer l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton.

Quoique cette étude soit expérimentale et suggère des solutions indispensables pour assurer la sauvegarde de l'environnement, elle fait surgir de multiples questions :

1. Etant donné que l'exploitation incontrôlée des ressources naturelles est atroce, est-ce que l'usage des granulats réutilisés suffit seul si on tient compte de leur résistance mécanique ?
2. Sachant que l'objet d'étude a été incité par des occurrences ayant à faire avec la perturbation de l'environnement au Burundi et que deux types de granulats réutilisés (granulats réutilisés roulés et concassés) ont été proposés comme solution, lequel parmi eux serait préférable par rapport à l'autre ?
3. Quelles sont les mesures mises en place par le Gouvernement après avoir aperçu l'existence de l'exploitation anarchique des ressources naturelles depuis l'an 2020 ? Si des mesures sont déjà à la disposition, sont-elles absolument efficaces et complètes ; sans défit ?

I.3 Objectif global de l'étude

L'objectif principal du présent travail est d'étudier l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton.

I.4 Objectif spécifique de l'étude

Parmi les objectifs spécifiques du présent travail, on peut étiqueter :

- ✓ Evaluation du taux de perte de résistance mécanique des bétons à base des granulats réutilisés ;
- ✓ Vérifier si la différence de résistance des bétons fabriqués à base des granulats naturels roulés et concassés est la même que celle des bétons fabriqués à base des granulats réutilisés roulés et concassés ;
- ✓ Préservation de l'environnement par l'élimination du dépôt sauvage des gravats ;
- ✓ Suggérer le type de granulat réutilisé roulé ou concassé à être utilisé compte tenu de la moindre perte de résistance du béton ;
- ✓ Répondre à la demande croissante en granulats locales ;
- ✓ Contribution à la mise en valeur des granulats réutilisés au Burundi ;

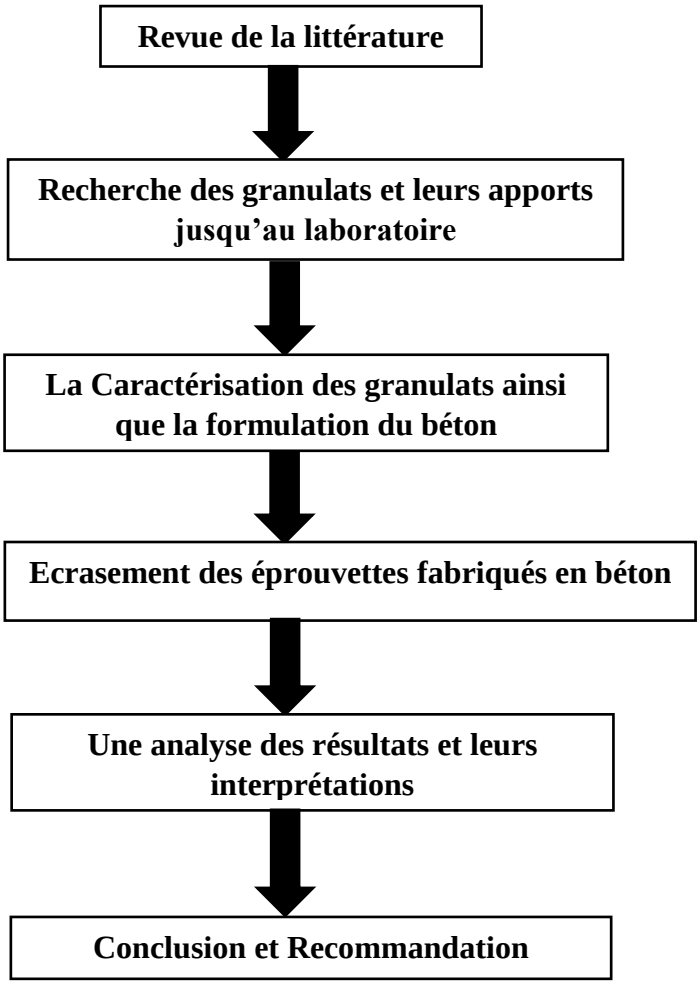
I.5 Délimitation du sujet

Le présent travail se limite sur des matériaux locaux (graviers, sable et eau) et des autres qui proviennent de la démolition des bâtiments locaux (granulats réutilisés) ainsi que ceux en provenance des pays étrangers : par exemple le liant hydraulique (Ciment DANGOTE)

I.6 Démarche méthodologique

- ✓ La première étape de ce travail est de mener une étude bibliographique sur les granulats (leurs provenances, leurs caractéristiques et leurs propriétés) plus particulièrement sur les granulats réutilisés ainsi que sur le béton et sa formulation ;
- ✓ La deuxième étape est la recherche des granulats locaux de la rivière Mugere et site de concassage de kizingwe et des granulats qui proviennent de la démolition des ouvrages existants (de 2 sortes : roulés et concassés) et du liant hydraulique (ciment) et apport de ces derniers jusqu' au laboratoire du campus kiriri ;
- ✓ La troisième étape est de faire la caractérisation des ces granulats ainsi que la formulation du béton qui fait l'object de cette étude ;
- ✓ La quatrième étape est de faire une analyse des résultats trouvés à base des essais faits au laboratoire et leurs interprétations.

  Cette démarche méthodologique du présent travail peut être représentée schématiquement de la manière suivante :



I.7 Résultats attendus

A la fin de cette étude, les résultats attendus sont entre autres :

- ✓ La variation de la résistance mécanique du béton pour ces types des granulats étudiés ;
- ✓ La variation du taux de perte de résistance en fonction du degré de substitution des granulats réutilisés ;
- ✓ Le granulat le mieux conseillé entre les granulats réutilisés roulés et concassées lorsqu'ils sont incorporés dans les granulats naturels ;
- ✓ Les caractéristiques différentes lorsque qu'on recourt à la comparaison entre le béton substitué avec des granulats réutilisés et celui de référence.

CHAPITRE II:REVUE DE LA LITTERATURE

II.1 Introduction

Le secteur de la construction a généré, en France, 246 millions de tonnes de déchets composés en quasi-totalité de déchets inertes ne présentant pas de danger pour la santé humaine et l'environnement. La valorisation de ces déchets permet de limiter l'extraction des ressources vierges et de réduire, par conséquent, l'émission des gaz à effet de serre. Les possibilités de valorisation possible pour les déchets inertes sont : le réemploi direct sur le chantier, la réutilisation en remblais pour le réaménagement des carrières et, enfin, l'acheminement vers les plateformes de recyclage.

Les granulats de béton réutilisé peuvent être incorporés dans le béton et représentent un alternatif promoteur aux granulats naturels pour la formulation de nouveaux bétons destinés au secteur du bâtiment [1]. Dans ce contexte, deux projets nationaux de recherche ont été réalisés dans l'objectif de favoriser la réutilisation intégrale des produits issus des bétons déconstruits : le PN RECYBETON [2] qui a été lancé en 2012 pour une période de 4 ans et l'ANR VRD ECOREB, qui a débuté en 2013 et qui s'est achevé en 2016 [3]. Les deux projets ont permis de mettre au point certaines formulations du béton de structures et ont étudié la performance de ces bétons aux états frais et durci. Dans le cadre de l'ANR ECOREB, et plus particulièrement au niveau de la thèse de Minh-Duc Nguyen [4], des outils de connaissances et de simulation du comportement des bétons réutilisés ont été développés. La validité des relations analytiques développées pour prédire les propriétés mécaniques du béton de granulats naturels en vue de leur utilisation pour le béton de granulats réutilisés a été révisée et les modifications appropriées ont été proposées afin de tenir compte de la présence des granulats réutilisés [5].

Dans ce chapitre, on présente premièrement la production des granulats au Burundi. En deuxième lieu les généralités sur les granulats dans le béton plus particulièrement les granulats réutilisés, puis généralités sur les bétons réutilisés et ses constituants, les propriétés essentielles des bétons réutilisés et enfin la formulation des bétons à base des granulats naturels avec substitution des granulats réutilisés.

II.2 Les granulats au Burundi

En fait, les granulats sont classés selon leur provenance. Toutefois, au Burundi, on distingue des granulats naturels : parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent des roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, des roches métamorphiques telles que les quartz ou des roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats naturels en deux catégories :

- Les granulats naturels roulés : dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans des lits des rivières
- Les granulats naturels de carrières : sont obtenus par abattage et par concassage suivi des opérations de criblage ou de tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précisée. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de différents paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage. Ces granulats ont une bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. Ils sont extraits dans les montagnes.

II.3 Généralité sur les granulats dans les bétons

II.3.1 Définition

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XPP18-540 [6]

Un granulat est un ensemble de grains compris entre 0 et 125mm destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches des fondations et de base de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballast de voies ferrées, des remblais [6].

II.3.2 Les différents types des granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée.

- ✓ Granulats naturels : lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'il subit aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- ✓ Granulats artificiels : lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou des minerais,
- ✓ Granulats réutilisés : lorsqu'ils proviennent de la démolition des ouvrages ou lorsqu'ils sont obtenus grâce au recyclage.

II.3.3 Les caractéristiques des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication [6].

Le prélèvement d'un échantillon pour la caractérisation doit se faire conformément aux normes NF P18-553 et EN932-1 relatives au prélèvement par échantillonneur ou par quartage [7] [8].

- ✓ Les caractéristiques géométriques

Les granulats peuvent avoir des formes sphériques, cubiques, nodulaires, plates ou allongées. Ces caractéristiques ainsi que l'état de surface des grains influent sur l'aptitude à la mise en place du béton frais, la résistance mécanique et durabilité du béton durci.

- **Module de finesse(MF)** :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur une série de tamis. Le tableauII.1 représente la série des tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme prise en compte [6] [9] [10].

Tableau II-1 :séries de tamis employés

01	Tamis : 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 et 5mm pour NF P 18-540 [11].
02	Tamis : 0,125-0,25-0,5-1-2 et 4mm pour EN12620 [12].

Un bon sable pour le béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 et 2,8. Au-dessous, le sable est à majorité d'élément fin et très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau, au-dessus, le sable manque de fins et le béton y perd en ouvrabilité [9] [10].

- **Forme** :

Une bonne forme des granulats est essentielle pour éviter des chutes de résistances des bétons par suite du risque d'apparition de plans de glissement potentiels. La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales : l'épaisseur(E), la grosseur(G), la longueur (L).

Pour différents usages, il est conseillé d'utiliser des granulats les plus isotropes possibles. Une forme assez ramassée des granulats est très recommandée pour une utilisation dans le béton [6].

- **La pâte cimentaire attachée aux granulats :**

Les granulats réutilisés contiennent du mortier et pâte cimentaire, qui sont toujours présents et collés aux granulats. Au Japon, les recherches ont abouti à une méthode, qui consiste à l'enlèvement de mortier à partir de la surface des granulats sans écraser les granulats [13]. Les principaux facteurs qui influent sur la quantité de la pâte cimentaire rattaché aux granulats réutilisés sont : le rapport E/C, la résistance du béton source des granulats [14] et la taille des granulats réutilisés [13].

- ✓ Les caractéristiques physiques

On peut les classer en deux groupes [15], celles qui concernent le granulat lui-même, et celles qui concernent la teneur en substances étrangères et nocives.

- **Les masses volumiques** :

Les masses volumiques des granulats sont définies et déterminées suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6 [16] [17] [18] [19] [20].

- La **Masse Volumique Apparente (**en vrac**)** : C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores inter-granulaires.
- **La Masse Volumique Absolue (**Mv abs) : C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (hors pores). Il existe 3 façons généralement employées pour déterminer ces masses volumiques en fonction de la précision recherchée et de la nature du granulat :

- Méthode de l'éprouvette graduée,
- Méthode de la mesure au pycnomètre : La masse des particules solides est obtenue par pesage, le volume est mesuré au pycnomètre,
- Méthode de la pesée hydrostatique : Cette méthode est également utilisée pour déterminer des volumes apparents après paraffinage du matériau ou par graissage.

Les granulats sont dits: Légers si " Mvabs < 2 t / m^3 ", Courants si " 2t / m^3 < Mvabs <3 t / m^3 " et Lourds si " Mvabs >3 t / m^3 " [10].

En général, la densité des granulats réutilisés est inférieure à celle des granulats naturels, à cause de la faible densité de la pâte cimentaire rattaché aux granulats [13].

- **LA POROSITE (P) :**

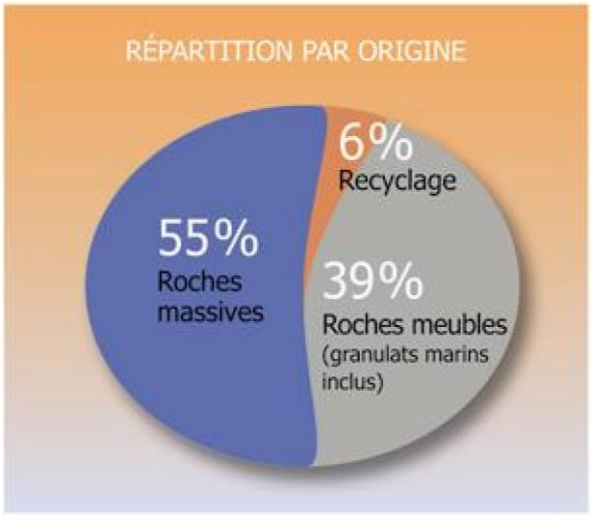
C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon les normes "NF P18 554, EN

1097-3" [16] [17]. La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface [21].

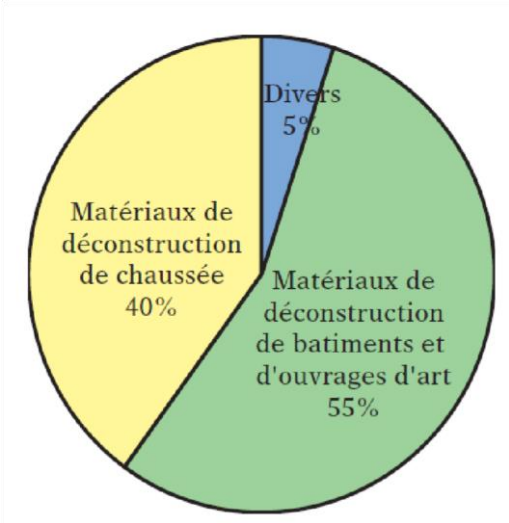
- **TENEUR EN EAU (W %)** : La teneur en eau est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon [6].

II.4 Les granulats réutilisés

La production totale des granulats réutilisés s'élève, d'après l'UNPG [26], à 21 millions de tonnes; soit 6% du volume total produit en France en 2009 (Figure II-1). Ces granulats réutilisés proviennent essentiellement des matériaux de déconstruction de bâtiment et d'ouvrages d'art et des matériaux de déconstruction de chaussées (Figure II-2). Par la suite, nous nous intéressons aux granulats issus de la démolition des bâtiments et de la déconstruction des ouvrages d'art. Nous rappelons d'abord les étapes de leur production et nous présentons ensuite leurs propriétés physiques et mécaniques.



1)



2)

,

Figure II-1 Répartition des granulats en France ;

Figure II-2 Secteurs de provenance des matériaux ;

II.4.1 Production des granulats réutilisés

Le processus de production passe par les trois étapes suivantes : concassage, criblage et éventuellement lavage. Cependant, un prétraitement qui consiste à réaliser le cisaillage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments est nécessaire. Des opérations de triage manuel ou mécanique sont ensuite effectuées pour enlever les impuretés au cours du processus de

production. Les plus gros débris (les plaques de métal, les panneaux de bois, les aciers d'armature, le papier, le plastique, etc.) sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire. Par ailleurs, pour enlever les impuretés légères, Québaud [27]propose deux procédés : l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide. Pour la première solution, les granulats sont entraînés par un courant d'air sur des distances variables selon leur forme et leur nature. En ce qui concerne la 2ème technique, l'épuration par voie humide (flottaison), la séparation est réalisée au moyen d'un bain dans lequel les granulats réutilisés sont transportés à l'aide d'une bande immergée où les fractions légères qui flottent sont séparées par des jets d'eau à contre-courant.



Elimination des matériaux légers par jet d'air

Déferraillage

Machine de lavage « Aquamator »

Figure II-3 :Techniques d'élaboration des granulats réutilisés.

Le concasseur à percussion présente une meilleure réduction de la granulométrie (avec moins d'éléments fins) et facilite la séparation des armatures du béton mais l'usure du matériel est importante et la granulométrie d'entrée limitée [28]. Il permet également d'obtenir une meilleure cubicité du matériau sortant [27]. En ce qui concerne les appareillages spécifiques à l'amélioration des granulats réutilisés, on trouve tous les appareillages permettant d'éliminer les impuretés. Des électro-aimants peuvent être ajoutés au circuit de concassage pour enlever les débris métalliques. Ils sont installés à la sortie des concasseurs et recueillent les éléments métalliques. L'élimination des contaminants légers peut se faire par flottation du type « Aquamator » (Figure II-3).

La figure II-3 représente un schéma d'installation de production de granulats réutilisés. Le nombre de concasseurs utilisés dépend de la qualité de granulat à obtenir. L'utilisation d'un seul concasseur donne des matériaux de qualité moins bonne même si le matériau de départ est relativement propre. De plus, procéder à un seul concassage n'enlève pas toutes les impuretés où seuls les débris métalliques sont enlevés grâce à l'électro-aimant. L'utilisation d'un deuxième concasseur permet de procéder à une deuxième opération de triage (manuel et magnétique), ce qui donne un matériau beaucoup plus propre.

En guise de conclusion sur la fabrication de ce type de granulat, Cimpelli et Lefort [29] proposent un résumé des différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage :

- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un marteau hydraulique ;
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires suivi d'un déferraillage électromagnétique ;
- Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné à retirer les impuretés ;
- Concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire ;
- Conservation des granulats réutilisés dans des aires de stockages sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou soit en silos.

II.4.2 Caractéristiques des granulats réutilisés

Les propriétés des granulats réutilisés dépendent de plusieurs paramètres de production tels que la procédure du concassage et la qualité du béton d'origine [1]. L'aspect des gravillons réutilisés est comme celui des gravillons naturels concassés. Par ailleurs, les propriétés des gravillons réutilisés sont complétement différentes. En général, les particules du béton concassé sont plus anguleuses et ont une texture plus rugueuse que celle des granulats naturels (Figure II.4). De même, le sable réutilisé possède une forme plus anguleuse que le sable naturel.



Gravillons naturels 4/10



Gravillons naturels 6,3/20



Gravillons réutilisés 4/10



Gravillons réutilisés 10/20

Figure II-4 :Aspect des granulats naturels et réutilisés [4].

Les granulats réutilisés de béton diffèrent principalement des granulats naturels du fait qu'ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulat naturel et le mortier de ciment qui y est accroché [30].

II.4.3 Propriétés physiques des granulats réutilisés

La densité des granulats réutilisés est généralement inférieure à celle des granulats naturels en raison de la faible densité du mortier adhérant aux grains naturels. Elle dépend des paramètres suivants :

- Les propriétés mécaniques du béton parent : pour un volume de mortier adhérant équivalent, les granulats réutilisés obtenus d'un béton ayant des propriétés mécaniques élevées ont une densité plus importante par rapport aux granulats issus d'un béton parent plus faible [31].
- La granulométrie : la densité varie avec la taille des grains. Elle diminue lorsque la taille des grains diminue.
- La technique de production utilisée : la densité est fonction du type de concasseur utilisé [27].

Quant à la capacité d'absorption d'eau, elle représente la différence majeure entre les granulats réutilisés et les granulats naturels et dépend des paramètres suivants :

- La granulométrie : la capacité d'absorption est inversement proportionnelle à la taille des grains. Elle est d'autant plus importante que les grains sont petits [4].

La teneur en mortier attaché : Poon et al [32] ont démontré que l'aptitude des granulats réutilisés à absorber l'eau augmente lorsque la teneur en mortier attaché est importante et que cette aptitude est indépendante des propriétés mécaniques des granulats. Selon l'étude conduite par

de Juan et Gutiérrez [30], la capacité d'absorption est d'autant plus importante que la teneur en mortier attaché est importante.

- La densité : la densité et la capacité d'absorption sont étroitement liées. Les granulats réutilisés, en raison de l'ancien mortier qui reste attaché aux grains originaux, possèdent une densité plus faible et une capacité d'absorption plus élevée que les granulats naturels [33].

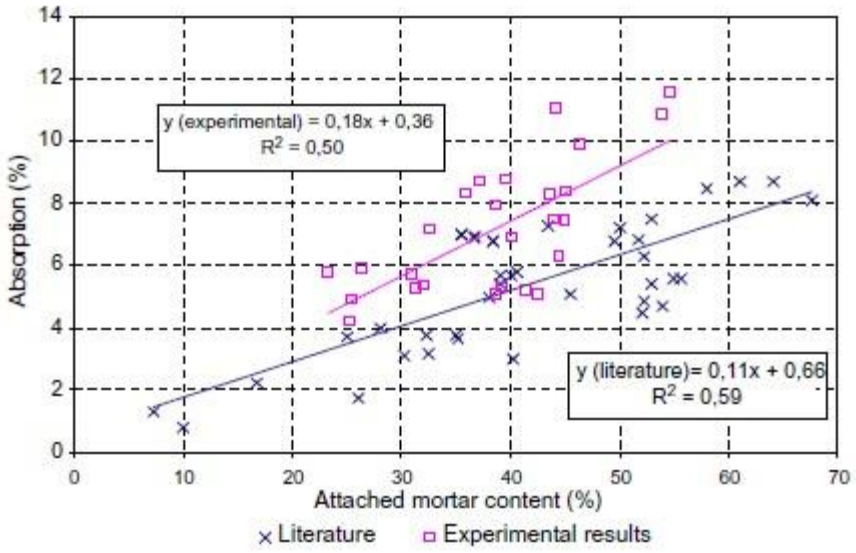


Figure II-5 :Evolution de la capacité d'absorption en fonction de la teneur en mortier attaché [30].

Le tableau II.2 récapitule les propriétés des granulats utilisés dans le cadre des projets nationaux PN RECYBETON [2] ainsi que l'ANR ECOREB [3]. Les granulats naturels ont des masses volumiques plus importantes, et des coefficients d'absorption plus faibles par rapport aux granulats réutilisés. Ceci s'explique par la présence de l'ancien mortier qui s'adhère aux grains naturels et qui est caractérisé par une forte porosité mais également par un réseau de fissures dû au concassage. Ces résultats sont en accord avec les résultats des références bibliographiques. RECYBETON et ECOREB [1] [4]

Tableau II-2 :Propriétés physiques des granulats utilisés dans le cadre des projets

Granulats	**[g/cm^3]**	**WA24**
Sable naturel (SN 0/4)	2,62	0,87
Gravillon naturel (GN 4/10)	2,72	0,56
Gravillon naturel (GN 6.3/20)	2,76	0,47
Sable recyclé (SR 0/4)	2,18	8,78
Gravillon recyclé (GR 4/10)	2,27	5,82
Gravillon recyclé **(**GR 10/20)	2,28	5,56

II.4.4 Propriétés mécaniques des granulats réutilisés

Les propriétés mécaniques des gravillons sont obtenues à l'aide de l'essai Los Angeles qui estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement. Le but de cet essai est de mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite par fragmentation en soumettant le matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation. Le coefficient de Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est tendre. La norme NF EN 12620 recommande des valeurs maximales de 35 pour l'utilisation des granulats dans les bétons hydrauliques.

La présence du mortier réduit la résistance aux chocs et à l'usure des granulats réutilisés [1] [27]. D'après l'étude menée par de Juan et Gutiérrez [30], la valeur de Los Angeles augmente lorsque la teneur en mortier attaché augmente bien que seulement une tendance entre les deux propriétés ait été obtenue. Par contre, la résistance à la fragmentation augmente si la résistance du béton parent est élevée.

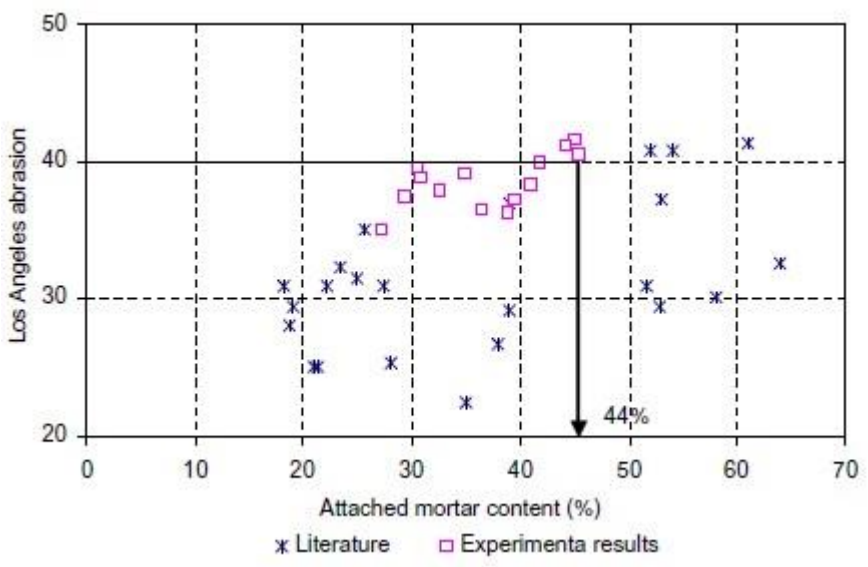


Figure II-6 : Relation entre la teneur en mortier et la résistance à la fragmentation [34]

La Figure II-6 représente les résultats des essais réalisés dans le cadre du projet national PN RECYBETON [1] sur différentes classes de granulats réutilisés (4/6, 6/10, 10/14 et 14/20) ainsi qu'un granulat concassé siliceux naturel (10/14) pris comme granulat de référence. Dans cette étude, pour évaluer la linéarité du comportement le nombre de tours a été varié entre 20 et 6 000. Pour le granulat naturel, la linéarité entre la quantité de fines générées (passant à 1,6 mm) avec le nombre de tours est gardée jusqu'à 2000 tours. Le comportement est différent pour les diverses fractions des granulats de béton réutilisé (GBR) avec un taux de particules fines générées plus élevé que pour les granulats naturels. Il a été conclu que le mortier adhérent a été le premier à se fragmenter sous les impacts des boulets métalliques. Lorsque la teneur en mortier adhérent a diminué, le comportement des GBR devient alors comparable à celui du granulat naturel d'origine.

Omary et Al [34] ont étudié l'influence des propriétés physiques des granulats réutilisés sur la résistance mécanique, caractérisée par le coefficient Los Angeles nommé LA. Ils ont établi que le coefficient varie linéairement avec le coefficient d'absorption, WA24. De plus, ils ont montré que la résistance d'un mélange des granulats naturels et réutilisés est proportionnelle au taux de substitution massique en granulats réutilisés.

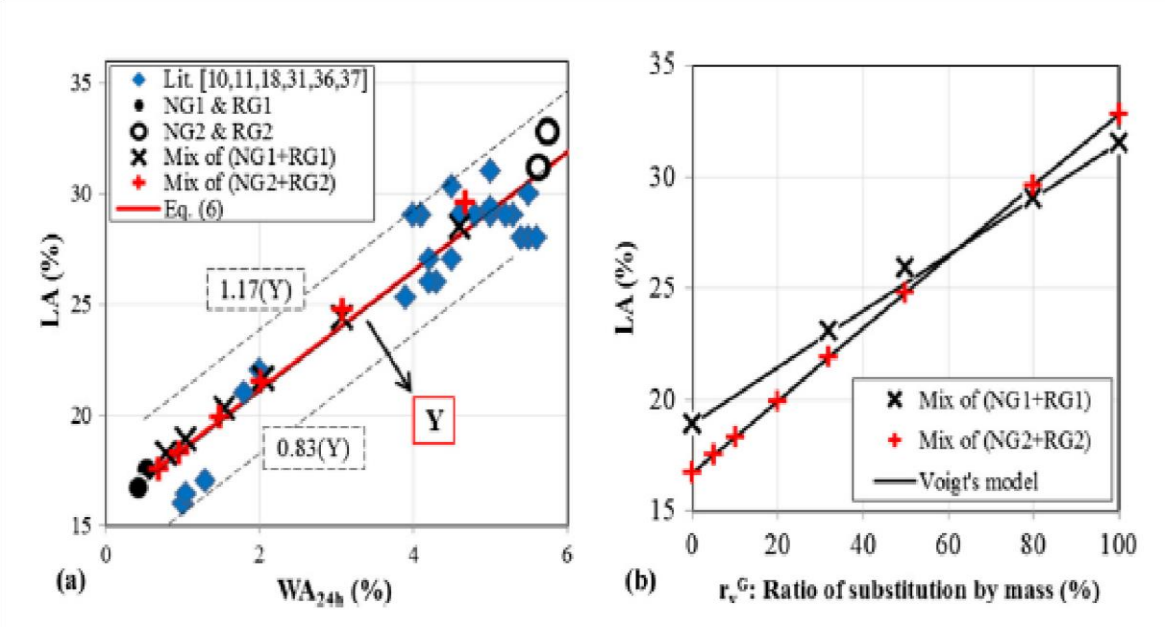


Figure II-7 a) Effet du coefficient d'absorption sur le paramètre Los Angeles(LA) des granulats recyclés, b) Effet du taux de substitution massique sur le paramètre Los Angeles(LA) des granulats [34] ;

II.5 Béton de granulats réutilisés

Les approches de formulation du béton de granulats naturels restent applicables pour la formulation du béton incorporant des granulats réutilisés. D'après l'étude de Wardeh et Al. [35], la formulation commence par l'optimisation du dosage en ciment pour atteindre la classe cible de la résistance à la compression, puis le rapport Eau/Ciment (E/C) et le dosage en super plastifiant sont optimisés afin d'atteindre la fluidité exigée par le cahier des charges. Les auteurs ont conclu que lorsqu'une quantité donnée des gravillons réutilisés est incorporée dans la formulation, les modifications suivantes sont nécessaires :

- Pour atteindre la classe de maniabilité fixée par le cahier des charges, une quantité d'eau supplémentaire doit être rajoutée à l'eau de gâchage ;
- Puisque la quantité d'eau de gâchage augmente, le dosage en ciment est ajusté pour maintenir constant le rapport E/C et maintenir par conséquent la même classe de résistance à la compression ;
- Ces conclusions sont en accord avec les conclusions de plusieurs chercheurs lors des études postérieures à celle de Wardeh et Al [1] [5].

II.5.1 Propriétés à l'état frais

Plusieurs chercheurs ont montré qu'à un dosage en eau identique, la maniabilité du béton incorporant des granulats réutilisés est inférieure à celle d'un béton correspondant formulé avec des granulats naturels et ceci plus particulièrement quand le pourcentage de substitution de granulats dépasse 50% [36]. Cette perte de consistance est due principalement à la plus grande porosité des granulats réutilisés par rapport aux granulats naturels.

L'évolution de la maniabilité après le malaxage a fait l'objet de plusieurs études dans la littérature. L'étude de Wardeh et Al [35] a montré que la perte de maniabilité n'est pas significative pendant 10 minutes après le malaxage et ceci est expliqué par l'excès d'eau disponible dans la gâchée. Par contre, la perte dépend du pourcentage de granulats réutilisés après cette période et elle est d'autant plus accentuée que le taux de substitution est important.

L'étude menée dans le cadre de la thèse de M-D Nguyen [4]a confirmé cette tendance comme l'illustre la Figure II-8

De plus, la quantité d'air occlus est supérieure dans le cas des bétons réutilisés alors que la masse volumique est inférieure [35] et ceci est dû à la présence de l'ancien mortier autour des grains naturels.

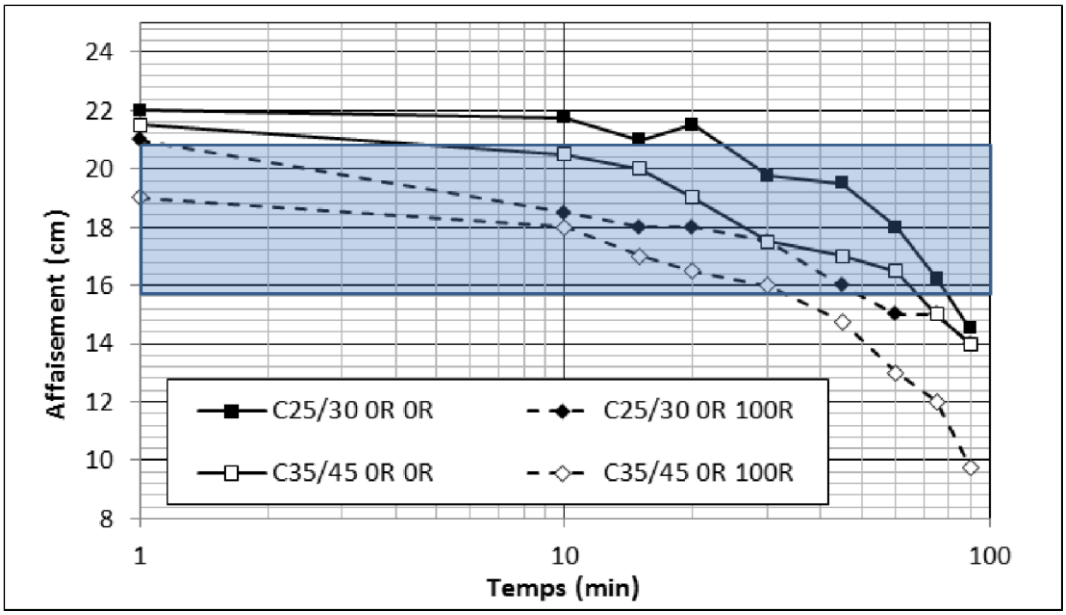


Figure II-8 :Evolution de la maniabilité au cours du temps [4]

II.5.2 Caractéristiques physiques à l'état durci

De nombreuses études reportées dans la littérature ont montré que la porosité du béton de granulats réutilisés est supérieure à celle du béton formulé avec des granulats naturels du fait de la présence de mortier attaché aux granulats [35].

D'après l'étude de Wardeh et Al [35] ainsi qu'Omary et Al [34], la porosité augmente en augmentant le taux de substitution en granulats réutilisés pour la même classe de la résistance à la compression. Cette augmentation est due d'une part à la porosité des granulats réutilisés et d'autre part à la porosité induite par l'augmentation du volume de la pâte cimentaire nécessaire pour maintenir la résistance.

L'augmentation de la porosité influe directement sur l'absorption d'eau. Thomas et Al [37] ont montré que l'absorption augmente lorsque le rapport E/C et le taux de substitution augmentent et que les gros gravillons impactent cette propriété plus que les fines contrairement à Levy et Helene [38]. Ces derniers ont reporté une absorption sensiblement plus élevée du béton incorporant des fines réutilisées par rapport au béton incorporant des gravillons réutilisés uniquement. La différence entre les résultats reportés dans la littérature peut être attribuée à l'influence de la nature des fines utilisées.

Les résultats reportés dans la thèse de M-D Nguyen montrent que la masse volumique à l'état durci est d'autant plus faible que le taux de substitution est élevé [4].

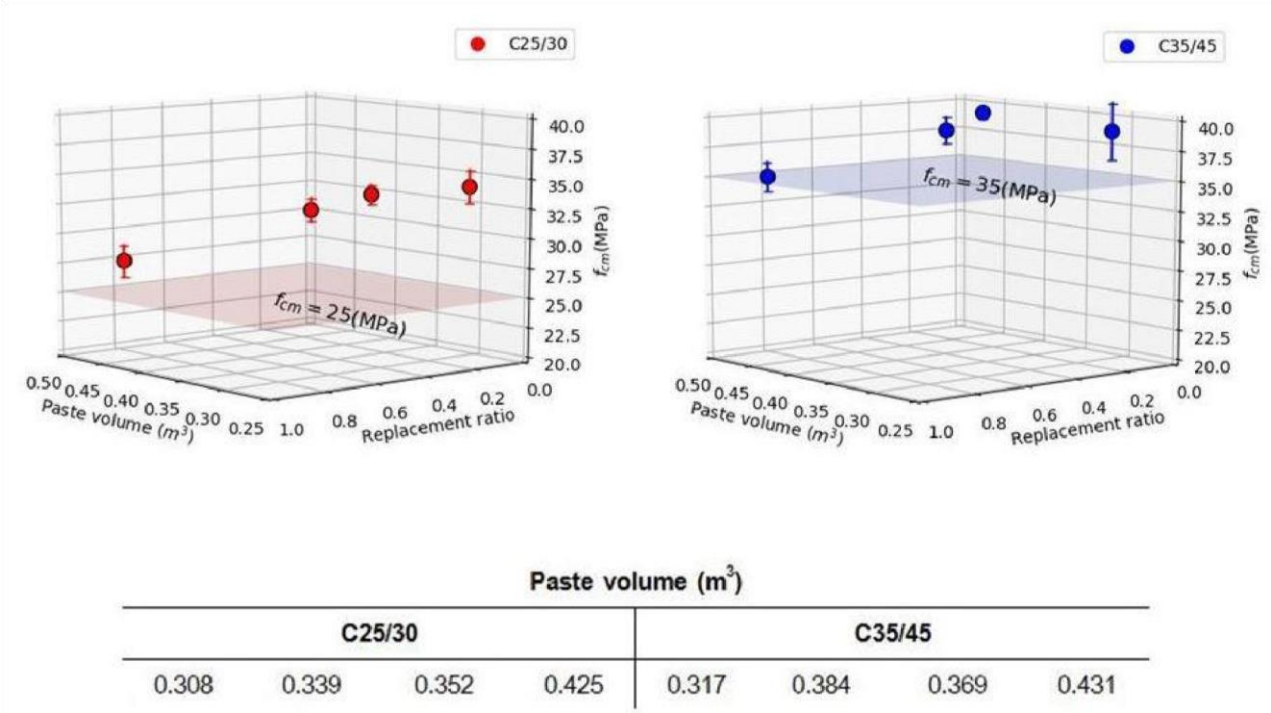
II.5.3 Propriétés mécaniques des bétons incorporant des granulats réutilisés

a) Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton de granulats réutilisés dépend de certains nombres de paramètres tels que : le rapport eau/ciment (E/C), la qualité des granulats réutilisés, le taux de substitution ou encore la teneur en mortier attaché [39]. La plupart des études disponibles dans la littérature montrent qu'avec des paramètres de formulation identiques, la substitution des granulats réutilisés jusqu'à 30 % ne modifie pas la résistance à la compression [39].

Dans le cadre des deux projets nationaux ANR ECOREB et PN RECYBETON [1] [5] six bétons de granulats réutilisés correspondant à deux classes de résistance C25/30 et C35/45 et à une classe de consistance S4 ont été élaborés. Les formulations ont été conçues à partir de deux formulations de référence en substituant partiellement ou complètement les granulats naturels par des matériaux issus du recyclage des bétons. Pour chaque classe, un béton de granulats naturels, dit de référence, est d'abord optimisé puis le sable et les gravillons réutilisés ont été substitués au sable et aux gravillons naturels à plusieurs pourcentages massiques. Il est à rappeler que les proportions des constituants ne sont pas constantes pour chaque série et elles sont ajustées afin de maintenir les caractéristiques exigées. De plus, le volume de pâte et le rapport Eau efficace/Ciment (E/C) ne sont pas constants et ils varient d'une formulation à l'autre [4] [5].

Les résultats obtenus ont montré qu'à l'âge de 28 jours, les bétons atteignent des niveaux de résistances compatibles avec les classes définies par le PN RECYBETON, respectivement C25/30 et C35/45 (Figure II.10) [4] [5]. Sur la figure II.10, les résultats sont tracés en fonction du volume de la pâte et Γ (le taux de substitution massique équivalent) représentant le rapport entre la masse des granulats réutilisés et la masse totale des granulats naturels et réutilisés dans la formulation. Γ=1 lorsque le sable et les graviers sont réutilisés [5].



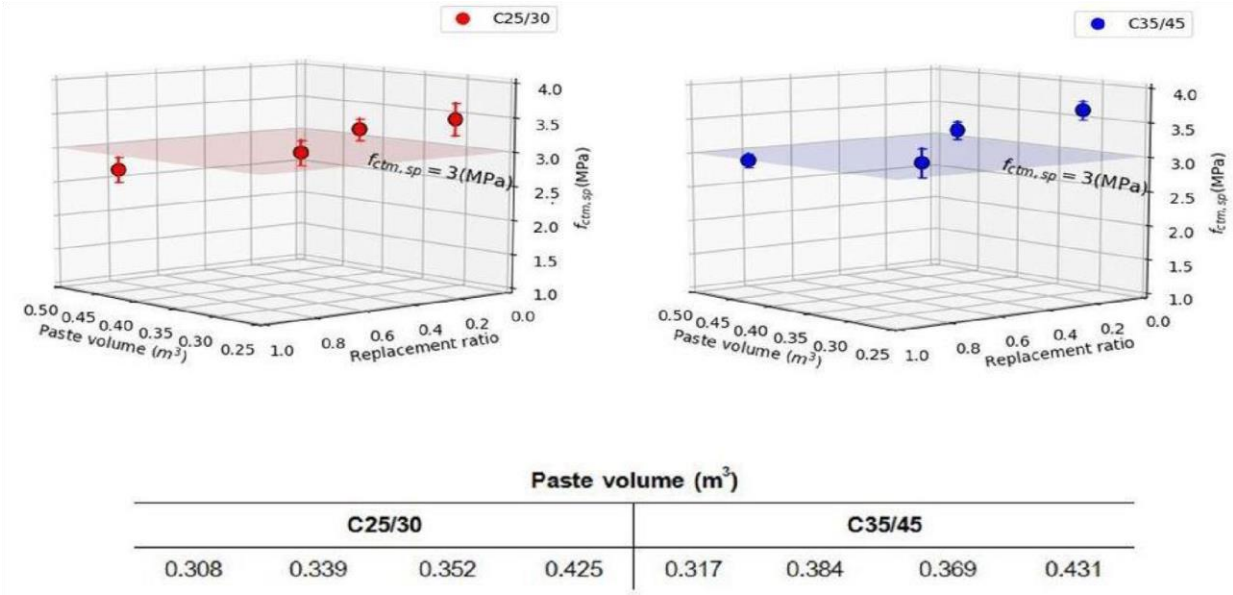
Paste volume (m^3)							
C25/30				C35/45			
0.308	0.339	0.352	0.425	0.317	0.384	0.369	0.431

Figure II-9 :Résistances à la compression des bétons C25/30 et C35/45

c) Résistance à la traction

Les résultats issus des essais de traction ont montré qu'en générale la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats réutilisés [5].

D'après l'étude de Wardeh et Al [35], cette diminution peut être attribuée à l'augmentation de la porosité. L'ensemble des résultats des projets ANR ECOREB et PN RECYBETON, montre que pour la même classe de résistance à la compression, l'introduction des granulats réutilisés entraîne une diminution de la résistance à la traction [1] [4]. Nous remarquons également que l'incorporation des granulats réutilisés n'a pas un effet remarquable sur la résistance de la série C35/45 lorsque le taux de remplacement est supérieur ou égal à 30% (Γ≥0,3).



Paste volume (m^3)							
C25/30				C35/45			
0.308	0.339	0.352	0.425	0.317	0.384	0.369	0.431

Figure II-10 :Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution

II.6 Impacts négatifs liés à l'extraction et à l'utilisation des granulats naturels sur l'environnement

L'exploitation des granulats naturels bouleverse les paysages et les écosystèmes, au détriment de la biodiversité. Les prélèvements dans les milieux naturels sont par ailleurs susceptibles de modifier le fonctionnement hydrologique des cours d'eau, la morphologie des côtes et les courants marins et de provoquer l'érosion des sols et du littoral.

La surexploitation des ressources participe fortement à l'érosion de la biodiversité : destruction d'habitats naturels, réduction des ressources naturels disponibles dont le dépendent de nombreuse espèces sauvages, pollutions, perturbation et mortalité de certaines espèces sauvages voir même protégés.



Figure II-11 :Impact de l'extraction des granulats dans les lits de rivière au Burundi ;

II.7 Comportement des structures en béton réutilisés

Des littératures nous ont montré comment les éléments structuraux se comportent quand ils sont fabriqués à base des granulats réutilisés.

Pour la même classe de résistance en compression de béton, la présence des granulats réutilisés diminue la capacité portante des poteaux par rapports aux poteaux fabriqués avec du béton à base des granulats naturels. Cette diminution de la résistance ultime est accompagnée d'une augmentation de la flèche à la cour du chargement. L'usage des granulats réutilisés affecte le réseau de fissures et leurs tailles augmentent avec le taux de substitution, selon les propriétés des granulats réutilisés mises en place.

II.8 Conclusion

En résume, ce deuxième chapitre consistait à traiter les principales propriétés des granulats issus du recyclage. Les littératures existantes prouvent que la présence d'un ancien mortier de ciment qui s'y attache est à l'origine de la fluctuation entre les propriétés des granulats naturels et ceux réutilisés.

Les granulats réutilisés ont une capacité d'absorption plus élevée et la densité plus faible ce qui causent la diminution de la résistance mécanique une fois présents dans le béton en proportion élevée.

CHAPITRE III: METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPERMENTALE

III.1 Introduction

Le présent chapitre a pour but principal de caractériser les matériaux en vue de pouvoir les qualifier comme admissibles avant leur utilisation.

Chaque catégorie de granulats réutilisés et naturels possède les caractéristiques intrinsèques dont le chapitre ci-présent s'occupe.

III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Au cours de cette étude, il a été choisi de fabriquer les différents bétons à partir d'un squelette granulaire issu d'un mélange de gravier et du sable sans oublier d'autres matériaux comme ciment et eau.

Pour pouvoir étudier l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassés sur le comportement des différents bétons, des bétons ordinaires contenant les granulats naturels (provenant de la rivière Mugere et de site de concassage de Gakungwe), et des autres contenant des granulats réutilisés, roulés et concassés, ont été également étudiés.

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est le ciment de référence CEMI 42,5R qui a une surface spécifique Blaine de 3585cm^2/g et une densité de 3,1. Il contient au moins 95% de clinker et 5% de constituants secondaires.

III.2.2 L'eau

L'eau de gâchage utilisée est celle de la REGIDESO dont la masse volumique est environ à 1000kg/m3.

III.2.3 Le sable

La classe granulaire du sable utilisé est 0/4. Le choix du sable utilisé pour la confection des bétons est guidé par l'objectif de cette étude visant à estimer l'influence de la nature des granulats sur le comportement des bétons. Compte tenu de cet objectif, un seul type de sable naturel de classe granulométrique (0/4) a été choisi mais provenant de la rivière (Mugere). Il s'agit d'un sable alluvionnaire. Les principales propriétés physiques de ce sable sont les suivantes :

III.2.3.1 Teneur en eau

Elle se détermine par la norme NF P 18-554 [16].

M_1 : Masse humide

M_2 : Masse sèche ;

W : teneur en eau ;

La teneur en eau d'un granulat est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M2} \times 100 \qquad \textbf{III-1}$$

Tableau III-1 : Teneur en eau du sable

M_1 (kg)	M_2 (kg)	W (%)	Moyenne
2,49	2,42	2,8%	
2,42	2,356	2,7%	2,8%
2,44	2,37	2.9%	

III.2.3.2 Masse volumique absolue

Elle est déterminée selon la norme NF P18-555 pour les sables [17]

Principe de l'essai : Il consiste à verser une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue.

Pour cet essai, nous avons utilisé la méthode d'éprouvette graduée, alors on a besoin de :

- ✓ Un éprouvette gradué ;
- ✓ Une balance ;
- ✓ Eau.



Figure III-1 : Mesure de la masse volumique absolue du sable

Mode opératoire

- On verse dans une éprouvette graduée un volume d'eau V1
- On pèse un échantillon sec de granulat M
- On introduire l'échantillon dans l'éprouvette
- On relève le nouveau volume V_2
- On calcule avec la formule suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1} \qquad \textbf{III-2}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau III-2 : Masse volumique absolue du sable

Essai	M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ_{ab} (kg/m3)	Moyenne (kg/m3)
Essai 1	400	300	455	2581	2613.33
Essai 2	350	300	435	2593	
Essai 3	300	300	412.5	2666	

III.2.3.3 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une propriété physique intrinsèque couramment mesurée pour les pierres naturelles selon la norme NF EN 1936 [8]. Ce paramètre s'exprime en kg /m^3 et renseigne sur le degré de compacité des matériaux et permet donc d'évaluer la masse d'un volume donné.

Mode opératoire :

- On verse un échantillon dans une éprouvette dont le volume et la masse sont connus.
- On pèse cette éprouvette contenant l'échantillon.

Alors la masse volumique est donnée par le rapport de la masse de l'échantillon et le volume de l'éprouvette.

$$\rho_{app} = \frac{m}{V} \qquad \textbf{III-3}$$

Avec m : la masse de l'échantillon

V : le volume de l'éprouvette

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau III-3 :Masse volumique apparente du sable

Essai	M (g)	V (cm^3)	ρ_{app} (kg/m3)	moyenne (kg/m3)
Essai 1	2150	1570	1369,4	1369,4
Essai 2	2151	1570	1370,06	
Essai 3	2149	1570	1368,79	



Figure III-2 :Mesure de la masse volumique apparente du sable

III.2.3.4 Module de finesse

Le module de finesse Mf : est une caractéristique géométrique importante surtout en ce qui concerne les sables. Le module de finesse des sables est déterminé selon la norme XP P 18-540 [40], et calculé selon la formule suivante :

$$\mathrm{MF} = \frac{1}{100}\sum \text{Refus cumulé en \% des tamis} \qquad \textbf{III-4}$$

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse Mf compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité. [4]

- Pour 2,2 < Mf < 2,8 le sable convient pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limitées ;

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

L'ancienne norme P 18 – 541 indiquait que le module de finesse des sables devrait être compris entre 1,8 et 3,2.

Un bon sable donnant les meilleurs résultats dans le béton, est celui dont le module de finesse se situe aux environs de la valeur Mf = 2,5 [10]

Dans le présent travail, le sable utilisé a un module de finesse qui est égale à :

$$Mf = \frac{7.117+24.911+65.48+93.594+98.5765}{100} = 2,897$$

Le tableau récapitulatif des caractéristiques du sable utilisé lors de l'étude expérimentale nous présente une synthèse :

Tableau III-4 :Paramètres physiques du sable utilisé

Paramètres physique	valeur	Unité
Masse volumique apparente	1,37	g/cm3
Masse volumique absolue	2,613	g/cm3
Module de finesse	2,897	
Teneur en eau	2,8	%

III.2.4 Le gravier

Lors de la présente étude de l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés, les graviers de nature différente ont été utilisés dont ceux provenant des sites de concassage, comme celui de gakungwe en commune de kabezi, ceux provenant de la rivière mugere et les graviers réutilisés roulés et concassés ont été aussi utilisés.



Figure III-3 : les graviers utilisés dans le présent travail ;

Les principales caractéristiques sont les suivantes :

III.2.4.1 Teneur en eau

La teneur en eau est déterminée selon la norme NF P 18 - 553 [7]

Pour déterminer la teneur en eau d'un granulat, on pèse la masse humide d'un échantillon et on la chauffe à une température de 105^{O}C dans l'étuve à sécher. Après 24 h, on pèse l'échantillon de la masse séchée. La teneur est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100 \qquad \textbf{III-5}$$

Avec : M_1: Masse humide

M_2 : Masse sèche.

Tableau III-5 :Calcul de la teneur en eau

M_1 (g)	M_2 (g)	W (%)	Moyenne (%)
200	199	0,5	
205	204	0,49	0,5
210	209	0,48	

III.2.4.2 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des pores ouverts. Sa détermination est nécessaire pour le dosage pondéral. Sa masse volumique varie en moyenne de 2450 à 2650 kg/m^3 pour la plupart des granulats naturels .Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers [8] et NF P 18 -555 pour les sables [17].

Principe de l'essai : Il s'agit de verser une quantité (masse) connue de granulat dans une quantité (volume) d'eau. L'eau qui s'est déplacée correspond au volume des granulats immergés.

On a besoin de matériels suivant pour cet essai :

- ✓ Une éprouvette graduée
- ✓ Une balance
- ✓ Eau



Figure III-4 : Mesure de la masse volumique absolue du gravier

Mode opératoire :

- On verse dans une éprouvette graduée un volume d'eau V1
- On pèse un échantillon sec de granulat
- On introduit l'échantillon dans l'éprouvette
- On relève le nouveau volume V_2
- On calcule avec la formule suivante

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1} \qquad \textbf{III-6}$$

Tableau III-6 :Masse volumique absolue du gravier

M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ_{ab} (kg/m3)	ρ_{ab} Moyenne (kg/m3)
400	300	441,5	2830	2830
370	300	433	2820	
420	300	448	2840	

III.2.4.3 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une propriété physique intrinsèque couramment mesurée pour les pierres naturelles selon la norme NF EN 1936 [8].Ce paramètre s'exprime en kg /m^3 et renseigne sur le degré de compacité des matériaux et permet donc d'évaluer la masse d'un volume donné.

Mode opératoire :

- On verse un échantillon dans une éprouvette dont le volume et la masse sont connus.
- On pèse cette éprouvette contenant l'échantillon.

Alors la masse volumique est donnée par le rapport de la masse de l'échantillon et le volume de l'éprouvette.

$$\boldsymbol{\rho_{app} = \frac{m}{V}} \qquad \textbf{III-7}$$

Avec m : la masse de l'échantillon

V : le volume de l'éprouvette

Tableau III-7 :Masse volumique apparente du gravier

M (g)	V (cm^3)	ρ_{app} (kg/m3)	Moyenne (kg/m3)
2340	1570	1490,4	
2341	1570	1491.1	1490,6
2340	1570	1490,4	

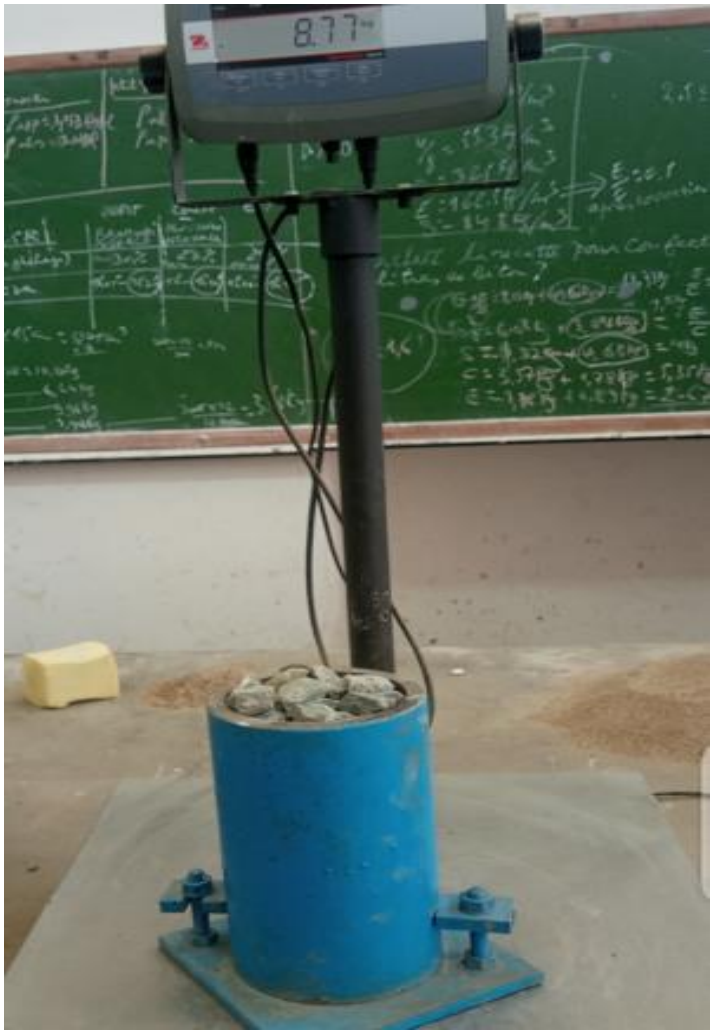


Figure III-5 :Masse volumique apparente du gravier

III.2.4.4 Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse d'après l'immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22°c à la masse sèche de l'échantillon [9].NF P 18-554

$$\textbf{Abs} = \frac{\textbf{mh} - \textbf{m s}}{\boldsymbol{ms}} \qquad \textbf{III-8}$$

Tableau III-8 : Absorption du gravier

ms (g)	mh (g)	Abs (%)	Moyenne (%)
2000	2024	1.2	
2010	2034	1,19	1,2
2020	2044	1,2	

Le tableau récapitulatif des caractéristiques du gravier de la rivière Mugere utilisé lors de l'étude expérimentale est ci-dessous :

Tableau III-9 : Paramètres physiques du gravier roulé utilisé

Paramètres physique	valeur	Unité
Masse volumique apparente	1,49	g/cm3
Masse volumique absolue	2,83	g/cm3
Absorption	1,2	%
Teneur en eau	0,5	%

Le tableau récapitulatif des caractéristiques du gravier de site de concassage de Gakungwe utilisé lors de l'étude expérimentale est ci-dessous :

Tableau III-10 Paramètres physiques du gravier concassé utilisé

Paramètres physique	valeur	Unité
Masse volumique apparente	1,624	g/cm3
Masse volumique absolue	3,14	g/cm3
Teneur en eau	0	%
Absorption	1.4	%

Le tableau récapitulatif des caractéristiques du gravier réutilisé concassé mis en place lors de l'étude expérimentale est ci-dessous :

Tableau III-11 : Paramètres physiques du gravier concassé réutilisé mis en place.

Paramètres physique	valeur	Unité
Masse volumique apparente	1,5	g/cm3
Masse volumique absolue	3,01	g/cm3
Teneur en eau	2,0	%
Absorption	8,2	%

Le tableau récapitulatif des caractéristiques du gravier réutilisé roulé mis en place lors de l'étude expérimentale est ci-dessous :

Tableau III-12 : Paramètres physiques du gravier roulé réutilisé mis en place.

Paramètres physique	valeur	Unité
Masse volumique apparente	1,3	g/cm3
Masse volumique absolue	2,76	g/cm3
Teneur en eau	2,1	%
Absorption	7.2	%

III.3 L'Analyse granulométrique des granulats utilisés dans le présent travail

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF EN 993-1 [21]

But de l'analyse granulométrique :

- Déterminer la grosseur et le pourcentage en poids de différentes formes de granulats constituants les échantillons.
- Tracer la courbe granulométrique

Principe de l'essai :

Cet essai consiste à classer les différents grains en utilisant une série des tamis, emboités les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes de haut vers le bas. Le classement s'obtient par secousse des tamis manuellement. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisés sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous forme graphique (courbe granulométrique).

Le gravier passe à travers une série de tamis décroissante des mailles en (mm) : 2 ; 4 ; 8 ; 16 ; 31,5 et 63. Les tamis utilisés lors de l'essai sont les suivants :



Figure III-6 :Série des tamis utilisée pour faire l'analyse granulométrique selon la norme NF EN 993-1

- **Résultats de l'analyse granulométrique des granulats**

Tableau III-13 : Granulométrique du sable de la rivière Mugere

Sable Mugere:2810g			
Tamis	RC (g)	RC (%)	P (%)
4mm	0	0	100
2mm	200	7.117	92.882
1mm	700	24.911	75.089
0,5mm	1840	65.481	34.519
0,25mm	2630	93.594	6.406
0,125mm	2770	98.577	1.424
0,063mm	2790	99.288	0.712
	2810		

Tableau III-14 : Granulométrique du gravier de la rivière mugere

Gravier Mugere:5000g			
Tamis	RC (g)	RC (%)	P (%)
31,5mm	3200	64	36
16mm	4640	92.8	7.2
8mm	4940	98.8	1.2
4mm	4990	99.8	0.2
2mm	5000	100	0

Tableau III-15 : Granulométrique du gravier du site de Gakungwe

Gravier GAKUNGWE 5000 g			
Tamis	RC (g)	RC (%)	P (%)
31,5mm	0	0	100
16mm	1500	30	70
8mm	3890	77.8	22.2
4mm	4950	99	1
2mm	5000	100	0

Tableau III-16 :Granulométrique du gravier réutilisé concassé

Gravier recyclé concassée			
Tamis	RC (g)	RC (%)	P (%)
31,5mm	0	0	100
16mm	2690	97.4637681	2.53623188
8mm	2760	100	0

Tableau III-17 :Granulométrique du gravier réutilisé roulé

Tamis(mm)	refus en g	refus cumul en g	refus cumul en %	passant
31.5	0	0	0	100
16	5602	5602	93.367	6.633
8	348	5950	99.167	0.833
4	50	6000	100	0

L'analyse granulométrique a montré que notre granulat est favorable à être utilisé dans la formulation des bétons car on trouve que tous les diamètres de granulat relatifs aux refus des tamis juxtaposés en décroissance apparaissent dans la granulométrie. Lorsqu'une classe granulaire fait partiellement ou totalement défaut dans un mélange, on parle de granularité discontinue. A l'endroit de la classe manquante, la granularité (courbe granulométrique) est caractérisée par un palier horizontal. En général, on cherche à avoir une courbe continue, ce qui est favorable à une bonne ouvrabilité des bétons. Les courbes granulométriques ci-après montrent que les granulats locaux remplissent toutes les conditions normales pour la confection des bétons (courbes continues)

Lors de la représentation des courbes de l'analyse granulométrique, les modules qui correspondent au diamètre des tamis en mm sont utilisés.

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,30	8,00	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	31,5	40,0	50,0	63,0	80,0	mm

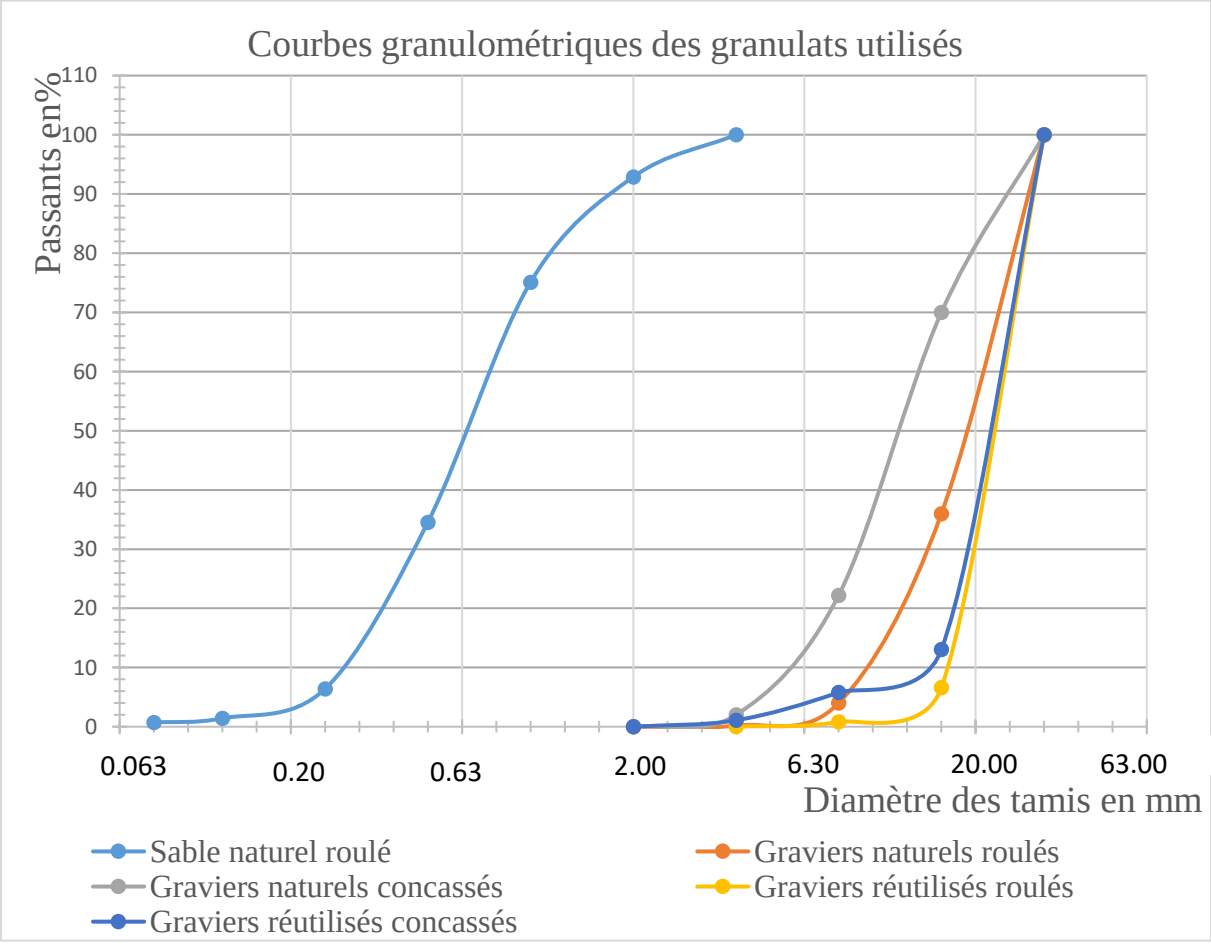


Figure III-7 :Courbes granulométriques des granulats utilisés

III.4 Formulation des bétons de l'étude

L'étude de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment ; granulats (agrégats fins : sable et gros agrégats : gravier ou pierres concassées) et en eau pour un dosage d'1m^3 de béton frais, afin d'obtenir un mélange et d'une compacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue (exigée).

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

L'étude de la composition des bétons consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose selon les propriétés du béton recherché pour la construction de l'ouvrage.

Les méthodes proposées, sont nombreuses mais tout aboutissant à des dosages volumétriques ou pondérale, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire mais le choix de la méthode dépend du goût du calculateur.

Dans le présent travail, la formulation de la composition des bétons a été faite d'après la méthode « DREUX – GORISSE » basée sur l'analyse granulométrique (sable et gravier). Cette méthode a pour but de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié. Elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés. Toutes les courbes granulométriques sur un graphique du type normalisé AFNOR, qui comporte en abscisse une graduation logarithmique où les modules sont présentés, ce qui est l'avantage d'une graduation équidistante en modules successifs.

- **Résultats de la formulation des bétons**

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui au Burundi en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte sans oublier qu'il y a ceux qui construisent ces ouvrages sans faire l'étude de la composition du béton, il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données d'entrée du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage.

a) **Béton ordinaire confectionné avec des granulats roulés de la rivière de mugere (BO-GR)**

Tableau III-18 : Données de base pour la formulation du béton

	Formule ou symbole	valeur	unité
Résistance caractéristique souhaitée à 28jours	Fck	25	MPa
Résistance moyenne sur les cubes	R'_{28}=1,2*fck	30	MPa
Classe de résistance commerciale du ciment utilisé	CMI 42,5R	42,5	MPa
Classe de résistance réelle du ciment	σ'_c=1,2* σ_c	51	MPa
Diamètre maximale du granulat	Dmax	31,5	mm
Coefficient granulaire (bonne, courante avec Dmax=31,5mm)	G	0,5	-
Rapport C/E	$\frac{C}{E} = \frac{R'28}{\sigma' c * G} + 0,5$	1,68	-
Contrôle du rapport E/C selon la norme NF-EN-206/CN	E/C < 0,65	0,595	-
Affaissement(le béton plastique, vibration normale	6 < A < 9	7	cm

❖ Calcul de la quantité du ciment et de la quantité de l'eau

Dosage en ciment

Ayant l'affaissement souhaité et le rapport C/E trouvée à base de la formule inspirée des études de Bolomey : $f_c = GF_{CE}(\frac{C}{E} - 0,5)$ III-9

Avec : G :Coefficient granulaire

F_{CE} :Classe de résistance du ciment à 28jours

C /E :rapport Ciment sur eau

L'abaque montre que le dosage en ciment est estimé à 340kg/m3

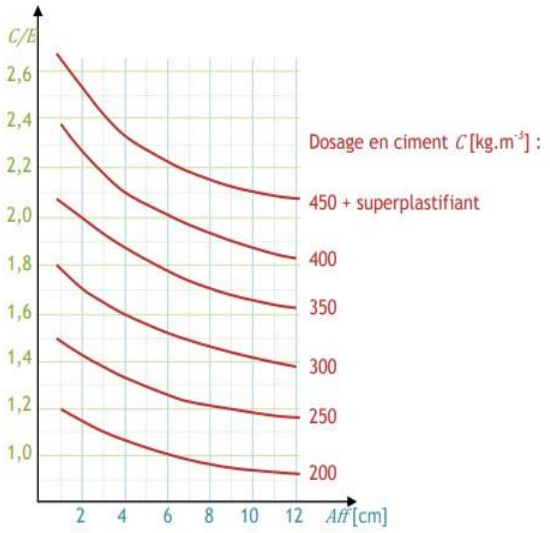


Figure III-8 :Abaque d'estimation du dosage en ciment

Dosage en eau

Le dosage en ciment C étant connu, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement)

$$\mathbf{E}=\frac{C}{C/E}=\frac{202{,}38kg}{m3}\ ou\ (l/m3) \qquad \textbf{III-10}$$

Correction du dosage en eau totale en fonction de D

La correction sur le dosage en eau correspondant à D ≠ 20 mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau III.19 en fonction de D.

Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si D ≠ 20 mm).

Tableau III-19 : correction sur le dosage en eau

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

Donc pour notre cas : E=202,38l/ m^3-(202,38l/ m^3*4%)=194,31l/m^3 ;

En fonction de la teneur en eau, la quantité est égale à 194,31l-((752,97l*0.028) +(1223,108l*0.005)) =167,53l (voir Tableau III-21) ;

La quantité en eau devient 167,53l/ m^3.

❖ **Recherche de la quantité des granulats**

Courbe granulaire de référence : sur la courbe d'analyse granulométrique respectant la norme NF-EN-1993-1, on trace une composition granulaire de référence OAB.

Le point O est placé à l'origine du graphique, le point B correspond à la dimension Dmax des plus gros granulats à l'ordonnée 100%.

Le point de brisure A, est déterminé par :

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

Si D ≤ 20 mm, l'abscisse est D/2.

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

- En ordonnée :

$$\mathbf{Y = 50 - \sqrt{D} + K} \qquad \textbf{III-11}$$

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

Les valeurs de K sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau III-20 : les valeurs de K en fonction du dosage en ciment, forme de granulats et l'efficacité du serrage

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

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

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

- k en fonction du dosage en ciment, de la forme des granulats et de l'efficacité du serrage est de 0,4 ;

- ks= 6Mf-15=6*2,897-15=2,38 ; **III-12**

- kp=0 ;

Donc K=0+0,4+2,38=2,78, alors les coordonnées du point de brisure sont :

X_A=42 ;

Y_A=50-$\sqrt{31,5}$ +2,78=47,18.

Le segment relie les points à 95% de tamisât cumulé d'un granulat avec les points à 5% de tamisât cumulé de la courbe granulométrique du granulat directement supérieur en dimension (le gravier).

Cette partie de la formulation du béton propose les proportions des granulats. L'intersection de la droite MN avec la courbe de composition granulaire de référence OAB, donne la proportion de sable et celui du gravier (sable=40% et gravier=60%) pour la rivière mugere.

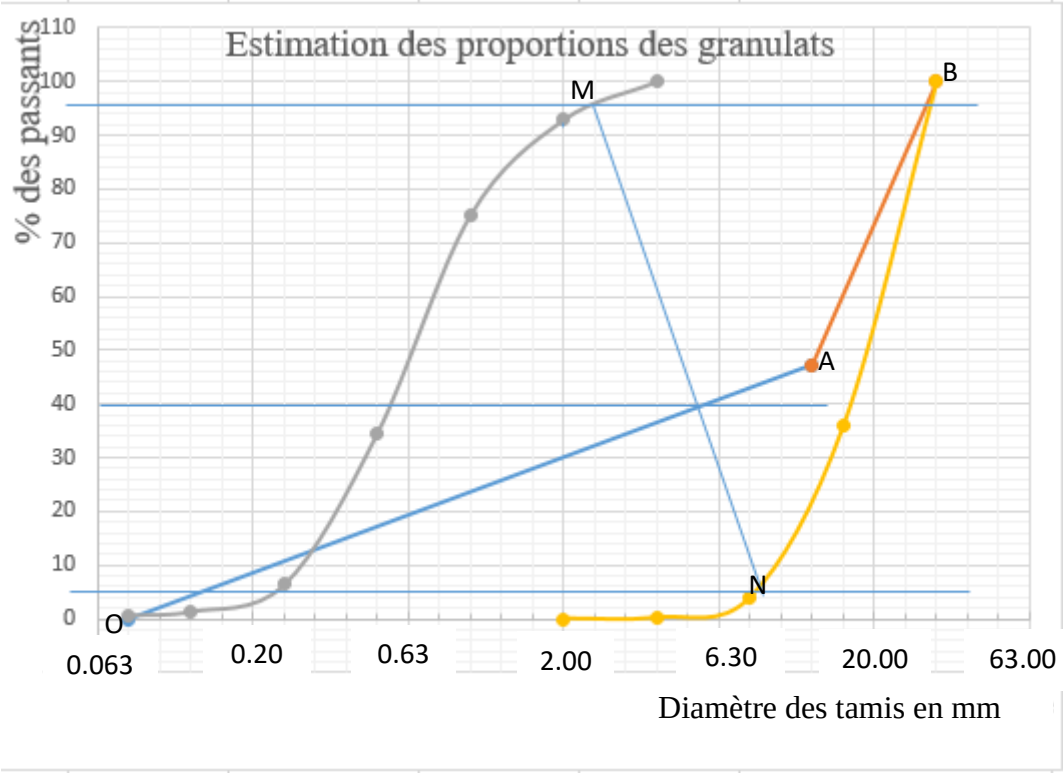


Figure III-9 :Estimation des proportions de granulats

Le coefficient de compacité ϒ permet de déduire la quantité des autres composants de la formulation de béton. Dans cette étude, on cherche une consistance plastique, la vibration normale et le Dmax de 31,5mm d'où ϒ =0,83.

La compacité ϒ =Vm/1000 ; **III-13**

Vm= ϒ*1000 avec Vm : volume des matières solides ;

Vm=0,83*1000litres=830litres ;

V absolue du ciment=dosage/masse absolue=340kg/3,1=109,677litres.

La formulation donne alors :

Volume totale absolue	830litres
Volume absolue du ciment	109,67 litres
Volume absolue des granulats	720,323 litres

Tableau III-21 : Formulation du béton de l'étude

désignation	Volume (l)	Masse volumique (kg/m3)	Dosage pondéral par m3 (kg/m3)	Dosage pondéral(kg/6 éprouvettes)
Ciment	109,67	3100	340	2.04
Eau	167,53	1000	167,53	1.005
Sable (40% du VsG)	288,1292	2613	752,977	4.518
Gravier (60% du VsG)	432,1938	2830	1223,108	7.339
Total				

b**) Béton ordinaire confectionné avec des granulats concassés (BO-GC)**

Tableau III-22 : Données de base pour la formulation du béton

	Formule ou symbole	valeur	unité
Résistance caractéristique souhaitée à 28jours	Fck	25	MPa
Résistance moyenne sur les cubes	R'_{28}=1,2*fck	30	MPa
Classe de résistance commerciale du ciment utilisé	CMI 42,5R	42,5	MPa
Classe de résistance réelle du ciment	σ'_c=1,2* σ_c	51	MPa
Diamètre maximale du granulat	Dmax	31,5	mm
Coefficient granulaire (bonne, courante avec Dmax=31,5mm)	G	0,5	-
Rapport C/E	$\frac{C}{E} = \frac{R'28}{\sigma' c * G} + 0,5$	1,68	-
Contrôle du rapport E/C selon la norme NF-EN-206/CN	E/C < 0,65	0,595	-
Affaissement(le béton plastique, vibration normale	6 < A < 9	7	cm

Après avoir passé sur les mêmes étapes de la formulation bu béton confectionné avec des granulats roulés, Le segment relie les points à 95% de tamisât cumulé d'un granulat avec les points à 5% de tamisât cumulé de la courbe granulométrique du granulat directement supérieur en dimension (le gravier).

Cette partie de la formulation du béton propose les proportions des granulats. L'intersection de la droite MN avec la courbe de composition granulaire de référence OAB, donne la proportion de sable et celui du gravier (sable=39% et gravier=61%) pour les granulats concassés du site de Gakungwe.

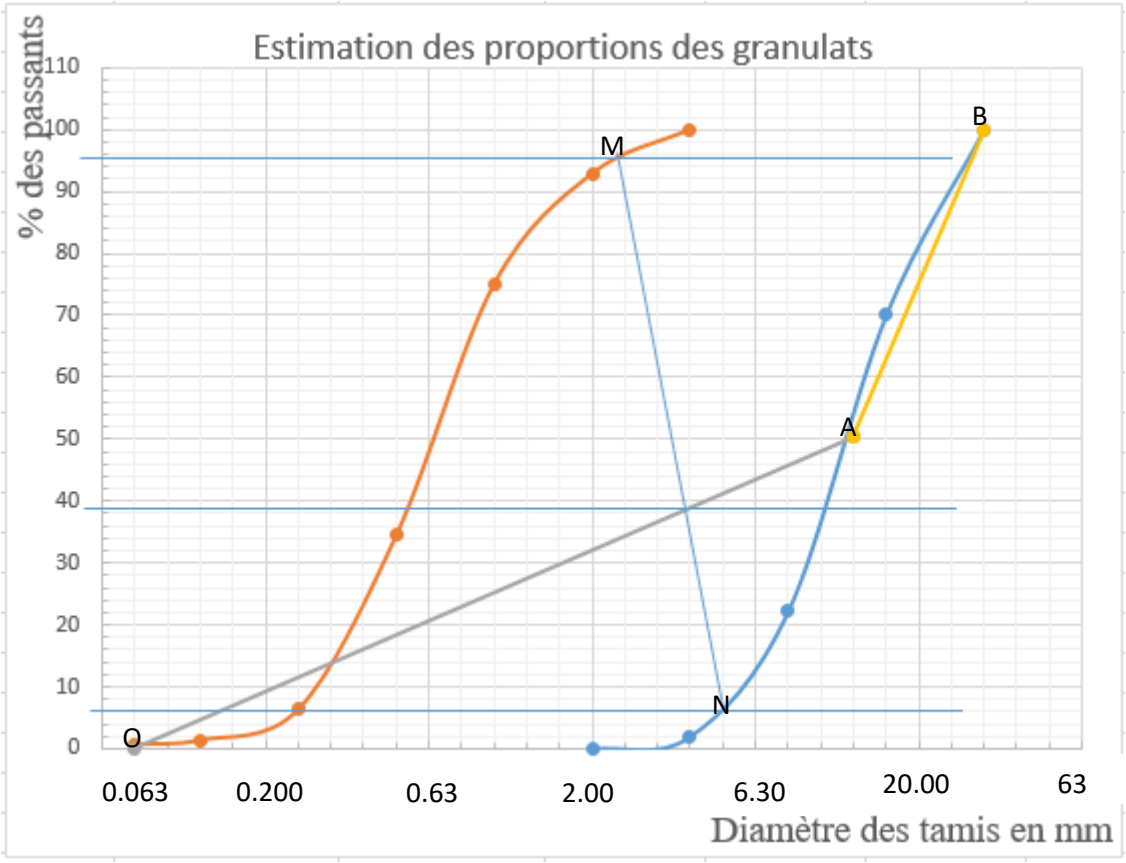


Figure III-10 :Estimation des proportions de granulats

La formulation donne alors :

Volume totale absolue	830litres
Volume absolue du ciment	109,67 litres
Volume absolue des granulats	720,323 litres

Tableau III-23 : Formulation du béton de l'étude

désignation	Volume (l)	Masse volumique (kg/m3)	Dosage pondéral par m3 (kg/m3)	Dosage pondéral (kg/6 éprouvettes)
Ciment	109,67	3100	340	2.04
Eau	173,74	1000	173,744	1.042
Sable (39% du VsG)	280,926	2613,33	734,152	4.405
Gravier (61% du VsG)	439,397	3741,1	1643,83	9.863

C) **Un béton ordinaire confectionné avec des granulats naturels roulés avec substitution des granulats réutilisés roulés de 15%, 30%,50% et 75% (BO-GRR)**

Volume abs (litres)		volume (l)/m3	**masse abs (kg/m3)**
Graviers(60%)	Sable(40%)	Eau	Sable
432.1938	288.129	167.53	752.977

Tableau III-24 : substitution volumique des graviers réutilisés roulés

Substitution volumique des graviers		
Dosage de graviers réutilisés	V abs des graviers nat (en litre)	V abs grav réutilisés (en litre)
0%	432.194	0
15%	367.365	64.829
30%	302.536	129.658
50%	216.097	216.097
75%	108.048	324.145

Tableau III-25 : substitution massique des graviers réutilisés roulés

Masse abs (kg)		
Dosage de graviers réutilisés	Masse des graviers naturels	Masse des graviers réutilisés
0%	1223.108	0
15%	1039.642	184.76 3
30%	856.176	369.526
50%	611.554	615.876
75%	305.777	923.814

Tableau III-26 : Masse des granulats nécessaires pour la formulation du béton(BO-GRR)

Dosage en granulats réutilisés (%)	**V.du béton**	**Graviers (kg)**		**Sable (kg)**	**Eau (litre)**
		Graviers naturels	Graviers réutilisés		
0%	0.006	7.339	0	4.518	1.0052
15%	0.006	6.238	1.109	4.518	1.0052
30%	0.006	5.137	2.217	4.518	1.0052
50%	0.006	3.669	3.695	4.518	1.0052
75%	0.006	1.835	5.543	4.518	1.0052
Totale	0.03	24.218	12.564	22.589	5.0259

C) **Un béton ordinaire confectionné avec des granulats naturels concassés avec substitution des granulats réutilisés concassés de 15%, 30%,50% et 75% (BO-GRC)**

La formulation donne alors :

Volume abs (litres)		volume (l)/m3	**masse abs (kg/m3)**
Graviers (61%)	Sable (39%)	Eau	Sable
439.39703	280.92597	173.744	734.1522652

Tableau III-27 :substitution volumique des graviers réutilisés concassées

Substitution volumique des graviers		
Dosage de graviers réutilisés	V abs des graviers naturels (en litre)	V abs grav réutilisés (en litre)
0	439.39703	0
15	373.4874755	65.9095545
30	307.577921	131.819109
50	219.698515	219.698515
75	109.8492575	329.5477725

Tableau III-28 : substitution massique des graviers réutilisés concassés

Masse abs (kg)		
Dosage de graviers réutilisés	Masse grav naturel	Masse grav réutilisés
0	1379.706674	0
15	1172.750673	198.387759
30	965.7946719	396.7755181
50	689.8533371	661.2925302
75	344.9266686	991.9387952

Tableau III-29 : Masse des granulats nécessaires pour la formulation du béton(BO-GRC)

Dosage en granulats réutilisés (%)	**V. du béton**	**Graviers (kg)**		**Sable (kg)**	**Eau (litre)**
		Graviers naturels	Graviers réutilisés		
0	0.006	8.278	0	4.405	1.042
15	0.006	7.036	1.190	4.405	1.042
30	0.006	5.795	2.381	4.405	1.042
50	0.006	4.139	3.968	4.405	1.042
75	0.006	2.069	5.952	4.405	1.042
Total	0.03	27.318	13.490	22.025	5.212

III.5 Confection des échantillons de béton.

La présente étude s'est limitée sur l'étude des propriétés mécaniques des bétons ordinaires fabriqués à l'aide des granulats naturels (roulés et concassés) et granulats réutilisés tel que :

- Un béton ordinaire confectionné avec des granulats de la rivière Mugere séparant la commune de Muha en mairie de Bujumbura et la commune de Kabezi de la province de Bujumbura (BO-GR) ;
- Un béton ordinaire confectionné avec des granulats concassés des carrières de Gakungwe en commune de kabezi (BO-GC) ;
- Un béton ordinaire confectionné avec des granulats naturels roulés avec substitution des granulats réutilisés roulés de 15%, 30%,50% et 75% (BO-GRR) ;
- Un béton ordinaire confectionné avec des granulats naturels concassés avec substitution des granulats réutilisés concassés de 15%, 30%,50% et 75% (BO-GRR) ;

Pour chaque composition du béton, six éprouvettes de 10*10*10cm^3 issus d'une même gâchée ont été confectionnées.

Les constituants du béton étaient introduits dans la gâchée par ordre décroissant de granulométrie, et ont été mélangés à sec jusqu'à l'homogénéisation. L'eau a été introduite

par après et le malaxage a été poursuivi durant environ 6minutes, et après, ils sont coulés dans des moules cubiques.

Les bétons sont mis en place par vibration à l'aide de la table vibrante.

La méthodologie utilisée lors de la confection des éprouvettes est résumée sur la figure suivante :

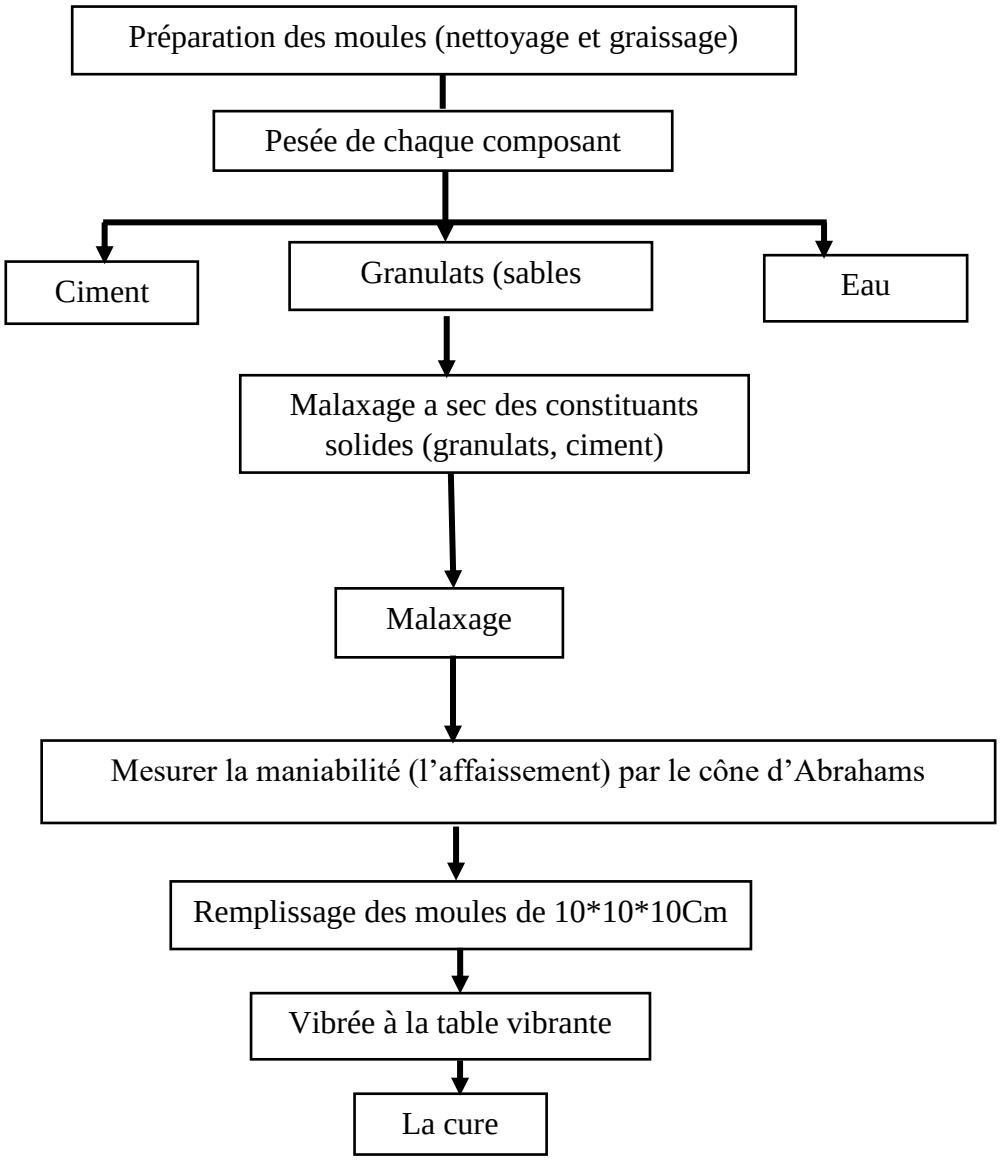


Figure III-11 :Organigramme de la fabrication des éprouvettes

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette étude ont suivi la même cure.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant 24h heures dans leur moule à température ambiante 20ºC. A l'issue de ce temps de conservation initiale, elles ont été démoulées, puis plongées dans l'eau à 20ºC pendant 28jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du béton et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation. Il permet

également de maintenir les bétons saturés et de se rapprocher ainsi des conditions réelles qu'on peut rencontrer dans certains ouvrages souterrains (le cas de fondation)



Figure III-12 :Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau

A l'issue du temps de cure dans l'eau, les éprouvettes ont été stockées à l'air ambiante pendant une journée afin de diminuer les gradients hydriques et thermiques dans les éprouvettes pour diminuer en conséquence d'endommagement des éprouvettes lors du traitement thermique.

III.6 Essais macrostructuraux

Après avoir séché, les éprouvettes à l'air libre pendant une journée, les éprouvettes sont préparées pour subir des essais mécaniques de compression. Ces essais permettent d'observer l'évolution des propriétés physiques et mécaniques résiduelles des matériaux.

L'application de la charge mécanique est effectuée via une presse hydraulique de capacité 1500KN. La vitesse de chargement est gardée constante durant toute la durée de l'essai grâce au cadencemètre de la presse hydraulique (5KN/s). La charge de compression est appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette.

La charge appliquée dans le temps et la contrainte maximale de rupture sont enregistrées.



Figure III-13 : Presse hydraulique programmable

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, ont été présenté les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. La méthodologie utilisée pour chaque essai a été présentée dans cette partie. Notre étude est principalement menée sur un béton ordinaire de gravier de rivière, un béton ordinaire de gravier concassé de la carrière et un béton ordinaire des gravières réutilisés. Ces différentes formulations sont utilisées dans la suite pour analyser l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés sur la résistance mécanique des bétons : études des propriétés physiques et mécaniques des bétons à bases des granulats réutilisés.

CHAPITRE IV: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

IV.1 Introduction

Le présent chapitre présente les résultats des études expérimentales retenues pour l'étude de l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton. C'est une phase au cours de laquelle nous présentons aussi les résultats des tests réalisés sur quatre familles de bétons dont :

- ✓ Un béton ordinaire confectionné avec des granulats de la rivière Mugere séparant la commune de Muha en mairie de Bujumbura et la commune de Kabezi de la province de Bujumbura (BO-GR) ;
- ✓ Un béton ordinaire confectionné avec des granulats concassés des carrières de Gakungwe en commune de kabezi (BO-GC) ;
- ✓ Un béton ordinaire confectionné avec des granulats naturels roulés avec substitution des granulats réutilisés roulés de 15%, 30%,50% et 75% (BO-GRR) ;
- ✓ Un béton ordinaire confectionné avec des granulats naturels concassés avec substitution des granulats réutilisés concassés de 15%, 30%,50% et 75% (BO-GRR).

Comme dans les chapitres précédents une analyse des propriétés physiques a été présentée, dans le présent chapitre c'est l'occasion de vous présenter des résultats obtenus pour les propriétés mécaniques de ces familles de bétons cités ci-haut et d'en faire la discussion.

L'Essai de compression sur le béton est déterminé par la norme NF P 18-406 [41]. L'essai a pour but d'évaluer et de contrôler la résistance à la compression du béton [42]. L'Eurocode admet deux modes de mesures : soit sur les éprouvettes cylindriques, soit sur des éprouvettes cubiques.

Cependant les résultats obtenus ne sont pas identiques avec un mode ou l'autre. Pour le même béton les valeurs mesurées sur cubes doivent être plus élevées. Dans la présente étude expérimentale l'essai a été fait sur des éprouvettes cubiques de $10*10*10cm^3$. C'est l'essai de contrôle courant dans les pays anglo-saxons [43].

La machine de compression utilisée est une presse hydraulique de force maximale de 1500KN. Elle est constituée par deux plateaux : celui du haut est fixé alors que celui du bas est relié à un piston exerçant une force axiale croissante P. Cette presse est commandée manuellement et est munie d'un capteur qui enregistre directement la charge maximale de rupture et la résistance de compression maximale. La charge P est appliquée à la vitesse constante de 5KN/s jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$R_c=\frac{F}{S}$ Avec R_c : Résistance à la compression en (MPa) **IV-1**

F : Charge de rupture en kilo newton (KN)

S : Surface de l'éprouvette en mètre carré (m2)

IV.2 Résultats de l'étude

IV.2.1 Propriétés des bétons à l'état frais

- **Maniabilité**

Tableau IV-1 : Valeurs des affaissements en fonction de la nature des granulats

Formulation1:BO-GR&GRR et 2:BO-GC&GRC

	Résultat pour Affaissement (mm)				
Teneur en %	0%	15%	30%	50%	75%
Formulation 1	6.3	4.4	4.1	3.8	3.4
Formulation 2	6	4.2	3.9	3.6	3.3
Perte d'affaissement pour F1		30	35	40	45
Perte d'affaissement pour F2		30	35	40	45

La figure VI-1 représente les valeurs des affaissements respectivement pour les bétons contenant les granulats naturels avec substitution des granulats réutilisés roulés et concassés.

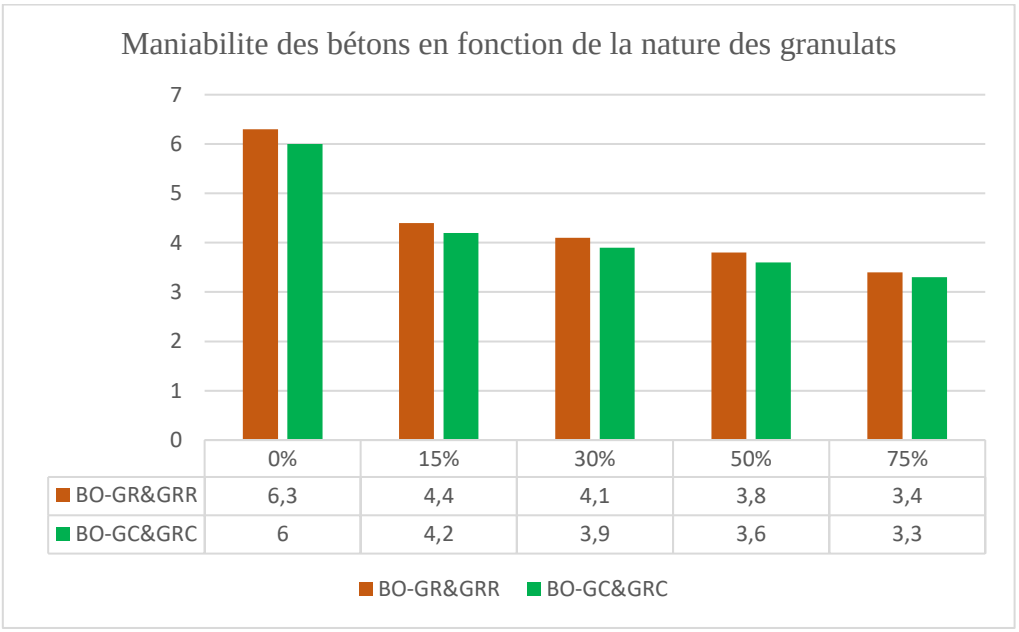


Figure IV-1 : Evaluation de maniabilité à l'aide de la mesure d'affaissement par le type des granulats ;

IV.2.2 Propriétés des bétons à l'état durci

- **Masse volumique**

Tableau IV-2 :Valeurs de la masse volumique en fonction de la nature des granulats

	résultat pour la masse volumique (kg/m3)				
Teneur en %	0%	15%	30%	50%	75%
Formulation 1	2410	2378.6	2376.3	2373.85	2371.4
Formulation 2	2415	2381.2	2378.8	2376.4	2373.9
Perte de la masse volumique pour F1		1.3	1.4	1.5	1.6
Perte de la masse volumique pour F2		1.4	1.5	1.6	1.7

La figureIV-2 représente les valeurs de la masse volumique respectivement pour les bétons contenant les granulats naturels avec substitution des granulats réutilisés roulés et concassés.

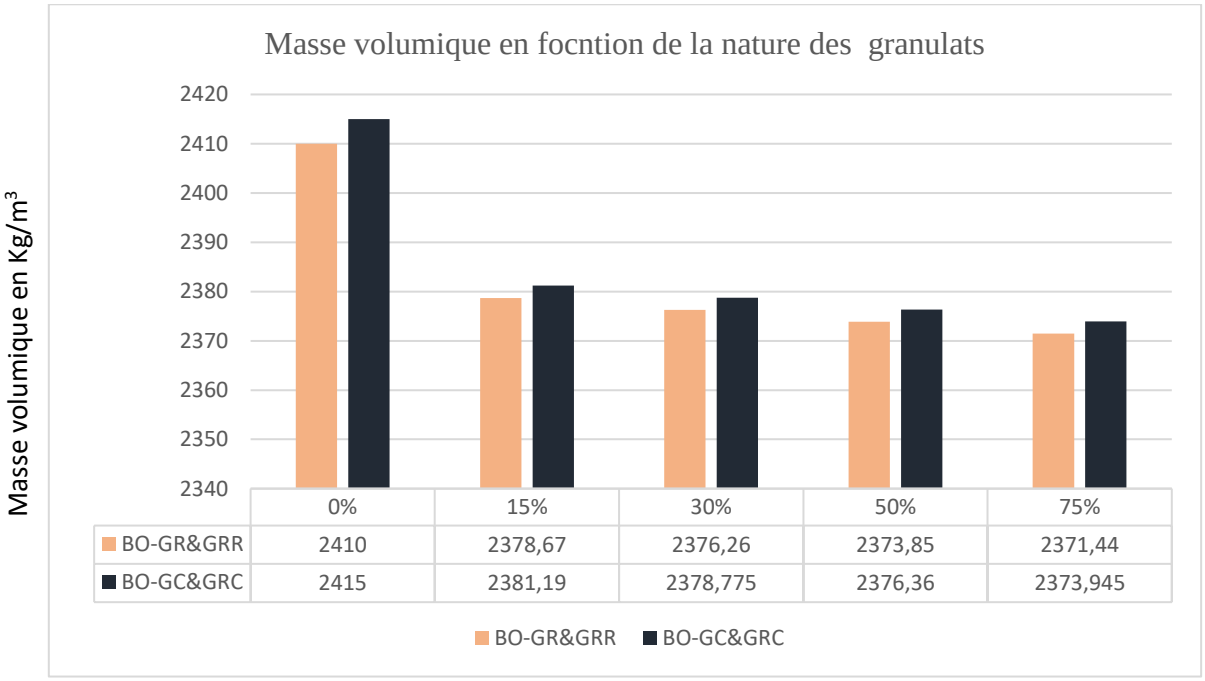


Figure IV-2 :Evaluation de la masse volumique par la nature des granulats

❖ **Absorption en eau**

Tableau IV-3 :Valeurs de l'absorption en fonction de la nature des granulats

	résultat pour absorption en eau (%)				
Teneur en %	0%	15%	30%	50%	75%
Formulation 1	1.245	10.58	11.20	11.82	12.45
Formulation 2	1.229	12.29	12.91	13.03	13.52
Augmentation absorption pour F1		8.5	9	9.5	10
Augmentation absorption pour F2		10	10.5	10.6	11

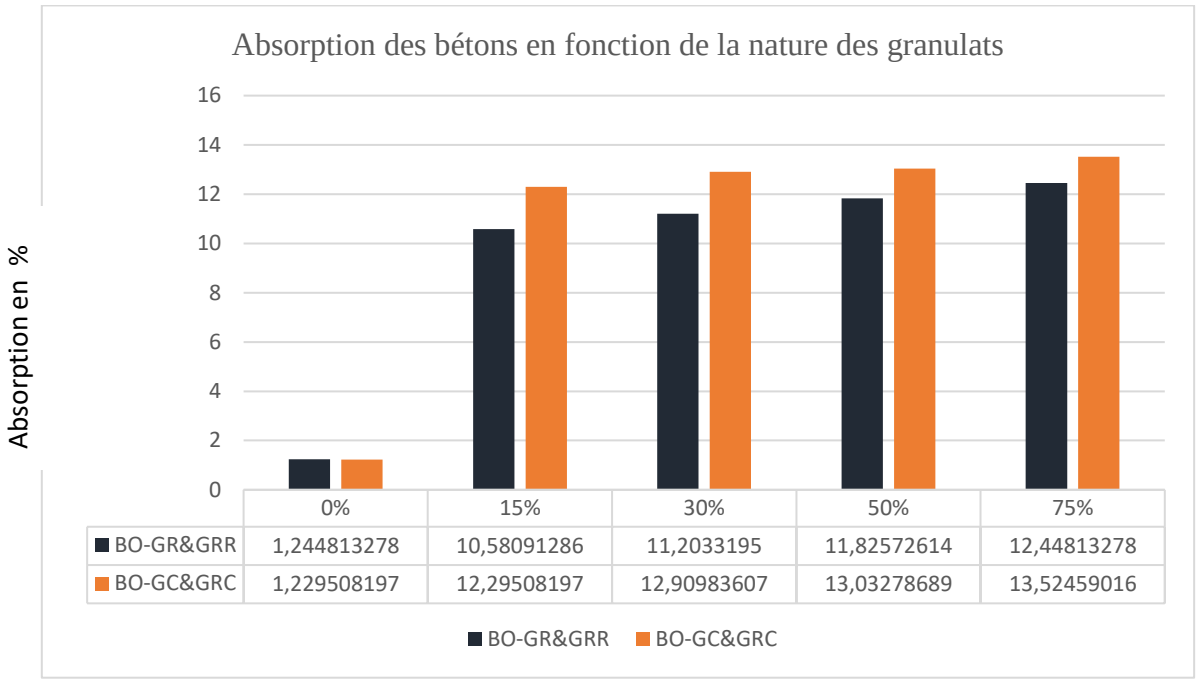


Figure IV-3 : Evaluation de la capacité d'absorption par la nature des granulats

- **Contrainte maximale de rupture des échantillons du béton ordinaire à graviers naturels roulés de la rivière Mugere (BO-GR) et avec substitution des granulats réutilisés roulés.**

Tableau IV-4 : Valeurs de la contrainte de rupture et moyenne en fonction de la nature des granulats du béton (BO-GR) et (BO-GRR)

		Contrainte maximale de rupture des échantillons du béton avec des granulats roulés (MPa)							
Nbre d'Essai	Pourcentage	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4	Eprouvette 5	Eprouvette 6	Contrainte moyenne(en MPa)	Perte de résistance en f(x) de % des granulats recycles (en MPa)
1	0%	30.58	31.51	29.93	30.67	30.30	31.40	30.73	0
2	15%	29.05	29.93	31.46	30.36	29.99	30.78	30.26	1.53
3	30%	29.30	29.99	30.58	28.36	28.52	28.43	29.19	4.99
4	50%	30.27	26.78	25.44	24.54	25.76	23.55	26.06	15.21
5	75%	23.63	24.46	22.73	23.94	23.55	26.08	24.06	21.70

- **Contrainte maximale de rupture des échantillons du béton ordinaire à graviers concassés des carrières de Gakungwe (BO-GC) et avec substitution des granulats réutilisés concassés.**

Tableau IV-5 : Valeurs de la contrainte de rupture et moyenne en fonction de la nature des granulats du béton (BO-GC) et (BO-GRC)

		Contrainte maximale de rupture des échantillons du béton avec granulats concassées (MPa)							
Nbre d'Essai	Pourcentage	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4	Eprouvette 5	Eprouvette 6	Contrainte moyenne(en MPa)	Perte de résistance en f(x) de % des granulats recycles (en MPa)
1	0%	30.98	32.51	31.93	31.99	32.01	30.90	31.72	0
2	15%	30.05	30.23	30.33	30.39	31.05	29.98	30.34	4.35
3	30%	28.60	30.73	29.43	29.26	28.79	30.33	29.52	6.92
4	50%	30.67	27.63	25.54	25.59	27.21	23.18	26.64	16.02
5	75%	24.38	24.78	24.01	23.31	23.18	23.03	23.78	25.03

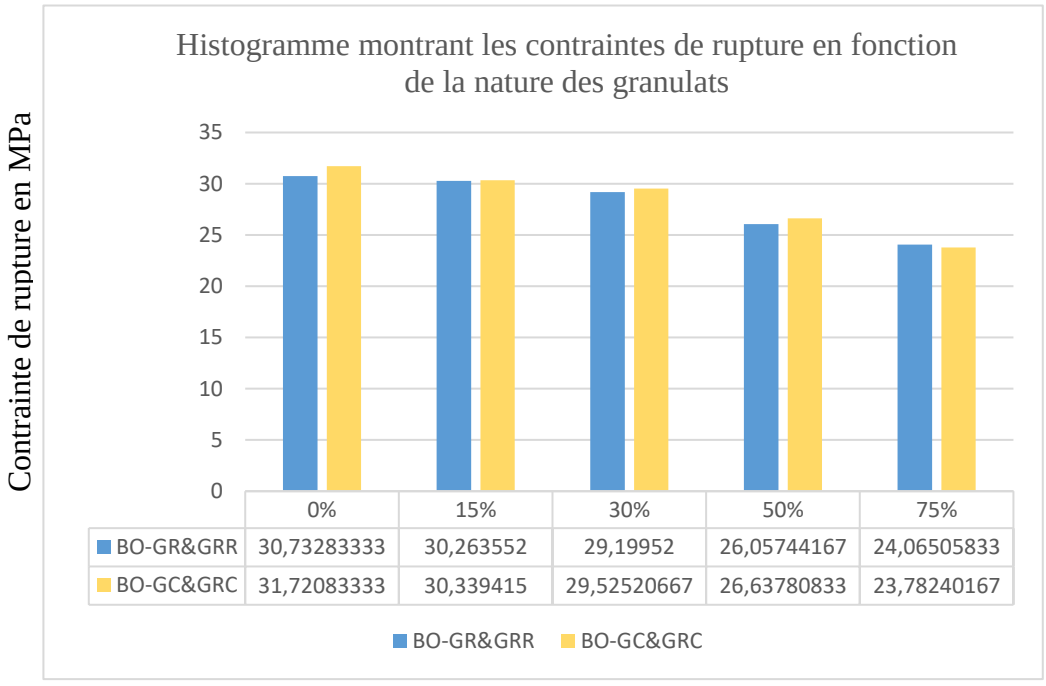


Figure IV-4 : Evaluation de la contrainte de rupture des bétons par la nature des granulats

- **Histogramme montrant les taux de perte en % de la résistance mécanique des bétons en fonction des pourcentages des granulats réutilisés.**

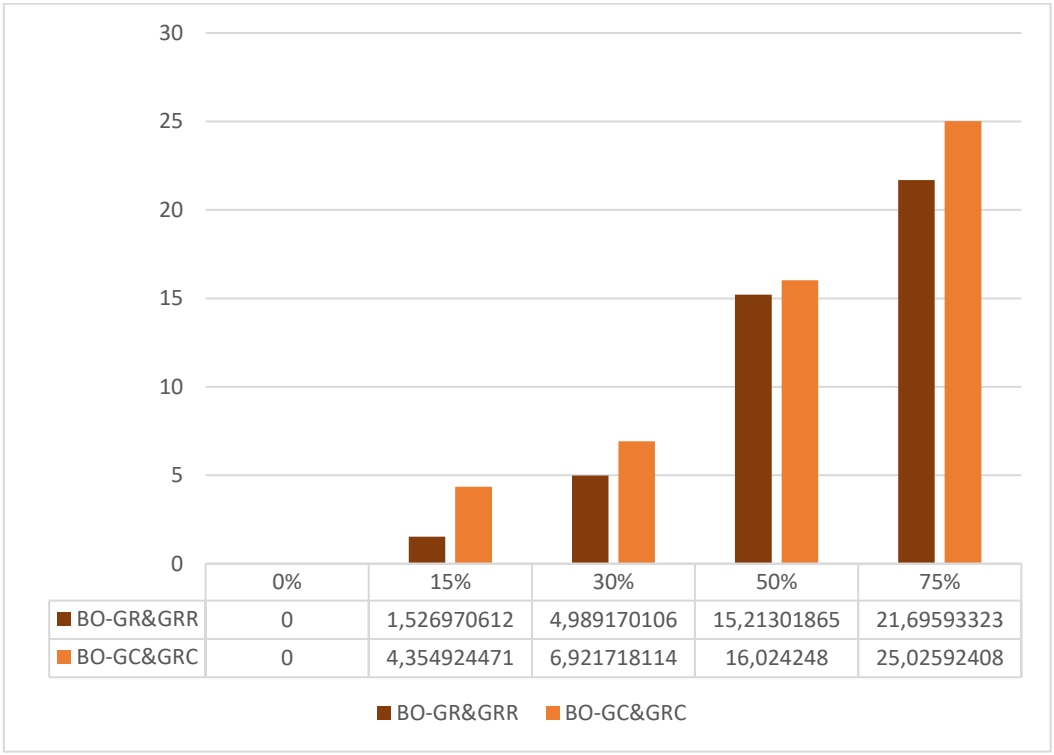


Figure IV-5 :Evaluation du taux de Petre de résistance mécanique des bétons en fonction du pourcentage des granulats réutilisés ;

❖ **Courbes montrant les contraintes de ruptures en fonction de l'absorption des bétons fabriques à base des granulats réutilisés.**

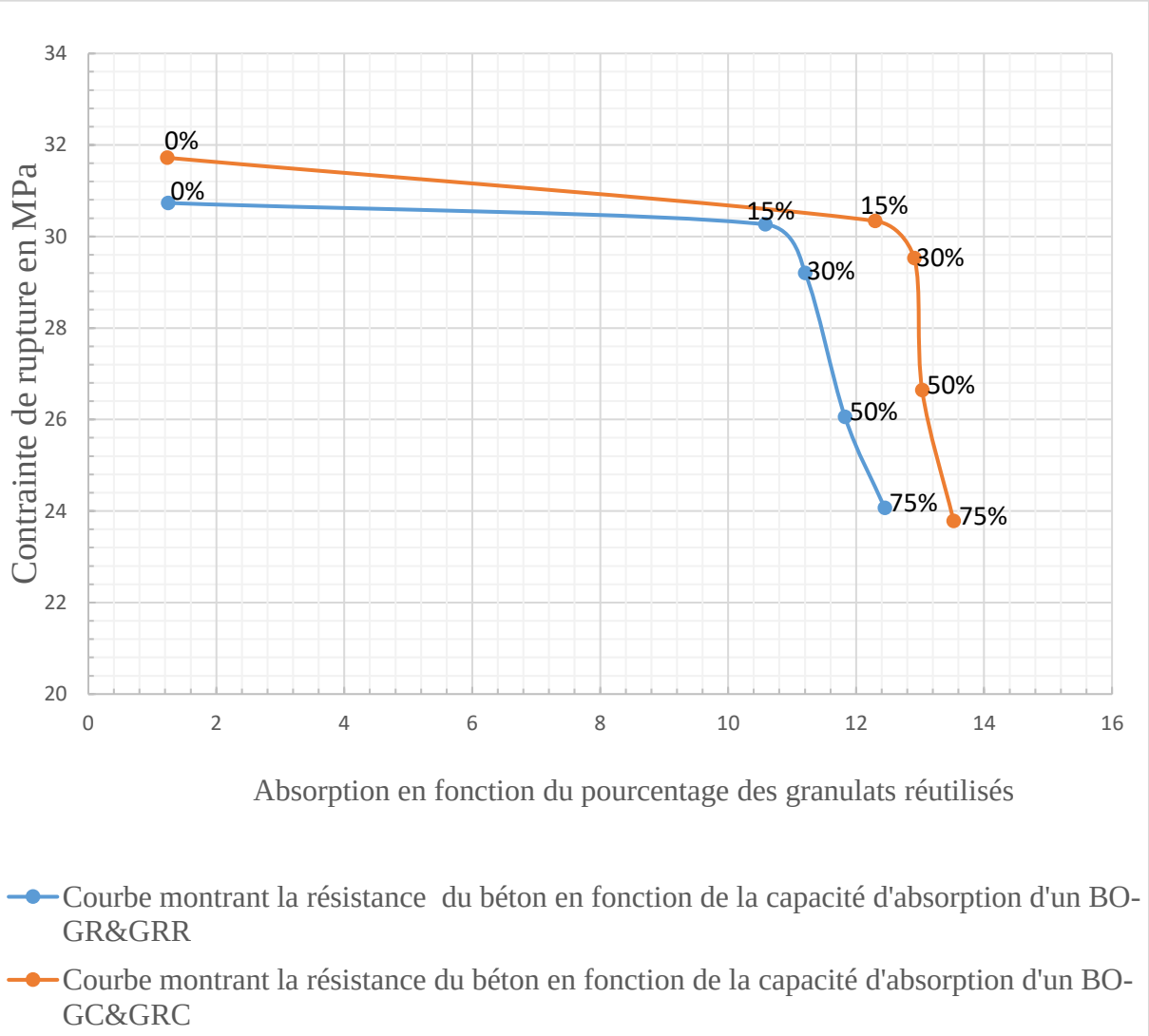


Figure IV-6 :Courbe des contraintes de rupture en fonction de l'absorption des bétons fabriques à base des granulats réutilisés ;

IV.3 Discussion des résultats

D'après les résultats issus de l'étude, pour le tableau IV-1, on observe une perte considérable de maniabilité par rapport au béton témoins. Cela est causé par la pâte de ciment enrobant les granulats réutilisés. Effectivement la texture de surface des granulats réutilisés est plus poreuse. Pour le tableauIV-2, une diminution de la masse volumique se manifeste. Elle diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats réutilisés. Cela est dû à la nature poreuse du vieux mortier collé aux granulats réutilisés et résulte aussi de la variation de la teneur en air contenu

dans les granulats réutilisés. Lorsque l'air contenu augmente, automatiquement la masse volumique diminue.

Le tableau IV-3 indique l'augmentation de l'absorption qui est dû au vieux mortier collé sur les granulats réutilisés car on voit que la grandeur quant aux résultats des granulats réutilisés s'élève jusqu'à 5fois plus que celle relative aux résultats obtenus sur les granulats naturels.

Pour les tableaux IV-4 et IV-5, compte tenu des résultats issus des essais de compression, on peut sûrement admettre que la résistance à la compression des bétons formulés à base des granulats naturels avec substitution des granulats réutilisés est plus faible que celle d'un béton à base des granulats naturels. Cette baisse de la résistance mécanique est liée à plusieurs facteurs :

- Le rapport E/C : Pour les bétons à base des granulats réutilisés il y a la perte de maniabilité lors du malaxage, il est obligatoire d'ajuster le rapport E/C pour que le béton soit maniable, ce qui conduit automatiquement à cette baisse de la résistance à la compression. Même des littératures ont conclu que le rapport E/C est l'un des éléments moteur qui peut varier la résistance à la compression pour des bétons à base des granulats réutilisés. [Deng X ,2005] [5] ;
- La porosité produit un effet, quoi que peu considérable, pouvant influencer la diminution de la résistance à la compression ;
- Le taux de substitution affecte aussi la résistance à la compression des bétons à base des granulats réutilisés de manière négative,

  À base des résultats en provenance des essais, la résistance en compression diminue également en augmentant le taux de substitution des granulats réutilisés. Si le taux de substitution des granulats réutilisés est inférieur à 30% l'influence n'est pas significative ;
- La qualité du béton d'origine ;
- La qualité de la pâte de ciment du béton d'origine ;

La figure IV-6 nous montrent que lorsque le bêton fabriqué à base des granulats réutilisés a une forte absorption, il a une faible résistance mécanique par rapport à l'autre ayant une faible capacité d'absorption. Donc cela veut dire que plus le béton a une forte absorption, plus le béton a une faible résistance mécanique.

D'une manière générale, compte tenu des résultats trouvés à base des études expérimentales, on peut garantir que :

- ✓ Par rapport aux granulats naturels, les granulats réutilisés ont une forte absorption d'eau de l'ordre de 5fois plus que les granulats naturels.
- ✓ L'absorption d'eau des granulats réutilisés augmente avec l'augmentation des granulats réutilisés
- ✓ Il y a la perte de maniabilité du béton à base des granulats réutilisés par rapport aux béton à base des granulats naturels.
- ✓ Par rapport au béton de référence (fabriqué avec des granulats naturels), la résistance à la compression du béton réutilisé diminue avec l'augmentation du degré de substitution de l'ordre de 1.5% à 25% quand le taux de substitution ne dépasse pas 75%. Mais si le taux de remplacement des granulats naturels est inférieur à 30%, l'influence sur la résistance à la compression n'est pas significative.
- ✓ La masse volumique du béton fabriqué avec des granulats réutilisés est inférieur à celle du béton avec des granulats naturels. Cela constitue un avantage dans la construction des structures où le béton léger est préférable.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION

Conclusion générale

La présente a comme objectif principal de montrer l'impact de l'usage partielle des granulats réutilisés roulés et concassés sur la résistance mécanique du béton et dégager lequel de deux types de granulats réutilisés à recommander.

L'étude bibliographique nous a permis d'avoir une vision sur les principaux phénomènes physiques, chimiques et mécaniques intervenant dans le béton lorsqu'on fait la substitution des granulats réutilisés dans les granulats naturels. La variation des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des bétons à base des granulats réutilisés est étroitement liée à la présence de l'ancien mortier collé sur les granulats réutilisés. Cette présence du mortier est la cause de la perte des caractéristiques des granulats réutilisés. Ces caractéristiques sont susceptibles d'affecter le comportement rhéologique du béton à l'état frais ainsi que le comportement mécanique du béton à l'état durci. Cela permet de confirmer que la qualité des granulats réutilisés est inférieure à celle des granulats naturels.

Après l'analyse de la formulation du béton selon la méthode DREUX- GORISSE, les bétons ont été confectionnés en gardant le squelette granulaire de (39% du sable et 61% du gravier et encore 40% du sable et 60% du gravier). Les propriétés physiques et mécaniques du béton comme la maniabilité, la masse volumique, l'absorption et la résistance en compression ont été étudiées. Ces propriétés ont été établies à l'état de référence c'est-à-dire à zéro pourcent du gravier réutilisé et comparé avec celles déterminées après la substitution des granulats réutilisés à différents taux 15% ;30%,50% et 75 %.

La comparaison des résultats de la résistance à la compression obtenue et celle de la perte de résistance montre que :

- La substitution de granulats réutilisés à 15%,30%,50% et 75% entraine une réduction de la résistance à la compression du béton de 1,5% ;5% ;15% ;21% et 4% ;7% ;16% ;25% pour les granulats réutilisés roulés et concassés respectivement ;
- La résistance à la compression varie aussi en fonction du type de granulats utilisés : l'usage du gravier réutilisé de rivière dans le béton permet d'obtenir une petite perte de résistance à la compression par rapport à l'usage des graviers réutilisés concassés ;
- L'absorption aussi augmente en fonction du taux de substitution ;
- La masse volumique diminue avec le taux de substitution.

On peut clore en essayant de tirer les réponses de cette étude pour les questions précédemment posées ou d'en présenter les autres n'étant pas mentionnées le long de cette recherche :

- En considérant pas mal d'expériences faites, les granulats réutilisés présentent une moindre résistance à la compression ; d'où on ose dire que ces derniers ne suffisent pas seuls pour être utilisés dans des structures en béton armé.
- Les résultats obtenus confirment que les granulats réutilisés roulés seraient plus conseillés à être utilisés que les granulats réutilisés concassés étant donné que leur substitution entraine une faible perte de résistance mécanique du béton.
- L'organe étatique OBM (Office Burundais des Mines et carrières) qui a été initié en 2016 avait ordonné de suspendre les activités relatives à l'exploitation des ressources naturelles en 2020 pour penser à un plan adéquat régissant ces activités. Toutefois, cette décision fut passive par le fait qu'elle n'a pas pu relever tous les défis : par exemple la demande des granulats locaux est croissante.

Recommandations

Après avoir analysé les résultats obtenus dans la présente étude, nous pouvons recommander :

1. **Au maitre d'ouvrage :**
    - De faire des études de la reconnaissance de résistance mécanique et de la nature des granulats du béton parent avant l'utilisation des granulats provenant de ce dernier.
    - De commanditer une étude sur la formulation du béton contenant les granulats qu'on désire utiliser (les granulats naturels et les granulats réutilisés) avant la prise de décision de leur emploi.
    - D'adopter l'utilisation des granulats réutilisés lors de la construction des ouvrages du génie civil dans notre pays pour économiser les ressources naturelles et sauvegarder l'environnement.
2. **Au maitre d'Œuvre :**
    - D**'**être actif tout en lançant des études approfondies en matière de recyclage des déchets de façon régulière ;
    - De mettre en application les œuvres innovatrices plus particulièrement pour le recyclage des déchets quoi qu'ils en soient dans le but de maintenir l'environnement sain.
3. **Aux futurs chercheurs :**
    - De continuer les recherches sur les matériaux locaux plus particulièrement sur le sable réutilisé.
4. **A l'université du Burundi :**
    - De remplacer des matériels non fonctionnels dans les laboratoires des matériaux ;
    - D'équiper les laboratoires des matériaux afin de rendre facile les travaux de Recherche.
5. **Au gouvernement du Burundi :**
    - De prévoir des zones de stockages des déchets solides des démolitions des ouvrages dans chaque quartier afin de faciliter la collecte vers les usines de recyclage.
    - D'entreprendre à initier des stratégies comme la construction des usines de recyclage ou autres infrastructures y relatives pour répondre à la demande croissante des granulats locaux qui se manifeste.
    - D'encourager et soutenir les travaux de recherche en préconisant le budget pour les meilleurs projets proposés par les chercheurs dans le domaine du génie civil et environnemental.

BIBLIOGRAPHIE

[1] François DE LARRARD, Horacio COLINA, eds., , Le béton recyclé, Ifsttar, 2018..

[2] PN RECYBETON, Le recyclage complet du béton, (2012). https://www.pnrecybeton.fr.

[3] ECOREB, ECO-construction par le Recyclage du Béton dans le béton, (2013). https://anr.fr/Projet-ANR-12-VBDU-0003..

[4] Minh-Duc Nguyen, Performances mécaniques des bétons incorporant des granulats recyclés et applicabilité des normes de dimensionnement, Université de Cergy-Pontoise, France, 2017..

[5] E. Ghorbel, G. Wardeh, H. Fares, Mechanical and fracture properties of recycled aggregate concrete in design codes and empirical models, Struct. Concr. 20 (2019) 2156–2170.doi:10.1002/suco.201800335..

[6] R. MAILLOT, "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001)..

[7] Norme Française P 18-553, "Granulats -Préparation d´un échantillon pour essai", AFNOR, (1990)..

[8] Norme Française EN 932-1, Norme F "Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage", AFNOR, (1996)..

[9] G. DREUX & J. FESTA, "Nouveau guide du bétonet ses constituants", Edition Eyrolles, 8 eme édition, 409 p., (1998)..

[10] F. GABRYSIAK, "Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2", Académie de Nancy-Metz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro.

[11] Norme Française XP P 18-540, "Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540", (1997)..

[12] Norme Française EN 12-620, "Granulats pour béton hydraulique", (2004)..

[13] H. HUSSAIN & D. LEVACHER, "Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons", XXIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil, (2003)..

[14] T. YAMATO & M. SOEDA, "Physical properties of recycled aggregate and the utilization as concrete aggregate", International seminar on Recycled Concrete, (2000)..

[15] CH. GHERDAOUI, "Influence des fines minérales sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à base de sable de carrières de la région de Guelma", Mémoire de Magister, Université Badji M. - Annaba, 94 p., (2007)..

[16] Norme Française P 18 554, Nor "Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux", (1990)..

[17] Norme Française P 18-555, Norm "Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables", AFNOR, (1990)..

[18] Norme Française P 18-558, "Granualts: Détermination de la masse volumique absolue des fines", AFNOR, (1990)..

[19] Norme Française EN 1097-3, No "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie3: Détermination de la Masse volumique apparente", AFNOR, (1996)..

[20] Norme Française EN 1097-6, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient de l'absorption d'eau", AFNOR, (1996)..

[21] S. HACHAICHI, "Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton", Thèse de Magister, 92 p., (2008)..

[22] UNPG, Union nationale des producteurs de granulats, (2015). https://www.unpg.fr..

[23] Mirian Quebaud, Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats, Université d'Artois, Lille-France, 1996..

[24] C. Molin, K. Larsson, H. Arvidsson, Quality of reused crushed concrete strength, contamination and crushing technique., in: Use Recycl. Mater. Build. Struct., RILEM, Barcelone, 2004: pp. 150–155..

[25] C. Cimpelli, M. Lefort, Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ilede-France : les bétons et produits de démolition recyclés., 1996.

[26] M.S. de Juan, P.A. Gutiérrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 872–877. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012..

[27] S. Nagataki, A. Gokce, T. Saeki, M. Hisada, Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, Cem. Concr. Res. 34 (2004) 965–971. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.008.

[28] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks, Constr. Build. Mater. 16 (2002) 281–289. doi:https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00019-3.

[29] T.C. Hansen, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, Oxfordshire: Taylor and Francis, 1992..

[30] S. Omary, E. Ghorbel, G. Wardeh, Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties, Constr. Build. Mater. 108 (2016) 163–174. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.

[31] G. Wardeh, E. Ghorbel, H. Gomart, G. Wa Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2, Int. J. Concr. Struct. Mater. 9 (2015) 1–20. doi:10.1007/s40069-014-0087-y..

[32] İ.B. Topçu, S. Şengel, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, Cem. Concr. Res.34 (2004) 1307–1312. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019..

[33] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez de Juan, C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, Durability of recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. 40 (2013) 1054–1065. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106..

[34] S.M. Levy, P. Helene, S. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainabledevelopment,Cem.Concr.Res.34(2004)1975–1980.doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.009.

[35] M. Casuccio, M.C. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, Failure mechanism of recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. 22 (2008) 1500–1506. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032..

[36] R. DUPAIN, R. LANCHAN & J.-C. SAINT-ARROMAN, "Granulats, Sols, Ciments et Bétons", Editions Casteilla, 2ème édition conforme aux normes européennes, 236 p., (2000)..

[37] Hélène H., Xavier J., Formulation d'un béton ordinaire, Paris: Ecole normale superieure, 2018.

[38] Commision d'Experts de l'UNESCO, Code et manuel d'application pour le calcul et l'exécution du béton armé Rédigé par une Commission d'Experts de l'UNESCO, Paris: DUNOD, 1968, p. 417.

[39] Louis Granju J., BETON ARME: THEORIE ET APPLICATIONS SELON.

[40] L. MIREN ETXEBERRIA, "Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete", Thèse de doctorat, Université polytechnique de Catalogne - Espagne, 242 p., (2004)..

[41] R.S. RAVINDRARAJAH, M. STEWARD & D. GRECO, R.S. RAVINDRARAJAH "Variability of Recycled Concrete Aggregate and its Effects on Concrete Properties", 2nd International Conference on Engineering Materials, San Jose, USA, (2001)..

[42] Norme Européenne EN 206-1, "Béton Partie1: Spécification, performances, production et conformité", (2002)..

[43] A. M. NEVILLE, "Propriétés des bétons", traduis par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p., (2000)..