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

Etude des propriétés physiques et mécaniques du béton contenant des granulats recyclés

Lupopo, Géorges; Sous la direction du : Dr-Ir. Hatungimana Daniel

2023-07
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2081

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

Option: Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année Académique: 2021-2022

ETUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DU BETON CONTENANT DES GRANULATS RECYCLES

Mémoire

Présenté publiquement par :

Georges LUPOPO

En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences de l'Ingénieur

Option: Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets.

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

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

Bujumbura, Juillet 2023

Identification des membres du jury

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

DEDICACE

Avec un énorme plaisir, à cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes parents « père et mère » en particulier et à toute la famille.

Comme je le dédie à la famille ; qu'il soit ainsi également à tous les enseignants de l'Université du Burundi, Faculté des Sciences de l'Ingénieur dans le département de Génie Civil, Aménagement et Maitrise des projets.

J'invite tous mes proches ; Mes amies et mes camarades pour pouvoir être en réjouissance en leur dédiant l'œuvre de leur soutien en symbole de ce mémoire.

A toutes personnes qui m'ont encouragé ; je dédie mon travail.

Remerciements

Je tiens à remercier avant tous notre Dieu Le Tout puissant qui m'a fait grâce de la possibilité d'endurer et surmonter toutes les épreuves auxquelles j'ai affronté.

Je remercie mes très chers parents et d'ensemble ; la famille LUPOPO Jean-Baptiste ; La famille NDOBEZI Michel ; La famille Martin FADHILA ; la famille MANIRAMBONA Claude Bernard et la famille Jean-Népomuscène MASUMBUKO pour toute leur participation et soutien tant moral que matériel qu'ils m'ont fait part pendant tout le parcours universitaire.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon parcours à ma recherche jusqu'à la rédaction de ce présent mémoire.

J'avoue mes sincères reconnaissances en premier lieu à mon directeur de mémoire Docteur-Ingénieur HATUNGIMANA Daniel, enseignant à l'Université du Burundi en Faculté des Sciences de l'Ingénieur dans le département de Génie Civil, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué au grand reflet de cet ouvrage.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'Université du Burundi en Faculté des Sciences de l'Ingénieur dans le département de Génie Civil, Aménagement et Maitrise des Projets ; qui a fait à ce que les intervenants professionnels responsables de ma formation pratique approfondie soient confiants à moi, grâce à la base théorique et pratique éduquée par l'équipe pédagogique.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à l'entreprise JESSE'S CONSTRUCTION à partir de son Directeur Général Jean-Népomuscène MASUMBUKO pour pouvoir me faire part de grâce de s'expérimenter au sein d'entreprise afin d'épanouir pratiquement ce sujet davantage.

Finalement, en preuve de reconnaissance envers le corps professoral de Faculté des Sciences Appliquées dans le département de Génie Civil à l'Université Lumière de Bujumbura et l'ensemble de camarades ingénieurs depuis le baccalauréat jusqu' au mastère ; pour votre soutien moral et collaboration franche je tiens à vous remercier infiniment.

Résumé

Le but principal de cette étude est de démontrer techniquement ou scientifiquement la possibilité d'utiliser partiellement ou totalement les granulats (déchets de béton de démolition) comme substitution des granulats naturels dans la fabrication du béton recyclé afin de répondre favorablement à la question sur l'impact environnemental pour la part de la meilleure gestion écologique (ressources naturelles).

L'étude expérimentale a porté sur les taux de substitution variable (0, 25, 50, 75, 100%) pour chaque type de dosage en granulat roulé naturel et recyclé. Les caractéristiques des granulats recyclés ainsi que celles du béton frais et durci à base de ces matériaux ont été analysées et comparées avec celles du béton témoin (100% granulats naturels).

Les résultats trouvés, après écrasement à la presse hydraulique de capacité limite de 1 500 KN, démontrent que la résistance à la compression (Rc) entre le béton ordinaire B.O et celles des bétons contenant des granulats recyclés varie en diminution de 0,1 à 3,2% causée par l'augmentation du dosage de graviers roulés recyclés dans le béton. Le béton témoin est formulé à base des graviers roulés naturels du site rivière Kanyosha et graviers roulés recyclés par concassage manuel à marteau masse. Ces deux types de graviers se substituent entre 0 ; 25; 50; 75 et 100%.

Finalement, il a été remarqué que le béton recyclé a une résistance à la compression de 25,287 MPa, ce qui veut dire que selon le classement de la recommandation CEB-FIP 1970 ce béton est dans la catégorie de « béton armé ». D'où notre sujet contribue à une solution idéale sur la préservation environnementale contre l'épuisement des ressources naturelles et par ailleurs, contribue favorablement aux défis structuraux.

Mots clés : Graviers recyclés, démolition, granulats naturels, taux de substitution, affaissement, résistance à la compression, caractéristiques physico-mécaniques.

Abstract

The main aim of this study is to demonstrate technically or scientifically the possibility of partially or totally using aggregates (demolition concrete waste) as a replacement for natural aggregates in the manufacture of recycled concrete in order to respond favorably to the question on the environmental impact for the part of the best ecological management (natural resources).

The experimental study focused on the variable substitution rates (0, 25, 50, 75, 100%) for each type of dosage of natural and recycled rolled aggregate. The characteristics of the recycled aggregates as well as those of the fresh and hardened concrete based on these materials were analyzed and compared with those of the control concrete (100% natural aggregates).

The results found, after crushing with a hydraulic press with a capacity limit of 1,500 KN, demonstrate that the compressive strength (Rc) between ordinary B.O concrete and that of concrete containing recycled aggregates varies in decrease from 0.1 to 3 .2% depending on the heterogeneous irregularity caused by increasing the dosage of recycled rolled gravel in the concrete. The control concrete is formulated based on natural rolled gravel from the Kanyosha River site and rolled gravel recycled by manual hammer crushing. These two types of gravel substitute between 0; 25; 50; 75 and 100%.

Finally, it was noticed that recycled concrete has a compressive strength of 25.287 MPa, which means according to the classification of the CEB-FIP 1970 recommendation this concrete is in the category of "concrete armed." Hence our subject contributes to an ideal solution on environmental preservation against the depletion of natural resources and moreover, contributes favorably to structural challenges (physico-mechanical characteristics of materials).

Key words: Recycled gravel, demolition, natural aggregates, substitution rate, subsidence, compressive strength, physico-mechanical characteristics.

Table des matières

Identification des membres du jury i
Dedicace ii
Remerciements iii
Résumé iv
Abstract v
Table des matières vi
Sigles et abréviations viii
Liste des figures x
Liste des tableaux xi
Avant-propos xii
Chapitre.0. Introduction générale 1
0.1. Problématique 1
0.2. Objectifs de l'étude 2
Chapitre I : Revue générale sur le béton ; granulats naturels ; granulats recyclés et valorisation. 4
I.1. Le béton 4
I.1.1. Classe de béton 4
I.1.2. Composition du béton 5
I.1.3 Constituants du béton 5
I.1.4. Propriétés du béton 10
I.2 : Granulats naturels, recyclés et valorisation 12
I .2.1. Généralités sur les granulats utilisés dans le béton 12
I.2.2. Recyclage 16
I.2.3. Composition et propriétés physiques des granulats recyclés de béton 17
I.2.4 Les caractéristiques de fabrication 18
I.2.5 Caractéristiques géométriques 18
I.2.6 Caractéristiques physiques 20
I.2.7. Caractéristiques chimiques 21
I.2.8. Caractéristiques mécaniques 22
I.2.9. Les propriétés physiques 22
I.2.10 Les propriétés mécaniques 23
I.2.11. Module d'élasticité (E) 25
Chapitre II : Caractéristiques des matériaux utilisés et formulation des bétons 27
II.0. Introduction 27

II.1 Matériaux utilisés 27
II.2 Caractérisation des matériaux 27
II.3 Formulation du béton 43
II.3.1 Méthode de calcul de la composition du béton 43
II.3.2 Formulation des bétons : Méthode de Dreux-Gorisse. 43
II.4. Matériels et essais 61
II.4.1. Etude de béton à l'état frais 61
II.4.2. Les essais sur le béton durci 63
II.4.3. Essai de compression 64
Chapitre III : Présentation des Résultats et discussion 66
III.0. Introduction 66
III.1. Méthodologie adaptée à la formulation du béton 66
III.2. Présentation des résultats 66
Conclusion générale 73
Recommandations 74
Bibliographie. 75

Sigles et abréviations

Cv : Le coefficient volumique

V: volume absolu de grain de gravier

D: la plus grande dimension du gravier

BAP : Béton auto plaçant

BHP : Bétons à hautes performances

BCR : Béton compacté au rouleau

BPR : Béton de poudre réactive

P : La porosité

W % : Teneur en eau

AB % : Taux d'absorption d'eau

L A : Essai los Angeles

E : Module d'élasticité

GRN : Gravier roulé naturel

GRR : gravier roulé recyclé

SRN : Sable roulé naturel

B.O : Béton Ordinaire de 100% granulats naturels

B.R : Béton Recyclé de 100% gravier roule recyclé et 100% Sable roulé naturel

γ_{app} : La masse volumique apparente

ρ_{abs} : Masse volumique absolue ou spécifique

P (%) : Porosité

C (%) : Compacité

e (%) : Indice de vide

M_h : La masse du matériau sature d'eau

M_S : La masse du matériau sec

fc28 : Résistance moyenne à 28 jours du béton

G : Coefficient granulaire

FCE : Résistance moyenne du ciment à 28 jours de sa classe vraie

C : Masse du ciment par m^3 de béton

E : Masse d'eau par m^3 de béton

γ : Proportion du volume de matière que contient le matériau :

Vc : Volume absolu de ciment

C : masse de ciment

Liste des figures

Figure 0.1 : photos des décharges sauvages de gravats dans la ville de Bujumbura. 1
Figure I.1: Les différentes catégories de déchets de chantier. 15
Figure I.2: Compositions des granulats recyclés de béton.....17
Figure I.3 : courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons. 19
Figure I.4: Relation entre la résistance à la compression et l'âge de Bétons confectionnés avec différents granulats (E/C=0,50) 23
Figure I.5: Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression 24
Figure I.6: Evolution du module élastique en fonction du taux de Substitution en recyclés et le rapport26
Figure I.7: Relation entre les modules élastiques des bétons recyclés et Conventionnels à différent 26
Figure II.1: Courbe granulométrique de gravier roulé naturel.....28
Figure II.2: Détermination du degré d'absorption d'eau 31
Figure II.3 : photos d'Analyse granulométrique de granulats roulés recyclés 32
Figure II.4: Courbe granulométrique de gravier roulé recyclé 33
Figure II.5 : photos d'Analyse granulométrique de granulats roulés recyclés 36
Figure II.6 : Courbe granulométrique sable naturel.....38
Figure II.7 : Photos d'analyse granulométrique du sable naturel 39
Figure II.8 : Abaque du dosage en Ciment 46
Figure II.10 : mélange 1 à 5. 60
Figure II.11 : Appareillage de cône d'Abrams 61
Figure II.12 : Vibration du béton sur la table vibrante 62
Figure II.13 : Photos sur le malaxage (ouvrabilité) 63
Figure II.14 : Photos à l'étude de béton à l'état frais - état frais durci 64
Figure II.15 : Photo illustrant l'essai de compression 65
Figure III.1 : Détermination de différentes résistances à la compression après l'écrasement à la presse hydraulique. 67
Figure III.2. Graphique de comparaison de la résistance à la compression de béton ordinaire et celles des bétons à base de gravier recyclé. 72

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classe des bétons en fonction de la résistance à la compression. 4
Tableau I.2 : Mode opératoire de l'essai de cône d'Abrams selon la NF18-451 5
Tableau I.3 : principaux constituants du clinker....5
Tableau I.4 : refus cumulés sur tamis 7
Tableau II -1- L'analyse granulométrique de gravier roulé naturel....28
Tableau II.2 La masse volumique apparente (γ_{app})....29
Tableau II.3 La masse absolue ou spécifique (ρ_{abs})....30
Tableau II -4 Porosité, compacité et indice des vides....30
Tableau II -5 Degré d'absorption d'eau des agrégats (w%) 31
Tableau II .6 L'analyse granulométrique de gravier roulé recyclé....33
Tableau II.7 La masse volumique apparente (γ_{app})....34
Tableau II.8 La masse absolue ou spécifique (ρ_{abs})....35
Tableau II -9 Porosité, compacité et indice des vides....35
Tableau II.10 Degré d'absorption d'eau des agrégats (w%) 36
Tableau II .11 : résultat d'analyse granulométrique du sable....38
Tableau II .12 : Type de sables et leur marge du module de finesse. 40
Tableau II.13: Teneur en eau du sable....41
Tableau II.14. La masse volumique apparente du sable à l'état lâche....41
Tableau II.15. La masse volumique absolue du sable 41
Tableau II.16. Composition chimique du ciment DANGOTE 42
Tableau II.17. Variation suivant les jours de résistances à la compression du mortier fait à la base du ciment DANGOTE 42
Tableau II.18: Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser. 45
Tableau II.19: K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.....48
Tableau II.20. Récapitulation des coordonnées de la droite de Dreux. 49
Tableau II.21 : compacité $\boldsymbol{\gamma}$ suivant la variation de diamètre. 51
Tableau II. 22. Récapitulation de la synthèse du dosage pour la confection du béton pour les essais....59
Tableau III. 1.Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le MélangeI B.O.68
Tableau III. 2. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange II....68
Tableau III. 3. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange III ...69
Tableau III. 4 . Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange IV. ..69
Tableau III. 5. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange V. 70
Tableau III. 6. Variation des résistances à la compression entre BO et BR....71

Avant-propos

Suivant tout au long d'évolution humanitaire, l'être humain cherche à étendre et choisir ses matériaux selon ses besoins dans les différents domaines. De nos jours, le domaine de la construction est un secteur qui ne cesse de se développer et de s'améliorer afin que la vie humaine soit adaptée dans les différentes métamorphoses. Pour ce faire, ceci demande la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux dans le secteur de la construction et par ailleurs les exigences d'études environnementales doivent être considérables, Parmi ceux-ci le béton est le matériau le plus communément utilisé au monde : $1m^3$ est mis en œuvre par an et par habitant sur la planète. Parallèlement à cela, on assiste à une accélération de la démolition et de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de déchets. Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer de nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre en béton ordinaire comme en béton recyclé. Dans les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la démolition a pour double objectif de préserver les ressources naturelles en augmentant la quantité utile en granulats ainsi que de réduire les flux de déchets par recyclage.

C'est pourquoi la motivation du présent travail de fin d'étude intitulé «**Etude des propriétés physiques et mécaniques du béton contenant des granulats recyclés**», cette étude va surtout s'intéresser à évaluer expérimentalement l'influence des granulats recyclés provenant des déchets de démolition sur les caractéristiques physico - mécaniques, et la durabilité des bétons à base de ces agrégats comparativement au béton ordinaire (BO) à base des agrégats naturels pour l'approbation ou la valorisation de ce béton recyclé (BR) .

Chapitre.0. Introduction générale

0.1. Problématique

La protection de l'environnement est un élément fondamental, qui est directement liée à la survie de l'être humain, la faune et la flore. Les Paramètres comme l'environnement, la protection de la nature, le développement durable jouent un rôle important dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction. La poussée écologique impose de tenir compte de l'environnement soit en évitant des empreintes de matériaux naturels, soit en éliminant des sous-produits et déchets dont les dépôts souvent disgracieux peuvent conduire à certaines pollutions du milieu naturel ce qui nécessitera la mobilisation de capitaux très importants. Les chantiers de construction et de démolition génèrent une grande diversité de déchets qui constituent une partie importante des coûts de production des déchets solides dans le monde. Environ 90 % d'entre eux sont éliminés en décharge [8]. L'épuisement de sources naturelles disponibles des granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier. Le recyclage des granulats issus des matériaux de démolition, déjà bien engagé dans le secteur des travaux publics mais moins dans les travaux de génie civil, semble être une solution idéale, la plus prometteuse pour les problèmes de déchets. Il a connu une grande évolution dans les pays développés, répond aux soucis de manque de granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages de gravats et les figures suivantes sont bien édifiantes [12].



Débris de bétons



Débris mixte de bétons et maçonnerie

Figure 0.1 : photos des décharges sauvages de gravats dans la ville de Bujumbura.

Actuellement, la mise en œuvre à la valorisation de déchets de démolition a évolué à travers le monde et connaît un développement assez important et le taux de recyclage des débris de construction a atteint dans certains pays 80 %. L'épuisement de certains gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre

en place de nouvelles carrières (la protection de l'environnement, la préservation des paysages) imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats pour béton afin de répondre aux besoins des grands chantiers qui pourraient être lancés par le gouvernement Burundais dans les jours à venir. Comme le béton constitue presque 75%, en poids, des constructions. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton. Les granulats issus de recyclage des produits de démolition s'inscrivent dans le cadre des matériaux locaux de substitution, ils sont utilisés actuellement dans la plupart des pays Européens dans le domaine routier, et leur valorisation dans le béton hydraulique est freinée par le fait qu'ils sont considérés comme granulats hors normes. Leur hétérogénéité et leur fort pouvoir d'absorption d'eau menant à des difficultés de control des propriétés du béton frais et par conséquent, influençant la résistance et on les suspecte ainsi d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité des bétons [6]. Les études sur l'utilisation des granulats recyc1és durent depuis 50 ans. Et parallèlement, on a constaté selon différentes sources bibliographiques le manque d'études sur La composition d'un béton à base de granulats recyclés. Ceci constitue un problème, voire une insuffisance majeure.

0.2. Objectifs de l'étude

Cette étude consiste à l'évaluation expérimentale de l'influence des granulats recyclés provenant des déchets de démolition sur les caractéristiques physico - mécaniques, et la durabilité des bétons à base de ces agrégats. Dans ce contexte, mon travail s'inscrit, dans l'objectif principal de contribuer à la valorisation de la fraction inerte des matériaux de démolition et principalement les bétons comme substitut aux granulats naturels, dans la production de nouveaux bétons structurels, dans le but de:

- Contribuer à la préservation environnementale par l'élimination du dépôt sauvage des gravats et la limitation d'extraction des granulats de carrière et alluvionnaires,
- Répondre à la demande croissante en granulats,
- Contribuer à mettre en valeur des granulats recyclés,
- Contribuer aux études menées sur l'emploi des granulats recyclés dans les bétons en substitution des granulats naturels.

Ce mémoire contient 4 chapitres qui sont les suivants **:**

- Le premier chapitre présente la revue générale sur le béton : constituants du béton et propriétés principales du béton.
- Le deuxième chapitre présente l'ensemble de généralités sur les granulats utilisés dans le béton : un rappel sur les différents types de granulats, un aperçu général sur les méthodes et les moyens

nécessaires à l'élaboration des granulats recyclés et enfin l'ensemble des caractéristiques des granulats.

- Le troisième chapitre Matériaux, matériels et essais : donne une idée sur les essais utilisés pour la caractérisation physiques, chimiques et mécaniques des matériaux, ainsi que sur les matériels utilisés pour ces essais.
- Le quatrième chapitre Résultats ; discussion et conclusion : Présente les résultats expérimentaux obtenus et les interprétations faites.

Une conclusion générale : La conclusion a été tirée à partir des résultats obtenus lors de cette étude ainsi que les futurs travaux suggérés en forme de perspective dans l'objectif de la meilleure gestion économique et environnementale.

Chapitre I : Revue générale sur le béton ; granulats naturels ; granulats recyclés et valorisation.

Introduction

Le béton est un matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Ces propriétés physiques ; économiques et mécaniques permettent la construction des ouvrages de génie civil et édifices réels qui pouvant résister contre les intempéries dans le temps. Dans ce premier chapitre, on va donner un aperçu général sur le béton et ses composantes et voir quelques caractéristiques essentielles du béton.

I.1. Le béton

On sait que le béton est le matériau obtenu en solidarisant par une pâte de ciment, un squelette granulaire composé de sable et de gravier. Comme le liant a des propriétés hydrauliques, ce béton est aussi appelé béton hydrauliques [1].

I.1.1. Classe de béton

La grande diversité des bétons a conduit à définir et préciser des critères des bases pour leur classification et leur désignation. Les critères fondamentaux adoptés sont au nombre de cinq :

a)-La résistance à la compression

Cette résistance est mesurée sur des éprouvettes cubique ; prismatique et cylindrique à l'âge de 3, 14 et 28 jours. La recommandation CEB-FIP 1970 classe les bétons, en fonction de leurs résistances caractéristique comme suit dans le tableau (I.1) :

Tableau I.1 : Classe des bétons en fonction de la résistance à la compression.

Grade	Utilisation recommandées
C12	seulement pour les bétons non armé
C16, C20	pour les bétons armés
C25, C30, C35	pour béton armé ou précontraint
C40, C45, C50	Pour le béton précontraint
C60, C70, C80	dans les cas spéciaux

b) La consistance

Le tableau (I.2) représente l'aptitude à la mise en œuvre (ouvrabilité) et la consistance est mesurée par un test de plasticité : l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau I.2 : Mode opératoire de l'essai de cône d'Abrams selon la NF18-451

Consistance	Ferme	Plastique	Très plastique	Fluide
Affaissement (mm)	<4	5 à 9	10 à 15	≥ 16
Notation	F	P	TP	FL

c)La dimension des granulats utilisés 0/D, D étant la dimension maximale exprimée en (mm).

d) Le dosage minimal de ciment en Kg par m^3 de béton.

e) La désignation du ciment d'après les indications normalisées (par exemple CPJ 42.5).

I.1.2. Composition du béton

L'étude d'une composition de béton consiste toujours à rechercher conjointement deux qualités essentielles qui sont : la résistance et l'ouvrabilité. Ces deux qualités sont étroitement liées, l'une à l'autre quant aux facteurs dont elles dépendent, mais elles varient en sens inverse. On recommande un dosage minimal de (300 kg/m^3) et un rapport (E/C) maximal de 0.65. La recommandation CEB-FIP ainsi que le règlement BAEL.83 n'inscrivent pas des dosages pour les différentes caractéristiques qui doivent être respectés. Le dosage des différents constituants du béton dépend du type de matériau recherché, détermine par ses utilisations. En effet, ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques dépendent de sa composition et de facteurs extérieurs.

I.1.3 Constituants du béton

a. Le ciment

Le ciment usuels sont aussi appelés liant hydraulique, car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus au moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau [2]. Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température vers 1450°C (tableau I.3), et le broyage d'un mélange minéral (calcaire+ argile) en général. Les quatre principaux constituants du clinker sont :

Tableau I.3 : principaux constituants du clinker

Nom	Appellation	Pourcentage
Le silicate tricalcique	C_3S	50-70%
Le silicate bi calcique	C_2S	10-30%
L'aluminate tricalcique	C_3A	2-15%

L'alumino-ferrite tétra calcique	C4AF	5-15%

Dans le langage courant, le terme ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois :

- la poudre de ciment : commercialisée en sac (vrac)
- la pâte de ciment au moment de son gâchage avec l'eau
- le produit obtenu après durcissement.

Dans tout ce qui suit, on distinguera ces différents états en appelant.

Ciment anhydre : la poudre de ciment avant son gâchage avec l'eau

Ciment hydraté : le mélange d'eau et de ciment âpres solidification. Il est insoluble dans l'eau

Pâte fraiche de Ciment : le mélange d'eau et de ciment anhydre avant hydratation (solidification).

b. Type de ciment

Au clinker Portland peuvent être ajoutés un ou plusieurs ingrédients suivants :

-Laitier de haut-fourneau

Produit granulé qui est obtenu par le refroidissement brusque de la gangue en fusion des hauts fourneaux. Constituant à hydraulicité latente, c.-à-d. que l'hydratation doit être activée. Le rôle de démarreur est joué par le clinker Portland.

-Cendre volante : réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du clinker

- Calcaire : constituant inerte. Intervient physiquement comme plastifiant dans le béton frais [3].

c. Propriétés de ciment

-La finesse

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée totale des grains contenus dans une masse donnée. Cette finesse, mesurée conventionnellement selon la norme NF P 15-442 est exprimée en cm^2/g. Elle varie de 2700 à 3500cm^2/g.

-La masse volumique

La masse volumique des ciments est en général de 800 à 1200 kg/m^3. On compte en moyenne 1100kg/m^3 pour un ciment en vrac non tasse.

-La masse spécifique

Elle varie en général de 2900 à 3200 kg/m^3 soit en moyenne une densité absolue admise.

d. Gravier

Définition

On appelle gravier accumulation des grains de 5 à 70 mm provenant de la destruction naturelle des roches.

-Granularité de gravier

La granularité conditionne la porosité du mélange, si tous les grains ont les mêmes grosseurs, on aurait une porosité maximale, donc pour avoir un mélange de volume des vides minimum il faut une composition granulométrique des grains de différentes dimensions qui doivent se situer dans les limites appelées (fuseaux de spécifications).

Tableau I.4 : refus cumulés sur tamis

Tamis	Limite de refus cumulés(%)
D min	90-100
D max	0-10
1/2(D min+ D max)	40-70
5/4 D max	0

- Nature de gravier

Le gravier provient de roches naturelles ou artificielles, constituées de minéraux. Chaque roche à sa propre composition chimique et minéralogique, sa résistance, son adhérence avec les ciments. L'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment influence la résistance du béton. Les grains de gravier concassé (naturel et artificiel) ont des surfaces rugueuses, donc ces derniers s'adhérent mieux que le gravier naturel au ciment durci dans le béton, en revanche le mélange du béton à base de gravier concassé naturels et artificiels est moins fluide en raison de l'angularité de ces derniers.

-Forme de gravier

Les grains d'un gravier se distinguent par leurs formes: sphérique, cubique allongées. Le coefficient volumique Cv permet de donner une idée précise sur la forme de l'élément considéré. C'est pour un grain, le rapport entre le volume absolu ou volume de la sphère circonscrite à la plus grande dimension de grains. Le coefficient volumique est donné par la relation:

$Cv=V/6d^3$

V: volume absolu de grain de gravier.

D: la plus grande dimension du gravier.

Un coefficient faible correspond à des granulats présentant un certain nombre de "plats" et "d'aiguilles" tandis qu'un coefficient élevé correspondant à des granulats dit "cubique" ou "arrondi". La norme AFNOR P18-301 préconise un :

-**Cv** > 0.15 pour les graviers de 12.5 à 25mm.

-**Cv** > 0.11 pour les cailloux de 25 à 50mm.

La présence d'impuretés dans le gravier influe beaucoup sur la qualité de béton, car les impuretés perturbent l'hydratation de ciment et entrainent des défauts d'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment.

- Absorption d'eau

Les graviers en général est plus ou moins poreux, les graviers absorbent de l'eau de pluie est devient humide, il faut donc prendre en compte cette humidité lors de la détermination de la composition de béton. Si non on a une quantité d'eau de gâchage supplémentaire qui entrainent une diminution de la résistance du béton.

e. Sable

Le sable est une masse meuble de matières minérales, finement granuleuses (0.08 à 5mm), habituellement composées de quartz (silice), et d'une petite proportion de mica, de feldspath, de magnétite et autre minéraux durs. C'est le résultat de l'érosion, dégradation et abrasion, des roches par des processus chimiques et mécaniques. Quand les grains viennent de se former, ils sont habituellement anguleux et très pointus. Par la suite sous l'action du vent et de l'eau, ils s'usent, s'arrondissent et deviennent de plus en plus petits. Le sable est un élément très important dans la constitution des bétons et c'est généralement par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons.

- Classification de sable

❖ Suivant leurs grosseurs: en trois types:

Sable fin → 0.08 à 0.315 mm

Sable moyen → 0.315 à 2.00 mm

Sable gros → 2.00 à 5.00 mm

❖ Suivant leur provenance:

Sable de rivière : absence de grains fins.

Sable dunes : uniformité et prédominance de grains fins.

Sable de plaines ou d'alluvions : absence de gros grains.

Sable résidus de concassage : prédominance de gros grains et présence de farines ou fines ou fillers.

Sable de mer.

- Rôle de sable dans le béton

Dans le béton le sable occupe presque ¼ de son volume par conséquent la qualité du sable influence considérablement sur la qualité du béton. Il remplit avec le ciment et l'eau tous les vides entre les grains de gravier, décidant ainsi la structure compacte du béton, d'autre part de son cout de revient; puisqu'il est toujours moins cher que le ciment.

- Caractéristiques de sable utilisé dans le béton

La propreté des sables se déterminent par différents méthodes parmi elles la méthode de l'équivalent de sable (ES). L'emploi d'un sable souillé conduit à une baisse de la résistance et une augmentation de retrait dans le béton. La dureté des grains et enfin un facteur important pour l'obtention d'un béton convenable. Les sable siliceux sont les meilleurs, les sables calcaires au contraire sont rarement assez durs pour assurer au béton une bonne résistance. Notons que les sables peuvent contenir une quantité d'eau importante jusqu'à 2001 et plus par 1 m^3, pour cela lors de détermination du dosage en eau, il faut tenir compte de cette teneur en eau du sable, ou bien il faut sécher le sable en utilisant l'étuve ou bien naturellement [3].

f. Eau de gâchage

L'eau de gâchage et la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton. Cette eau joue un grand rôle de lubrifier les mélanges de béton. Elle est soumise à certaines exigences est à même fait l'objet d'une norme (NF18-303).

On conçoit donc, en premier lieu, que les impuretés nocives interdites pour les granulats ne doivent pas être apportées par l'eau de gâchage.

- Caractéristiques physiques

L'eau de gâchage des bétons doit être propre, ne pas contenir de matières en suspension au- delà de certaines valeurs permises. Les tolérances réglementaires sont les suivant:

- 2g/l pour le béton type A et type B.
- 5g/l pour le béton type C.

Les matières en suspension n'ont pas la même nocivité.

- Béton type A : béton de haute qualité à résistance élevée.
- Béton type B : béton à faible perméabilité.
- Béton type C : béton à faible résistance peu au non armé.

- Caractéristiques chimiques

L'eau de gâchage des bétons ne doit pas contenir de sels dissous au-delà de :

- ❖ 15g/l pour les bétons type A et type B.
- ❖ 30g/l pour le béton type C.

L'eau de mer est admise pour le gâchage des bétons du type C, sauf certaines prescriptions spéciales. Toutes eau douteuse doit être analysée chimiquement au laboratoire spécialisé.

I.1.4. Propriétés du béton

L'importance du matériau de béton nous oblige à étudier ses propriétés soit savoir, l'état frais et à l'état durci.

A. L'état frais

- ❖ **Maniabilité (ouvrabilité)**

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage. Pour étudier la maniabilité, il faut étudier la fluidité.

- ❖ **Fluidité**

La fluidité est évaluée per la capacité du béton de couler sous l'action de son poids propre ou d'une vibration. Il existe plusieurs essais et tests divers permettant de mesurer certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité.

- Affaissement ou cône d'Abrams « Slump-test » EN 18-451,
- Etalement à la table à secousses « Flow-test » EN 12-358,
- Essai vébé « essai de consistance » NF 12350-3.

- ❖ **Ressuage**

C'est la remontée éventuelle d'eau à la surface d'un béton avant prise. Cette remontée et liée au tassement sous l'effet de leur poids des éléments solides (ciment et granulats) qui composent le matériau.

- ❖ **Ségrégation**

La ségrégation du béton se traduit par une séparation des gros granulats et de la pâte cimentaire et par un mouvement relatif des grains entre eux. Les gros granulats ont tendance à aller vers le bas sous l'effet de leur propre poids et les plus petits à monter. Il en résulte une hétérogénéité du volume de béton.

B. L'état durci

❖ **Fluage et retrait**

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton induit une contraction due à la forte absorption de ces granulats. Certaines études montrent que, pour le béton à base de granulat recyclé à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ de 0,55 à 0,8 mm/m, alors que la valeur pour un béton à base de granulat naturel est seulement d'environ 0,30 mm/m [4]. Cependant, les résultats des tests pour le fluage en conditions normales de laboratoire ne sont pas si évident, si certaines études ont montré la tendance à s'inverser, c'est à dire le fluage après 1 an est d'environ 20% inférieure à celle du béton avec béton à base de granulat naturel [5]. Bien que davantage de travaux de recherche soient nécessaires dans le domaine, il semble que le comportement global du béton à base de granulat recyclé et béton à base de granulat naturel peut être comparable lors de l'affichage de l'effet combiné du retrait et du fluage.

❖ **Porosité**

Des essais de porosité par injection de mercure montrent tout d'abord un volume important des gros pores dans les bétons de granulat recyclé. La porosité des bétons de granulat recyclé est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des bétons de granulat recyclé est liée à une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des bétons de granulat recyclé. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [4].

❖ **Perméabilité**

Lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats recyclés ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels [6].

❖ **Durabilité**

Un béton durable est un béton capable de résister à un degré satisfait aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration. Il conserve sa forme originale et sa qualité quand il est exposé à son environnement.

❖ **Carbonatation**

La Carbonatation du béton due à l'action de l'acide carbonique CO_2 qui se trouve dans l'atmosphère (en faible quantité environ 0.5%) sur la chaux libérée par l'hydratation des carbonates de calcium $CaCO_3$:

$$\mathbf{Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O}$$

I.1.5. Différents types de béton

- Béton auto plaçant (BAP)
- Bétons de hautes performances (BHP)
- Béton de fibres

- Béton compacté au rouleau (BCR)
- Béton préfabriqué
- Bétons à durcissement rapide
- Béton de terre
- Béton léger
- Béton lourd
- Béton de poudre réactive (BPR)
- Béton ordinaire.

I.2 : Granulats naturels, recyclés et valorisation

I .2.1. Généralités sur les granulats utilisés dans le béton

a. Introduction

La construction de l'habitat et l'aménagement de l'environnement font appel à trois grands secteurs d'activités, qui sont les industries de carrière et matériaux de construction, le bâtiment et les travaux publics. Tous les travaux liés à ces secteurs d'activités utilisent des matières premières naturelles en tant que morceaux de roches ou alluvionnaires (sous forme de sables et graviers), soient obtenues artificiellement par traitement de roches naturelles ou des déchets industriels et parfois l'utilisation des déchets inertes. Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production. Elles sont destinées à être mises en œuvre sans aucun apport de liant pour les solidariser (ballast des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais…) soient agglomérées à l'aide d'un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés) [7].

b. Définition des granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes : (fillers, sablons, sable, graves, gravillons, ballast, enrochements). Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. Les granulats peuvent être :

- **Naturel :** d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel :** d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant de transformation thermique ou autre.

- Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments [8].

c. Granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives. Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens.

-Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en ces deux catégories (granulats roulés et granulats de carrières).

-Les granulats de roche meuble

Dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico calcaires.

Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

- Les granulats de roche massive

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage [8].

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

d. Granulats artificiels

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques.

-Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

-Granulats à hautes caractéristiques

Il s'agit de granulats élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux) ou granulats réfractaire.

e. Granulats recyclés

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

-Les déchets de chantier Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [9]. Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé. La figure (II.1) présente les différentes catégories de déchets de chantiers et domaine d'application [10].

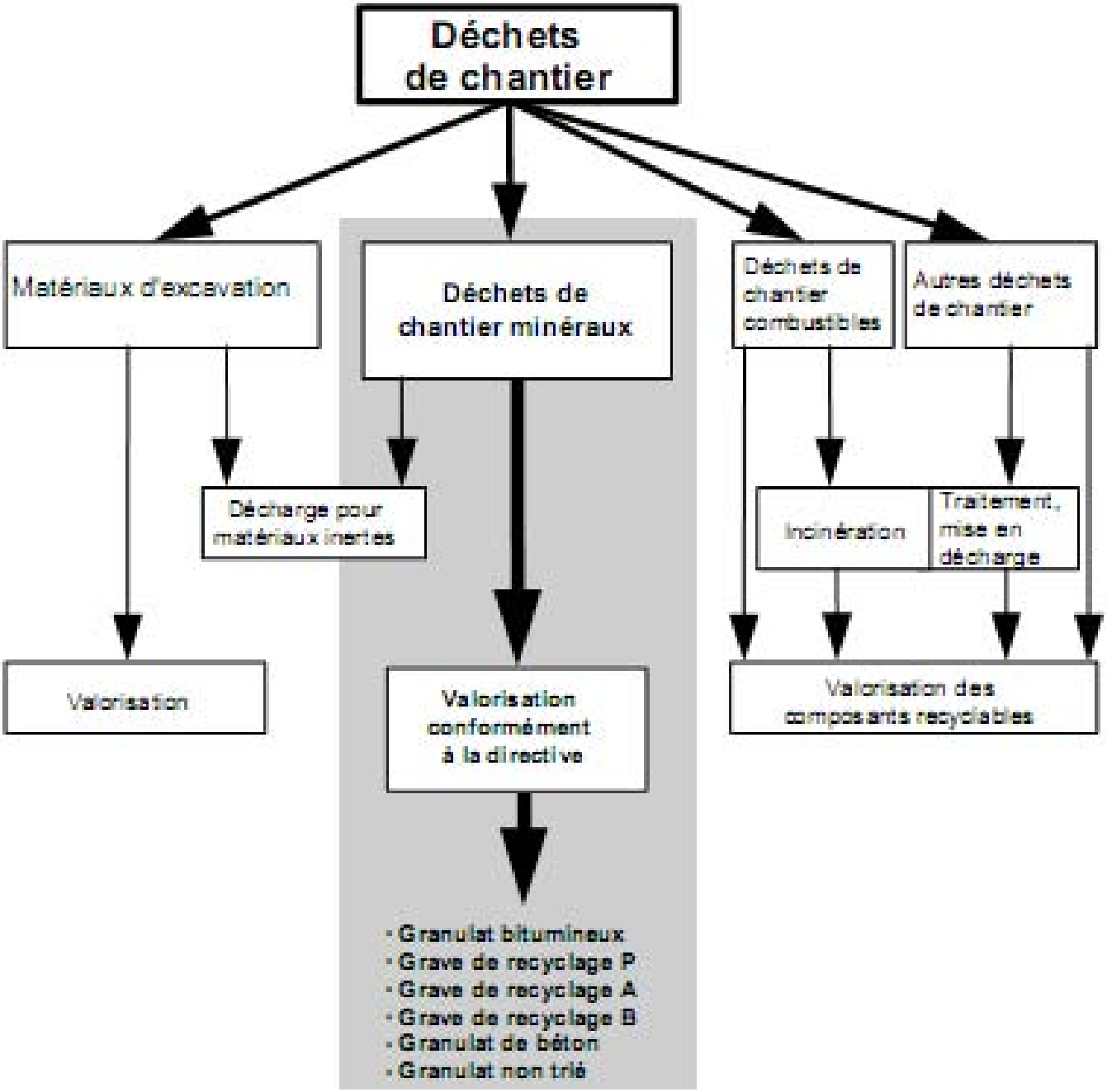


Figure I.1: Les différentes catégories de déchets de chantier.

- Les déchets de démolition

Les déchets de démolition sont une sous-catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton [11].

I.2.2. Recyclage

a. Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- Recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de pair avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50% de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.
Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

b. Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

c. Le stockage

La conservation des granulats recyclés après traitement se fait dans des aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos [7], selon des critères bien précis et qui sont fonction de la provenance des granulats, de la forme des grains, de la nature des opérations de traitement et de la granulométrie. Il est conseillé de stocker les différents types de granulats séparément l'un de l'autre, et de ne pas conserver les sables recyclés pendant longtemps.

I.2.3. Composition et propriétés physiques des granulats recyclés de béton

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition voir la figure (II.2). En effet, le granulat recyclé de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont [12] :

- des granulats naturels roulés partiellement
- de la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.



Figure I.2: Compositions des granulats recyclés de béton

Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différente. En effet, le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial appelé béton parent dans la littérature. Les propriétés de la pâte de ciment sont à l'origine des éventuelles mauvaises propriétés des granulats recyclés constatées. En effet, les propriétés physiques de granulat recyclé dépendent de la quantité et la qualité de pâte de ciment présente sur les granulats concassés. Des études montrent que la densité de ces granulats recyclés est plus faible ou encore que leur capacité d'absorption est plus élevée [12]. De plus, leurs propriétés mécaniques s'avèrent être moins bonnes que celles des granulats naturels. La qualité de la pâte de ciment du béton parent est primordiale dans la définition des propriétés des granulats recyclés

selon les auteurs. La lecture bibliographique a permis d'établir un tableau comparatif entre les propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés et celles exigées dans les normes européennes pour les granulats naturels dans la fabrication de bétons hydrauliques. L'analyse de ces résultats présentés nous permet de conclure que :

- La masse volumique des granulats recyclés semble plus faible que celle des granulats naturels,
- L'absorption d'eau est importante pour les granulats recyclés.

En effet, l'ensemble des études montre que les granulats recyclés de béton sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau. De plus, il semble que la partie plus fine des granulats recyclés absorbe une quantité d'eau plus élevée que les éléments plus grossiers.

- Le coefficient Los Angeles est élevé comparé à celui exigé par la norme XP P 18-540.

Cette tendance est confirmée par les travaux de Sanchez de Juan & Gutierrez qui expliquent que cette valeur élevée du coefficient Los Angeles est due à la quantité de pâte de ciment présent autour des granulats naturels concassés. D'une manière générale, les auteurs s'accordent à dire que la qualité des granulats recyclés semble être inférieure à celle des granulats naturels. Il est donc essentiel de contrôler la quantité et la qualité de la pâte de ciment présent sur les granulats d'origine afin de comprendre leur influence sur les propriétés des granulats recyclés et, par conséquent, les propriétés des bétons de granulats recyclés de béton. Il convient donc de définir les essais et analyses pertinents afin de caractériser les propriétés des granulats recyclés de béton. Cela induit également la nécessité de connaître les propriétés physiques et mécaniques du béton parent.

I.2.4 Les caractéristiques de fabrication

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats (roulés ou concassés, teintes, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton (critère de maniabilité, enrobage).

I.2.5 Caractéristiques géométriques

a) Classe granulaire

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d : dimension inférieure et D dimension supérieure). L'intervalle d/D est appelé classe granulaire. Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm) [14].

Série de tamis utilisés : Fond 0,125/0,25/0,5/1/2 / 4 / 8 / 16 / 31,5 /63

b) Granularité

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant. Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains) comme montre la figure (II.3).

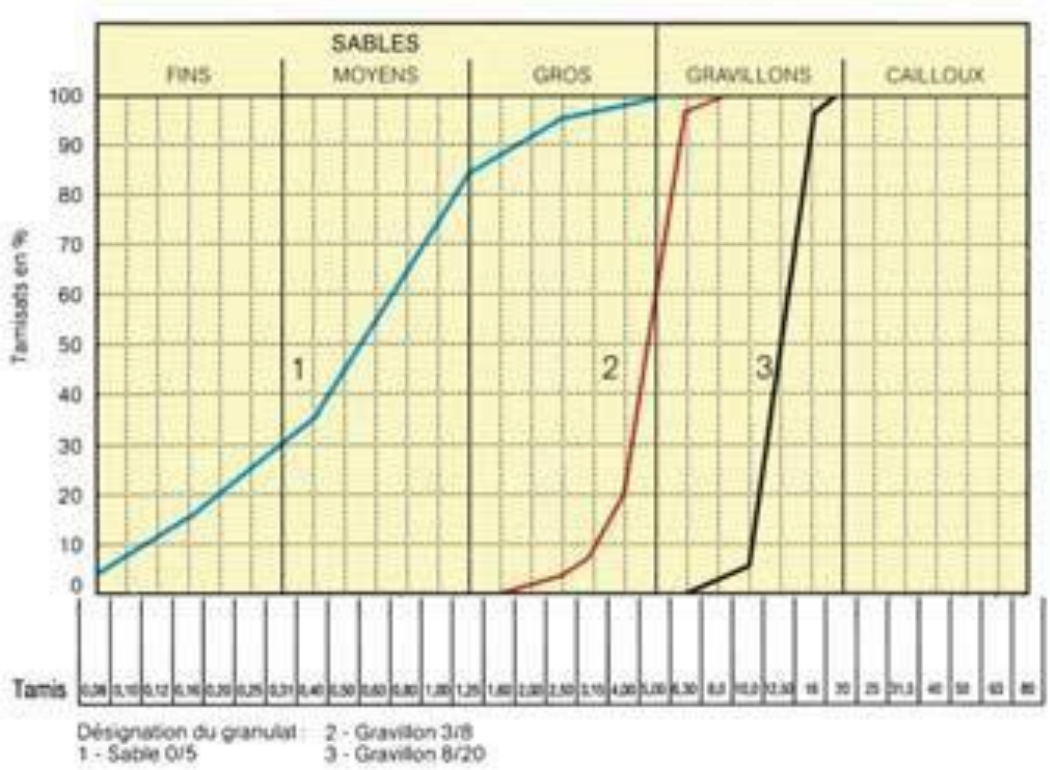


Figure I.3 : courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons.

c)La forme et Coefficient d'aplatissement

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation [14].

d) Module de finesse

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granulâtes égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis. Le module de

finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

I.2.6 Caractéristiques physiques

On peut les classer en deux groupes [12], celles qui concernent le granulat lui-même, et celles qui concernent la teneur en substances étrangères et nocives.

a)La Masse Volumique

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.

a.1) 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.

a.2) La Masse Volumique Absolue

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,

b) La porosité (p)

C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon les normes "NF P18 554, EN1097-3". 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 [13].

c) 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

d) Taux d'absorption d'eau (AB%)

L'absorption d'eau par définition est le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Elle est déterminée selon les normes standards "NF P 18-554, 18-555, EN 1097-3, EN 1097-6".

e) Propreté des granulats

La qualité des granulats utilisés dans les bétons est un facteur très important. Trois grandes catégories d'impuretés peuvent être rencontrées dans les granulats: matières organiques, les argiles et les matériaux fins (issues du concassage ou du broyage des roches). Leurs présence à la surface des granulats interférant

avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence granulats-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés [15].

f) Les sables

On mesure l'importance des pollutions argileuses dans les sables par l'essai d'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène [16].

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique multiplié par 100 entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins. Il existe deux types de mesures : l'essai visuel et l'essai au piston Actuellement, trois textes réglementaires décrivent cet essai:

- Equivalent de sable (NFP 18-598)
- Equivalent de sable à 10% de fines (NFP 18-597)
- Evaluation des fines - équivalent de sable (EN 933-8)

Les essais d'équivalent de sable permettent la détermination du pourcentage des éléments très fins du sable (aspect quantitatif) sans aucune distinction de nature "argile, limon, vase et matières solubles" (aspect qualitatif), et pour évaluer de façon plus sélective la propreté des sables, de compléter l'essai d'équivalent de sable par l'essai au bleu de méthylène

I.2.7. Caractéristiques chimiques

a)Teneur en ions chlorures

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

b) Réactivités aux alcalis

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali- réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimisme (PRP) [14].

c)Teneur en soufre et en sulfates

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (SO) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %. Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la

teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

I.2.8. Caractéristiques mécaniques

a) Résistance des granulats

La résistance des granulats est obtenue par des essais indirects, des essais de résistance au choc et à l'usure. En général, la résistance et l'élasticité des granulats dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure.

b) Résistance à la fragmentation

Essai los Angeles (LA)

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs des boulets et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. La valeur du coefficient Los-Angeles doit être ≤ 40 pour les granulats naturels type B et C suivant les normes "NF P18 573, EN 1097-2 § 5" et compris entre 30 (catégorie A) et 50 (catégorie D) selon les normes XP P 18 540 et ASTM C-33 pour les granulats recyclés. La variation du coefficient Los-Angles des granulats recyc1és est en fonction de la résistance du béton d'origine, la quantité de la pâte cimentaire rattachée aux granulats et la qualité d'origine des granulats ainsi que la méthode de préparation des granulats et la puissance employée

I.2.9. Les propriétés physiques

a. Influence de l'interface pâte de ciment- granulat

Les bétons recyclés présentent deux zones de transition inter faciales : l'une constituée dans le granulat recyclé (liaison granulat-pâte ancienne) et l'autre nouvellement crée entre le granulat recyclé (y compris le mortier ancien) et la pâte cimentaire nouvelle. Ces zones doivent être prises en considération lors de l'étude de la perméabilité et la résistance du béton.

b. Influence de l'ancien mortier colle au granulat de béton recyclé

Une des tares du granulat issu de la démolition, est l'ancien mortier collé au granulat et qui ne peut être éliminé facilement. Sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulat-pâte de ciment et ainsi que de la puissance de concassage lors de la fabrication des recyclés. Cette quantité de mortier attaché aux granulats recyclés porte atteinte à la résistance du béton à long terme. Il a été démontré que si le rapport E/C du béton d'origine est faible, l'effet de la pâte cimentaire n'influe pas beaucoup la résistance à long terme. Néanmoins, la quantité du mortier attaché aux granulats recyclés influe sur la résistance à la flexion et l'énergie de rupture, elles diminuent avec l'augmentation de la quantité du mortier.

c. Influence de la forme et la texture de surface des granulats

La forme et la texture des granulats influencent considérablement la résistance des bétons. Celle-ci dépend en grande partie des propriétés du gros granulat. Elle est plus faible lorsque les granulats présentent une surface lisse contrairement à ce que l'on obtient avec des granulats concassés, de forme angulaire et de surface rugueuse. La résistance à la compression des bétons à base des granulats lisse est 10 % inférieure à celle des bétons à base des granulats rugueux [17]. L'influence du type de gros granulats sur la résistance du béton est fonction du rapport E/C. Cette influence des granulats sur la résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C comme le montre la figure (II.4).

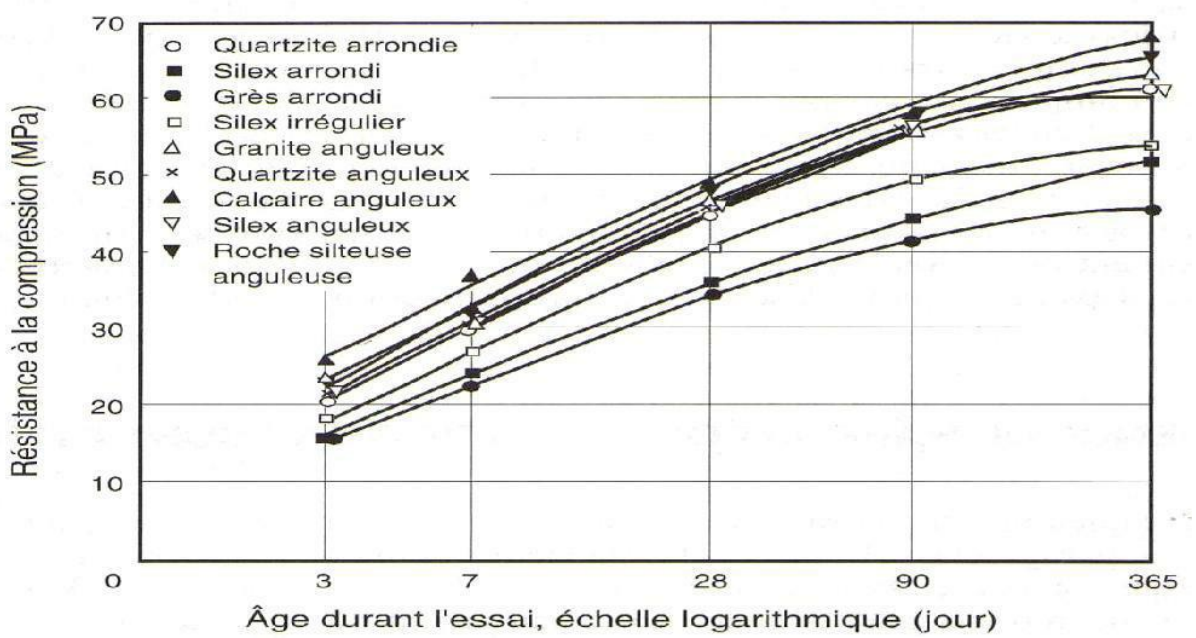


Figure I.4: Relation entre la résistance à la compression et l'âge de Bétons confectionnés avec différents granulats (E/C=0,50) [11].

L'influence des granulats sur la résistance à la flexion dépend également de l'état d'humidité du béton au moment de l'essai.

I.2.10 Les propriétés mécaniques

a. Résistance à la compression

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats. D'après certains auteurs, les bétons fabriqués avec des granulats recyclés obtiennent de bonnes résistances mécaniques et peuvent atteindre des résistances à la compression équivalentes à celles d'un béton conventionnel. La résistance à la compression des bétons à base de granulats de recyclage est influencée directement par la résistance des granulats utilisés. Celle-ci dépend à son tour de la densité brute des granulats. Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à

celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons des granulats recyclés est généralement moindre. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulat naturel, affecte davantage cette dureté donc sa qualification [13]. Néanmoins, la résistance du béton ne soit pas seulement due à la résistance mécanique des granulats, mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison. Avec des moyens techniques spécifiques lors de la préparation du béton, une teneur en ciment accrue (d'environ 10%) et un rapport E/C réduit, des bétons de résistance comparable à celle du béton de granulats naturels peuvent être atteints. Un béton préparé avec 50% de granulats recyclés humides et E/C = 0,55 donne la même résistante en compression qu'un béton conventionnel.

b. Influence des granulats sur le rapport E/C

Il est connu que les bétons conçus avec des granulats concassés génèrent une surface spécifique plus développée et demandent plus d'eau que les granulats roulés ce qui affecte la résistance. Pour des rapports E/C< 0,4, la résistance à la compression est majorée de 38%, lorsque le béton est fabriqué avec des granulats concassés que ceux roulés et pour des rapports E/C = 0,65, la résistance ne varie pas. La rétention d'eau par les granulats recyclés conduit à réaliser les bétons recyclés avec des rapports E/C supérieurs à ceux des bétons conventionnels (B.O). On propose une relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression en fonction du pourcentage des granulats recyclés utilisés. La figure (II.5) montre qu'un béton composé de 100 % de granulats recyclés avec un rapport E/C plus faible que celui d'un béton conventionnel (B.O), donne une résistance à la compression plus élevée que celle relevée avec un béton conventionnel. Tandis que pour un rapport E/C égale, la résistance à la compression du béton avec 100 % de granulats recyclés est faible que celle du béton conventionnel.

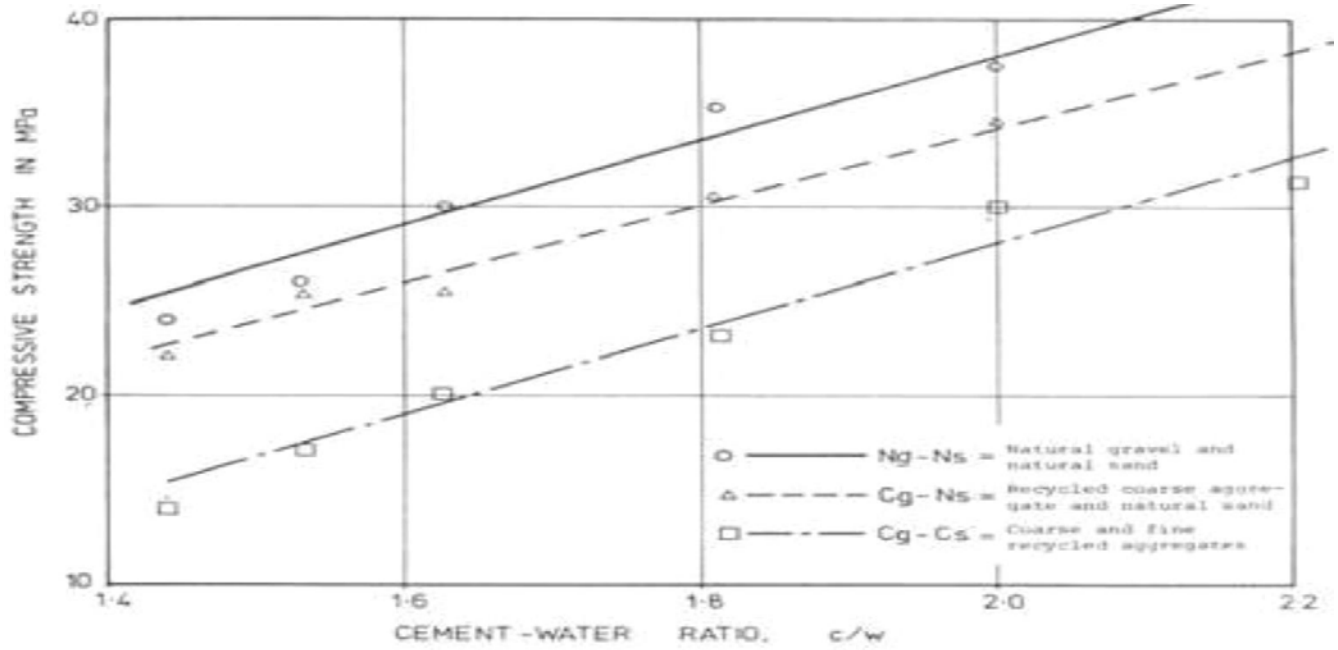


Figure I.5: Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression

I.2.11. Module d'élasticité (E) Le module d'élasticité est l'une des propriétés les plus touchées de bétons recyclés, même à des taux de substitution faibles en granulats recyclés. Le module d'élasticité du béton recyclé a été signalé comme étant de l'ordre de 50-70% par rapport à celui du béton ordinaire, comme l'ont rapporté certains auteurs. Ceux-ci ont constaté qu'avec des niveaux de remplacement en granulats recyclés de 20, 50 et 100% dans des bétons, les valeurs moyennes du module d'élasticité sont de 10, 20 et 40% respectivement inférieures à celles enregistrées pour un béton conventionnel comme l'illustre la figure (II.6). Sur la même figure, on remarque que la perte de rigidité pour les bétons recyclés s'accentue d'avantage avec l'accroissement du rapport E/C. Une certaine corrélation se dégage entre les modules élastiques statiques du béton conventionnel et du béton recyclé lorsque la substitution en recyclés est partielle (20 et 50%) et elle devient médiocre lorsque le taux de remplacement est à 100% et ceci est bien représenté sur la figure (II.7).

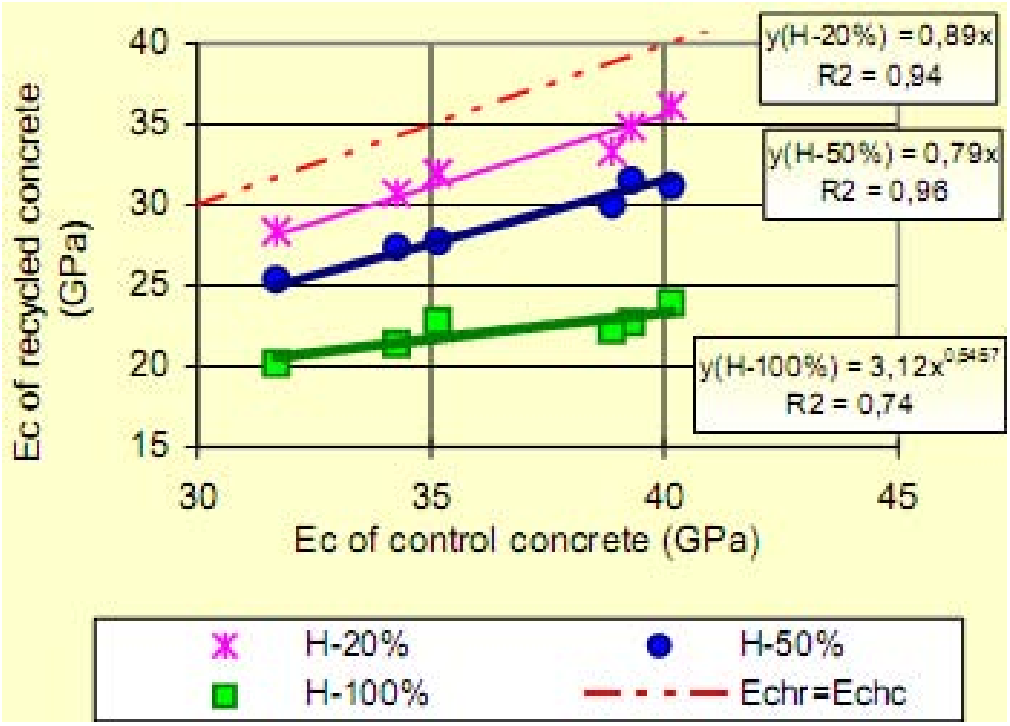


Figure I.6: Evolution du module élastique en fonction du taux de Substitution en recyclés et le rapport



Figure I.7: Relation entre les modules élastiques des bétons recyclés et Conventionnels à différent

Chapitre II : Caractéristiques des matériaux utilisés et formulation des bétons

A travers ce chapitre, nous présentons les matériaux utilisés dans l'étude et les techniques expérimentales pour caractériser ces matériaux afin que la formulation des bétons soit réalisée.

II.0. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents matériaux utilisés dans notre étude, leurs caractéristiques, la présentation des calculs sur formulation du béton , la description de différents modes opératoires et les essais destructifs.

II.1 Matériaux utilisés

Nous avons utilisé des matériaux locaux provenant de la rivière KANYOSHA pour le cas de sable et de gravier roulé naturel. Leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil de la FSI. D'autres travaux dans le cadre de ce projet ont fait l'objet d'essais réalisés par nos soins au laboratoire.

II.2 Caractérisation des matériaux

a. Gravier naturel roulé (GNR)

Le gravier utilisé pour la confection du béton est le gravier de la rivière KANYOSHA.

a.1 Analyse granulométrique par tamisage [DIN 4187]

- **Principe de l'essai**

L´essai consiste à fractionner au moyen d´une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l´échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau (II.1) ou graphique (Figure II.1).

- **Domain d'application**

La présente norme s´applique aux granulats d´origine naturelle ou artificielle, utilises dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

- **Préparation de l´échantillon pour l´essai**

L´échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (DIN 4187). La masse M de l´échantillon pour cet essai doit être supérieure à 0,2 D=0,2 x 31,5=6,3kg, avec M exprimé en

kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres [5]. L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil, ensuite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 3 fois durant 7 minutes à chaque fois. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau II -1- L'analyse granulométrique de gravier roulé naturel.

Masse total sèche = 7 Kg

Module	TAMIS (mm)	REFUS (Kg)	REFUS Cumul (Kg)	% R. Cumul	Passant %
46	31,5	0	0	0	100%
43	16	5,18	5,18	74,0%	26,0%
40	8	1,48	6,66	95,2%	4,8%
37	4	0,34	7	100%	0,0%

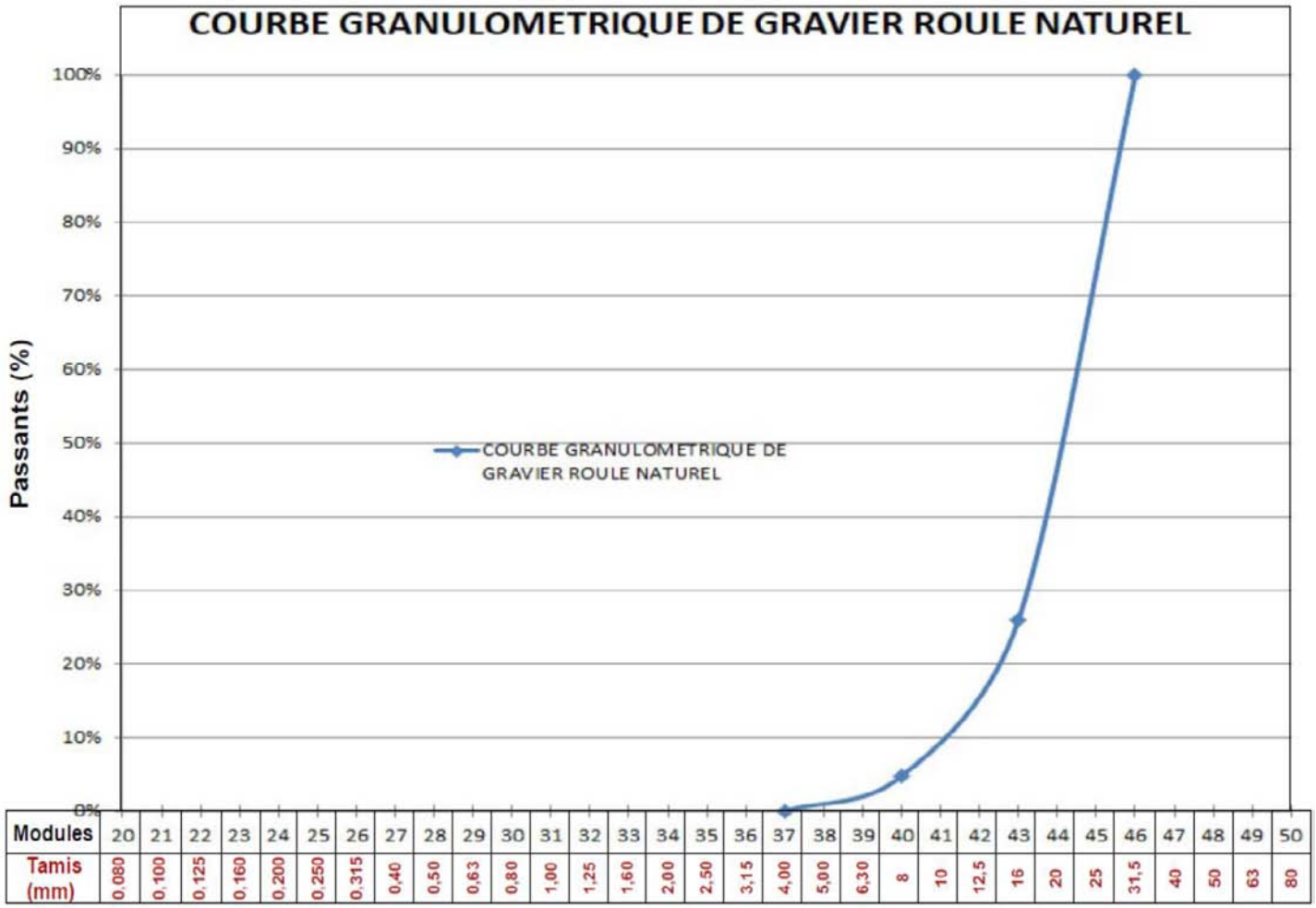


Figure II.1: Courbe granulométrique de gravier roulé naturel

a.2. La densité

En sens physique ; c'est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température Elle est exprimée sans unité**.**

a.3. Masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps. La masse volumique diffère de la densité étant donné que la densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité [5]. Les masses volumiques ont été déterminées selon la norme Française P-18-554 (1979) et les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux (III.2 et III.3).

- **La masse volumique apparente (γ_{app})**

$$\gamma_{app} = (M2 - M1)/V$$

M1 : masse du récipient vide.

M2 : masse du récipient et gravier (variable selon les trois essais).

V **:** Volume de récipient

Tableau II.2 La masse volumique apparente (γ_{app})

Désignation d'essai	M1 (g)	V (cm^3)	M2 (g)	γ_{app} (g/cm^3)	$\gamma_{app\ moyen}$ (g/cm^3)
Essai 1	7 200	1 570	10 150	1,879	1,911
Essai 2			10 240	1,936	
Essai 3			10 211	1,918	

L'essai a été fait trois fois juste pour avoir la précision plus ou moins exacte de la masse volumique apparente moyenne, c'est à remarquer que les masses (M2) de même capacité ne peuvent pas être égales suite au foisonnement interne des matériaux (le fait que le remplissage de vide par de graviers naturels varie à chaque essai, par conséquent les grosseurs ne sont pas identiques).

- **La masse volumique absolue ou spécifique (ρ_{abs})**

$$\rho_{abs} = M/(V2-V1)$$

Masse échantillon= 0,68 kg= 680 g

V1 (niveau sable)= 1200 ml

V2 (niveau d'eau) variable selon les trois essais

Tableau II.3 La masse absolue ou spécifique (ρ_{abs})

Désignation d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	$\rho_{abs\ moy}$(g/ml)
Essai 1	680	1 200	1 445	2,776	2,833
Essai 2			1 435	2,894	
Essai 3			1 440	2,83	

L'essai a été fait trois fois pour avoir la précision plus ou moins exacte de la masse volumique absolue moyenne, c'est à remarquer que les volumes (V2) de même masse ne peuvent pas être égaux suite au vide occupé par un grain de gravier à l'autre (le fait que le remplissage de vide par l'eau varie à chaque essai).

a.4 La compacité, porosité et indice des vides

La compacité, porosité et indice des vides ont été déterminés selon la norme Française P-18-554 (1979) et les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (III.4).

La porosité est calculée selon la formule:

P (%) = [1 – (ρ app/ ρabs)] x 100 $= \lfloor 1 - (1,911/2,833) \rfloor \times 100 = 32,5\%$

La compacité donnée la formule :

C(%) = 1 – P =1-0,325= 67,5%

L'indice des vides est donne par la formule :

$$\mathbf{e\ (\%) = \lfloor P/(100 - P) \rfloor = \lfloor 32,5/(100 - 32,5) \rfloor = 0,481\%}$$

Tableau II -4 Porosité, compacité et indice des vides

Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e (%)
32,5	**67,5**	**0,481**

a.5. Degré d'absorption d'eau

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

W (%) = [(Mh - MS)/MS].100

M_h : La masse du matériau sature d'eau en (g).
M_S : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau (III.5) suivant :

Masse gravier sec M_S : 0,760 kg

Masse gravier mouillé M_h : 0,761 kg

W(%)= **[(0,761 – 0,76)/0,76].100=0,13 %**

Tableau II -5 Degré d'absorption d'eau des agrégats (w%)

M_h (Kg)	M_S (Kg)	W(%)
0,761	0,760	0,13

D'où la rétention d'eau pour le gravier naturel est Presque nulle. Comme il sera à constater les étapes parcourues au laboratoire, de la pèse à l'étuvé, montrant la figure II.2 ci-dessous.



La masse de gravier roulé naturel saturé

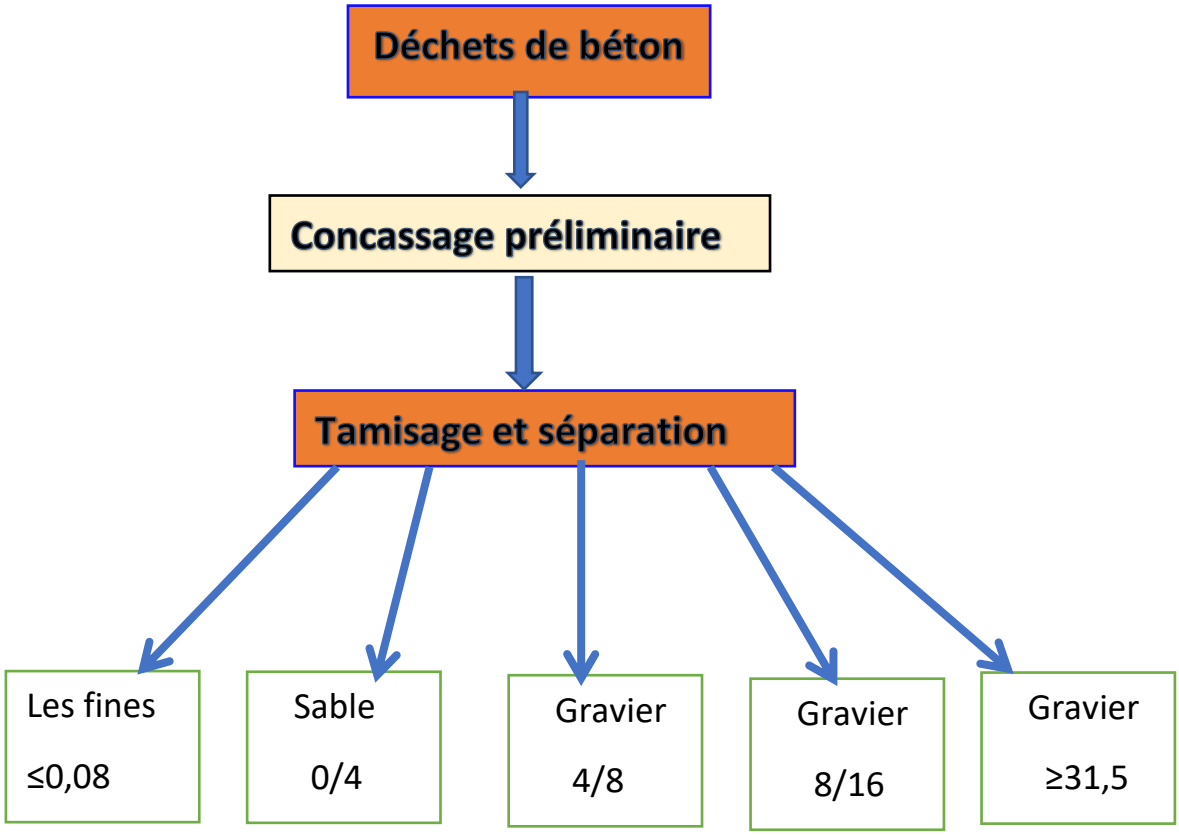


gravier roulé naturel dans l'étuve

Figure II.2: Détermination du degré d'absorption d'eau

b. Gravier roulé recyclé (GRR)

Ce gravier est obtenu par le concassage des éprouvettes déjà fabriquées au laboratoire, cependant dans notre cas le concassage s'est fait à marteau masse manuellement au chantier sur place où se trouvait les débris, jusqu'à l'analyse granulométrique au laboratoire à voir figure (II.3).C'est un béton local.



Le schéma qui montre les étapes de traitement du gravier recyclé :

-Déchets de béton : obtenus à partir de la démolition (débris)

-Concassage préliminaire : fait par marteau masse afin de séparer le béton collé sur les faces du gravier

-Tamisa et séparation : Comprend l'analyse granulométrique du gravier recyclé.



Figure II.3 : photos d'Analyse granulométrique de granulats roulés recyclés

b.1 Analyse granulométrique par tamisage [DIN 4187]

Les données sont représentées dans le tableau (III.6) et figure (III.4)

Tableau II .6 L'analyse granulométrique de gravier roulé recyclé

Masse total sèche = 9,52 Kg

Module	TAMIS (mm)	REFUS (Kg)	REFUS Cumulé (Kg)	% R. Cumulé	Passant %
46	31,5	0	0	0	100%
43	16	9,02	9,02	94,7%	5,3%
40	8	0,44	9,46	99,4%	0,6%
37	4	0,06	9,52	100%	0,0%

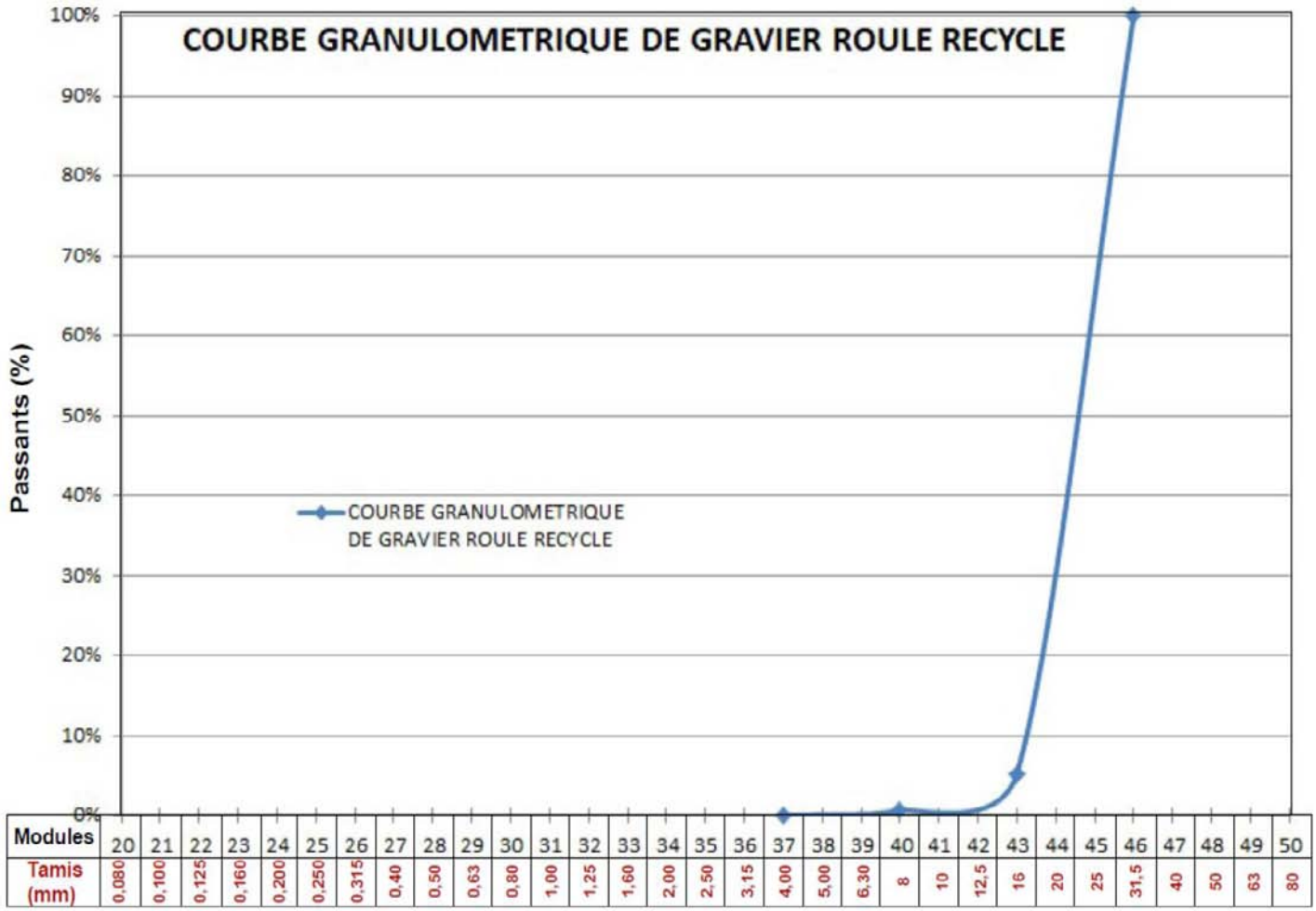


Figure II.4: Courbe granulométrique de gravier roulé recyclé

b.2. La densité :

En sens physique ; c'est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température Elle est exprimée sans unité**.**

b.3. Masse volumique

Les masses volumiques ont été déterminées selon la norme Française P-18-554 (1979) et les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux (III.7 et III.8).

- **La masse volumique apparente (γ_{app})**

$$\gamma_{app} = (M2 - M1)/V$$

M1 : masse du récipient vide.

M2 : masse du récipient et gravier (variable selon les trois essais).

V **:** Volume de récipient

Tableau II.7 La masse volumique apparente (γ_{app})

Désignation d'essai	M1 (g)	V (cm^3)	M2 (g)	γ_{app} (g/cm^3)	$\gamma_{app\ moyen}$(g/cm^3)
Essai 1	7 200	1 570	9 875	1,704	1,707
Essai 2			9 880	1,707	
Essai 3			9 885	1,71	

L'essai a été fait trois fois juste pour avoir la précision plus ou moins exacte de la masse volumique apparente moyenne, c'est à remarquer que les masses (M2) de même capacité ne peuvent pas être égales suite au foisonnement interne des matériaux (le fait que le remplissage de vide par de graviers recyclés varie à chaque essai, par conséquent les grosseurs ne sont pas identiques).

- **La masse volumique absolue ou spécifique (ρ_{abs}) :**

$$\rho_{abs} = M/(V2-V1)$$

Masse échantillon= 0,68 kg= 680 g

V1 (niveau sable)= 1200 ml

V2 (niveau d'eau) variable selon les trois essais

Tableau II.8 La masse absolue ou spécifique (ρ_{abs})

Désignation d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	$\rho_{abs\ moy}$(g/ml)
Essai 1	550	1 200	1 390	2,895	2,85
Essai 2			1 395	2,821	
Essai 3			1 394	2,835	

L'essai a été fait à trois fois pour avoir la précision plus ou moins exacte de la masse volumique absolue moyenne, c'est à remarquer que les volumes (V2) de même masse ne peuvent pas être égaux suite au vide occupé par un grain de gravier à l'autre (le fait que le remplissage de vide par l'eau varie à chaque essai).

b.4. La compacité, porosité et indice des vides

Le mode opératoire est le même que celui du gravier roulé naturel, Les résultats sont donnés dans le tableau III.9. La porosité est déterminée par la relation suivante :

$$\mathbf{P\ (\%) = [1 - (\rho\ app/\ \rho abs)]\ x\ 100 = \lfloor 1 - (1,707/2,8497) \rfloor \times 100 = 40,1\%}$$

La compacité donnée la formule :

C(%) = 1 – P =1-0,401= 59,9%

L'indice des vides est donne par la formule :

$$\mathbf{e\ (\%) = \lfloor P/(100 - P) \rfloor = \lfloor 40,1/(100 - 40,1) \rfloor = 0,669\%}$$

Tableau II -9 Porosité, compacité et indice des vides

Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e (%)
40,1	59,9	0,669

b.5. Degré d'absorption d'eau

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$\mathbf{W\ (\%) = [(M_h - M_S)/M_S].100}$$

M_h : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S **:** La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau (III.10) suivant :

Masse gravier sec M_S : 0,88 kg
Masse gravier mouillé M_h : 0,89 kg

$$W(\%)= [(0,89 – 0,88)/0,88].100=1,13\ \%$$

Tableau II.10 Degré d'absorption d'eau des agrégats (w%)

M_h (Kg)	M_S (Kg)	W(%)
0,89	0,88	1,13

Ceci fait à ce que le degré d'absorption soit égal à 0,01kg car le gravier recyclé contient de particules absorbées en béton sur la face de chaque grain de gravier pouvant absorber d'eau jusqu'à l'état de saturation, c'est pourquoi nous avons pu déterminer le degré d'absorption dans le but de maitriser la teneur en eau optimale utile au mélange du béton.

- 0,89 kg -0,88kg= 0,01 kg d'eau absorbée, soit W=**1,13%** par rapport à la masse sèche de gravier recyclé. Les étapes de la pèse à l'étuve (figure II.5).



Masse du gravier roulé recyclé sature



Gravier roulé recyclé sature dans l'étuve

Figure II.5 : photos d'Analyse granulométrique de granulats roulés recyclés

b.6. Essai Los Angeles

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles , et sur le principe de l'effritement par abrasion.
La machine utilisée comporte un cylindre creux pouvant tourner de son axe et où on introduit l'échantillon ainsi que des boulets d'acier jouant le rôle de charges abrasives.

❖ **Principe de l'essai**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, en évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1,6 mm Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6,3) ou (6,3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31,5) ou (25/50) [4]. Le cas étudié est celui de D/31,5.On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe.

c. Caractéristique du sable naturel

c.1 Analyse granulométrique par tamisage [DIN 4187]

L'essai de l'analyse granulométrique a pour but la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs de différentes classes de grains constituants l'échantillon. Les résultats de l'analyse granulométrique effectué sur le sable sont donnés dans le tableau (II.11) ; figure (II.6) et (II.7).

❖ **Mode opératoire**

- Prélever une masse **de 3,61 kg** de matériau (sable de la rivière Kanyosha)
- Peser chaque tamis à vide, soit mi la masse du tamis
-Constituer une colonne de tamis propres et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimée en mm) [4 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,125 ; 0,08, fond]
- On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.
- A la fin de tamisage, peser les refus en matière retenue par chaque tamis. Soit Mi, la masse du tamis (i) + sable.
- On calcule la différence entre Mi et mi (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R1de tamis 1)
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à R1, Soit R2 la masse du refus m du tamis 2(R2= R1 + refus partiel sur tamis 2).

- Poursuivre la même opération avec la rente des tamis pour obtenir les masses de différents refus cumulés

R3, R4,….Rn le tamisât est calculé par relation :

T=100-Rc

Rc : refus cumulés en (%)

T : tamisât en(%)

Tableau II .11 : résultat d'analyse granulométrique du sable

Masse tot seche = 3,61 Kg

Module	TAMIS (mm)	REFUS (Kg)	REFUS Cumul (Kg)	% R. Cumul	Passant %
37	4	0	0	0,0%	100,0%
34	2	0,19	0,19	5,3%	94,7%
31	1	0,56	0,75	20,8%	79,2%
28	0,5	1,58	2,33	64,5%	35,5%
25	0,25	1,07	3,4	94,2%	5,8%
22	Fond 0,125	0,21	3,61	100,0%	0,0%

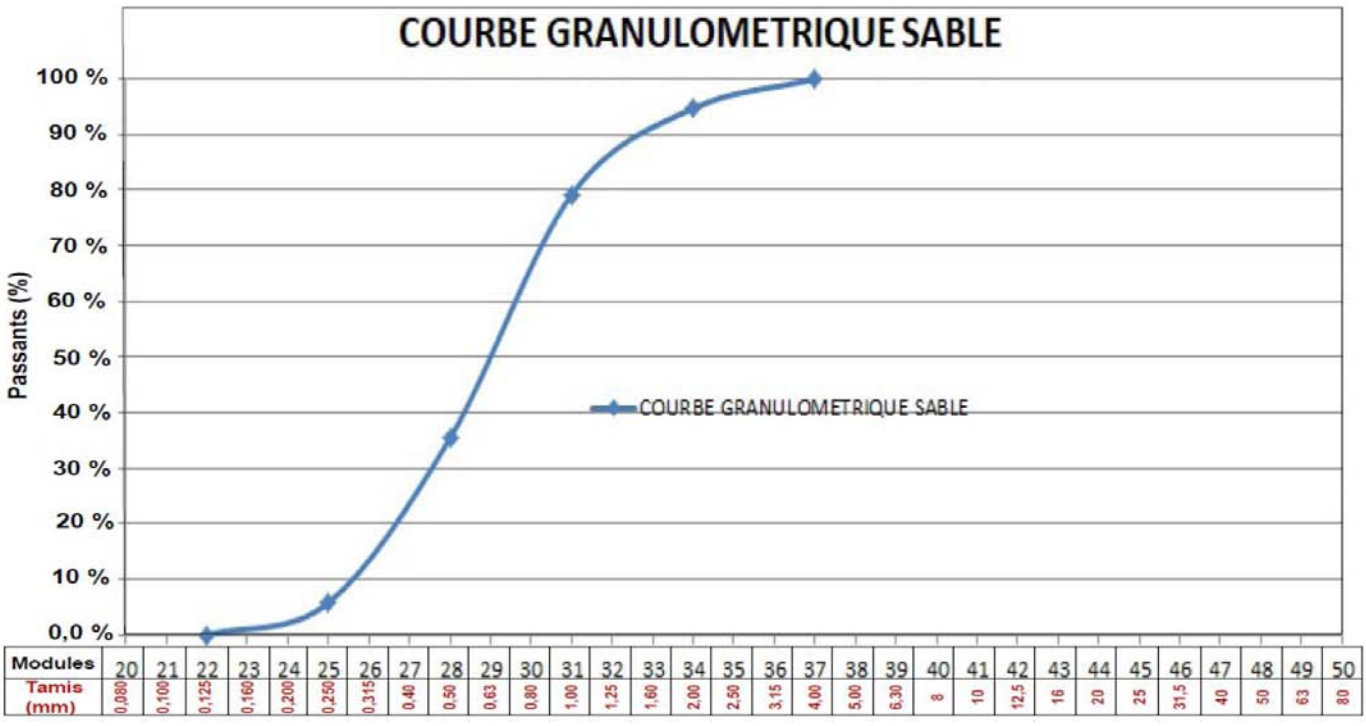


Figure II.6 : Courbe granulométrique sable naturel









Figure II.7 : Photos d'analyse granulométrique du sable naturel

c.2 Modules de finesse [NA EN 12620]

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis [5]. Les modules de finesse sont classés suivant la norme européenne (EN 12620) dans le tableau (II.4).

Tableau II .12 : Type de sables et leur marge du module de finesse.

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivante: (0,125 ; 0,25 ; 0,50 ; 1 ; 2 ; 4)

FM= (5,3+20,8+64,5+94,2+100)/100=**2,85%**

APPRECIATION

1,8 et 2,2 : le sable est à majorité de grains fins;
2,2 et 2,8 : on est en présence d'un sable préférentiel;
2,8 et 3,3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Donc suivant notre module de finesse, Nous sommes dans le 3eme cas.

c.3 - Masse volumique apparent [EN 1097-6]

- **Masse volumique à l'état lâche** :

La masse volumique apparente du sable est détermine par un entonnoir standardisé de capacité 1 litre. On remplit l'entonnoir avec du sable sec. Pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable. On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M2 ce poids. La masse volumique apparente du sable est donnée (tableau III.14 et III.13) par la formule suivante : **ρ=** (M2-M1)/Vr

M1 : Masse du récipient vide

M2 : Masse du récipient plus le sable.

Vr : Volume du récipient (Vr = 1570ml).

Tableau II.13: Teneur en eau du sable

M_h(g)	M_s(g)	W (%)
3740	3690	1.35

Tableau II.14. La masse volumique apparente du sable à l'état lâche

Désignation	M_1(g)	M_2(g)	VR(cm3)	ρapp (g/cm3)	Moyenne (g/cm3)
Essai 1	7720	9930	1570	1.40	1.41
Essai 2	7720	9940	1570	1.41	
Essai 3	7720	9950	1570	1.42	

❖ **Masse volumique absolue [NF P18-555]**

Il s'agit de connaitre le poids de l'unité de volume des matériaux étudiés en supposant compactés. La mesure peut s'effectuer par déplacement de liquide comme il est montré dans le mode opératoire et les résultats sont donnés dans le tableau (II.15).

- **Mode opératoire** :

La masse volumique absolue du sable est déterminé à l'aide d'un récipient de 1000 cm^3. On prend 3 échantillons de masse 300g .On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml. Et On y verse 250ml d'eau puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après l'opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable-eau.

Tableau II.15. La masse volumique absolue du sable

Désignation	M(g)	V_2 (cm^3)	V_1	ρ_{abs} (g/cm3)	Moyenne (g/cm3)
Essai 1	300	420	300	2.5	2.56
Essai 2		415	300	2.6	
Essai 2		415	300	2.6	

d. Caractéristiques du ciment CRS-CEM II

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment DANGOTE CEM II de classe 42.5 provenant de la cimenterie de la Tanzanie. Il contient au moins 80% de clinker et le reste est composé de constituants secondaires tel que le calcaire et le gypse comme régulateur de prise. Ses caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques sont données par les Tableaux (II.16) suivants la recette du ciment.

Caractéristiques techniques

- Ciment gris CEM II
- Coloris : gris
- Résistance : 42.5 MPa
- Norme : NF

❖ **Caractéristiques chimiques du clinker (Norme NF EN 197-1)**

Tableau II.16. Composition chimique du ciment DANGOTE

Caractéristiques du Clinker (Formule de Bogue)		**Recette Du Ciment**		**Indicateur**	**Valeurs moyenne**
C_3S (%)	62.72	Clinker	80%	CaOl	0.92
C_2S (%)	10.86	Coquillage (Calcaire)	16.2%	SR	2.43
C_3A (%)	8.47	Gypse	3.8%	AFR	1.628
C_4AF (%)	9.83				

❖ **Résistances à la compression sur mortier**

Tableau II.17. Variation suivant les jours de résistances à la compression du mortier fait à la base du ciment DANGOTE

Échéances	**Valeurs moyennes E**	**Ecart-type**	**Valeurs Limites NF EN 197-1**	**Normes d'essai**
2 Jours	23.6	1.32	≥20 MPa	NF EN 196-1
7 Jours	34.1	1.8	---	NF EN 196-1
28 Jours	43.5	2.89	42.5 à 62.5 MPa	NF EN 196-1

Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes, elles peuvent varier légèrement dans les limites autorisées par les normes. Le succès des travaux entrepris avec ce ciment reste naturellement conditionné par le respect des règles de bonne pratique en matière de préparation, mise en œuvre et conservation des mortiers et bétons. Vérifiez que ce ciment est bien adapté à l'usage auquel vous le destinez. Vérifiez que les produits éventuellement ajoutés au ciment (adjuvants,...) sont compatibles avec le résultat escompté.

II.3 Formulation du béton

II.3.1 Méthode de calcul de la composition du béton

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

- Méthode de Bolomey
- Méthode d'Abrams
- Méthode de Faury
- Méthode d'Oisel
- Méthode de Valette Gorisse
- Méthode des Volumes absolus
- Méthode générale du centre d'essais des structures.

II.3.2 Formulation des bétons : Méthode de Dreux-Gorisse.

a. Objectif.

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton.

b. Hypothèses de travail

❖ **Caractéristique du béton**

- Résistance moyenne à 28 jours du béton :……. fc = 25 Mpa
- Affaissement au cône d'Abrams :…….. A = 7 cm

❖ **Caractéristique du ciment**

- Classe des granulats :…….. Passable
- Diamètre du plus gros granulat :…….. D = 31,5 mm
- Coefficient granulaire :……. G = 0,4

c. Détermination du rapport C/E

fc = G * FCE (C/E – 0,5) **Formule de Bolomey**.

Avec

fc : Résistance moyenne du béton à 28 jours. Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique fc. Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression fc28 nécessaire à la stabilité de l'ouvrage. Soit fc = fc28 * 1,15 = 1,15 * 25.

fc28 : Résistance moyenne à 28 jours du béton

G : Coefficient granulaire = 0,5

FCE : Résistance moyenne du ciment à 28 jours = 55MPa classe vraie de 42,5MPa

C : Masse du ciment par m^3 de béton

E : Masse d'eau par m^3 de béton

$fc = G * FCE(C/E - 0{,}5)$

$1{,}15*25=0{,}4*55(C/E - 0{,}5))$ On remplace fc par 1,15*25

$C/E = \frac{1{,}15*25}{0{,}40*55} + 0{,}5$

$\boxed{C/E = 1{,}8068}$

Critère de maniabilité :

La maniabilité est caractérisée, entre autre, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (Aff.). Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier (Tab.II.18)

Tableau II.18: Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser.

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

Comme notre recherche est basée principalement à l'usage fréquent de la catégorie de Génie civil, Ouvrage d'art et Bétons de masse alors nous choisissons l'affaissement qui appartient dans la marge (5 à 9 cm) qui fait moyennement l'affaissement de comparaison soit de 7cm.

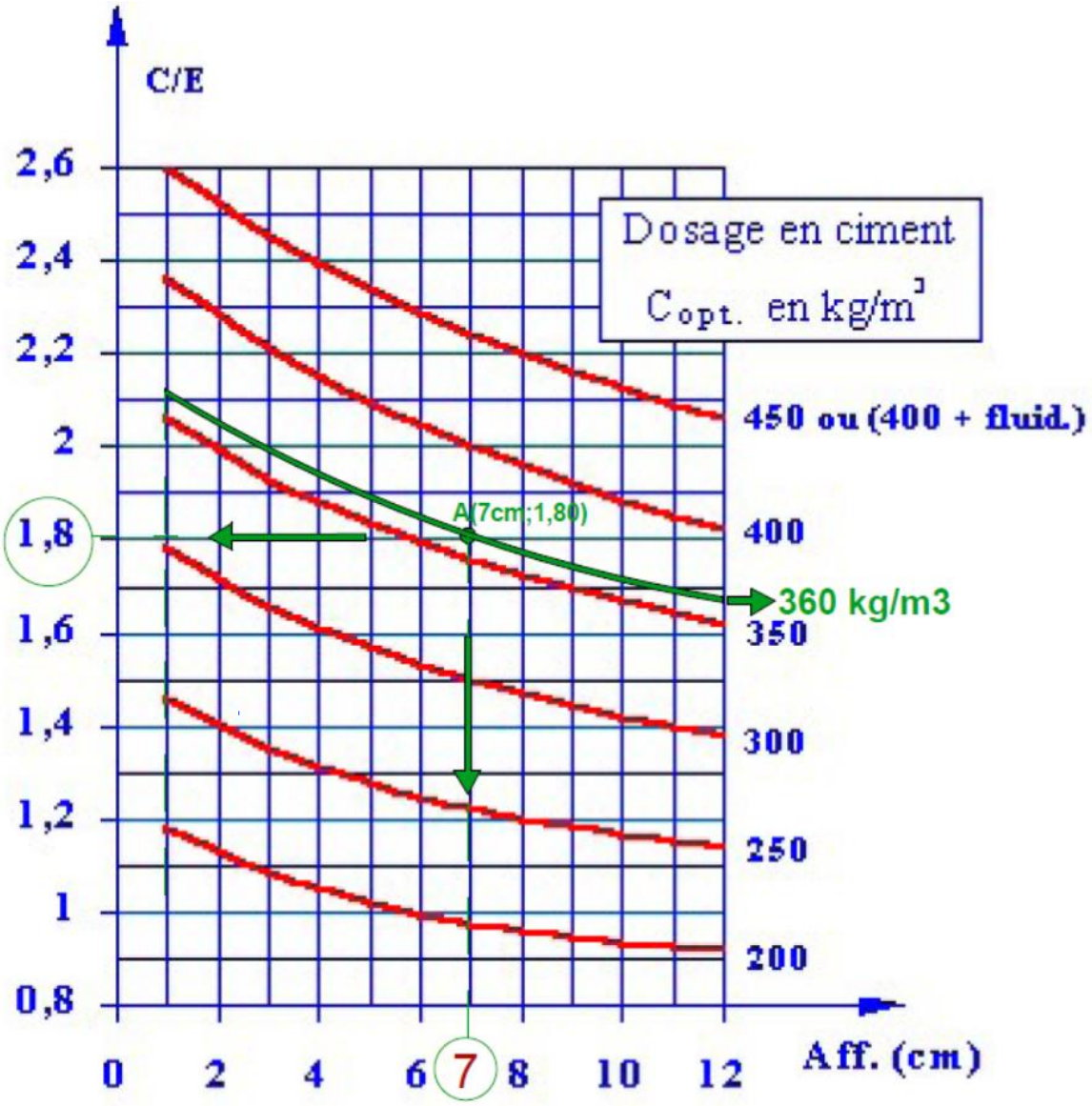


Figure II.8 : Abaque du dosage en Ciment

Avec l'affaissement de 7cm et C/E = 1,8068 qui correspond par interpolation :

0,55 cm ⟶ 50 kg/m^3

0,1 cm ⟶ $\frac{0,1*50}{0,55} = 9,09 \cong 9,1$ kg/m^3

⟹ 350 kg/m3 + 9,1 kg/m3=**359,1 kg/m^3**

Alors adoptons le dosage en ciment de **360 kg/m^3** suivant l'abaque

d. Détermination du dosage en ciment C d'après l'abaque

L'estimation de dosage en ciment est donc C=360 kg pour $1m^3$ de béton.

e. Détermination du dosage en eau E

$$E = \frac{C}{C/E} = \frac{360KG}{1,8068} = 199,25\ litres/m^3$$

f. Détermination de la composition granulaire

Tracé de la courbe granulométrique de référence (la droite de référence de Dreux) :

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sables + graviers mais ciment non compris) peut être schématisée suivant une ligne brisée tracée sur un graphique granulométrique Normalisé ; son origine basse est à 0 % de tamis pour la dimension 0,08 mm correspondant théoriquement aux plus petits grains de sable, et son extrémité haute à 100 % pour la dimension D_{max} correspondant aux plus gros granulats utilisés. Son point de brisure a pour coordonnées :

En abscisse :

Si Dmax < 20 mm ; X = Dmax / 2

Si Dmax > 20 mm Module(X) = (Module(Dmax)+38) / 2

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25\ (D_{max})} + K' \quad \text{où} \quad K' = K + Ks + Kp$$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés

K est un coefficient donné par le tableau (II.19), Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :

Ks (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

Ks = (6 Mfs– 15) avec Mfs le module de finesse du sable.

Kp (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

Kp = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré.

Tableau II.19: K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration		**Faible**		**Normale**		**Puissante**	
Forme des granulats (du sable en particulier)		**Roulé**	**Concassé**	**Roulé**	**Concassé**	**Roulé**	**Concassé**
Dosage en Ciment	400+fluid	-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

La droite de Dreux a pour origine le point 0 origine du graphe et pour extrémité le point Dmax caractéristique des plus gros granulats.

Calcul des coordonnées :

Point d'origine :

Abscisse :0,08≅ 0

Ordonnée :0 ⟹ $O\Xi(0mm; 0\%)$

Point intermédiaire :

Abscisse :0,08≅ 0

Comme $D_{max} > 20mm, donc\ x$ est au milieu du segment gravier, ce segment se trouve sur l'abscisse de 5mm à D_{max} ; X= moyenne de module de tamis de 5mm et Dmax=(38+46)/2= 42 en module qui correspond au tamis de 12,5 mm.

Ordonnée :D=31,5 ; K=-2 ;KS=6*Mfs-15=6*2,85-15=2,1 ;Kp=0

$$Y = 50 - \sqrt{31,5} + (-2) + 2,1 = 44,5\%$$

⟹ $A\Xi(12,5mm; 44,5\ \%)$.

Point final :

Abscisse : 31,5 mm

Ordonnée : 100 % ⟹ B$\Xi(31{,}5mm; 100\ \%)$.

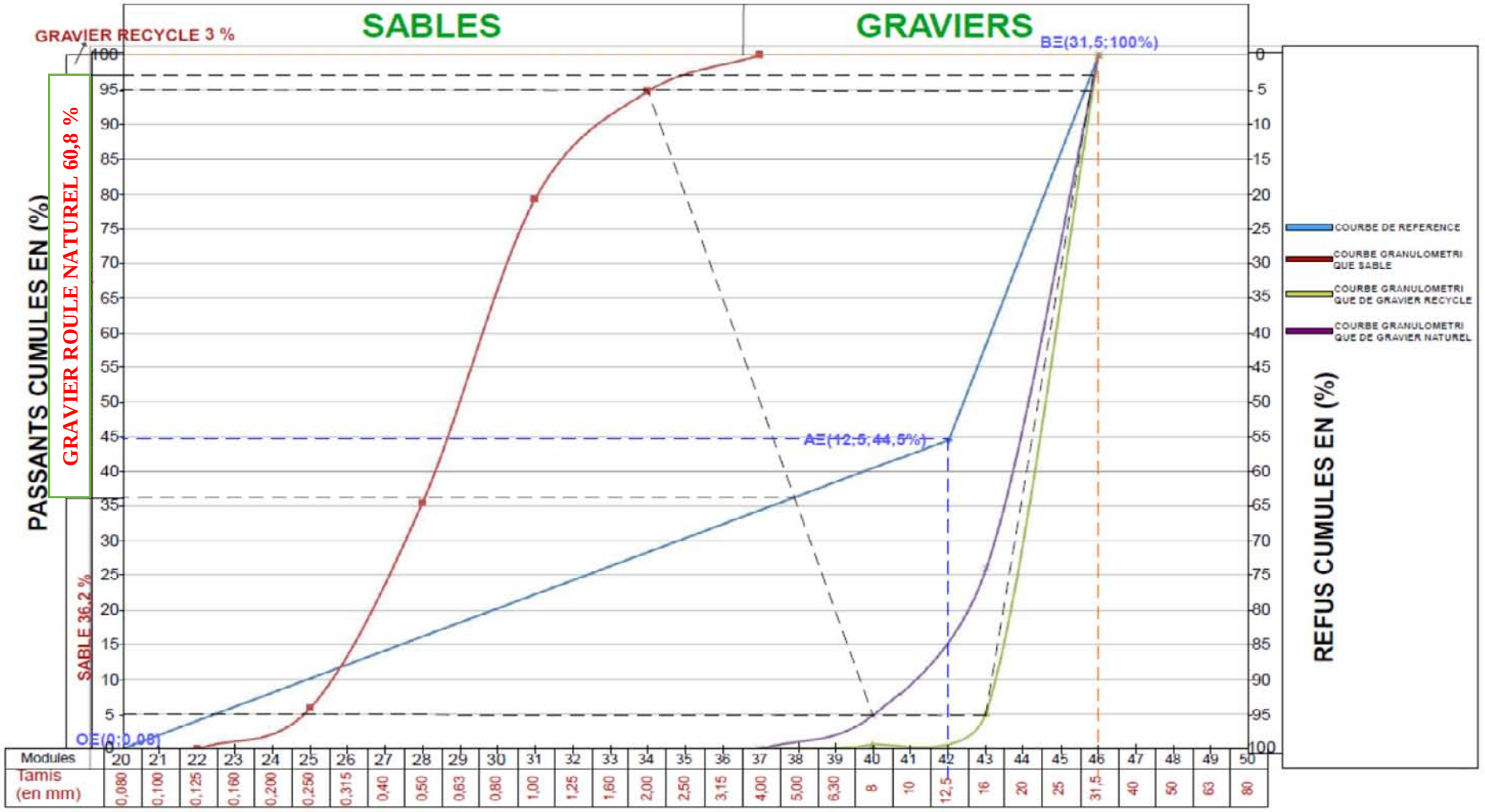
Tableau II.20. Récapitulation des coordonnées de la droite de Dreux.

module	x	y	POINT DE REFERENCE
20	0	0	O$\Xi(0mm; 0\%)$
42	12,5	44,5	A$\Xi(12{,}5mm; 44{,}5\ \%)$
46	31,5	100	B$\Xi(31{,}5mm; 100\ \%)$

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure ci-dessous des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

COURBES D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE



Interprétation des courbes d'analyse granulométrique.

Taux de référence granulaire en pourcentage dans le volume de granulat déterminé (VG).

- Sable roule naturel = 36,2 %
- Gravier roule naturel = 60,8 %
- Gravier roule recycle = 3 %

Condition à la vérification :

G/S≤ 2 (Valeurs courantes)

$\rightarrow \frac{(60,8+3)}{36,2} = 1,762 < 2$; le rapport est vérifié ; donc le dosage est homogène.

g. Détermination de la composition en volume absolu

Le dosage en béton est déterminé pour obtenir 1 m3 béton en place ; cela signifie que le volume de matière vaut 1 m3.

Vabs = VC + Vg + VS = 1 m3 or Vg= $V_{g.recyclé}$ +$V_{g.naturel}$

La compacité γ (tableau II.21) représente la proportion du volume de matière que contient le matériau :

Tableau II.21 : compacité γ suivant la variation de diamètre.

Consistance	Serrage	compacité γ						
		Dmax = 5	Dmax = 8	Dmax= 12,5	Dmax = 20	Dmax = 31,5	Dmax = 50	Dmax = 80
Molle (TP-Fl)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840

	Vibration puissante	**0,775**	**0,805**	**0,820**	**0,830**	**0,835**	**0,840**	**0,845**
Ferme (F)	**Vibration faible**	**0,775**	**0,805**	**0,820**	**0,830**	**0,835**	**0,840**	**0,845**
	Vibration normale	**0,780**	**0,810**	**0,825**	**0,835**	**0,840**	**0,845**	**0,850**
	Vibration puissante	**0,785**	**0,815**	**0,830**	**0,840**	**0,845**	**0,850**	**0,855**

Donc La compacité $\gamma = 0{,}830$ dans le cas de la plastique (p) avec la vibration normale suivant la colonne de D_{max}=31,5 mm.

$$\gamma = \frac{Vabs}{Vapp}$$

- Le volume de matière représente le volume absolu du matériau (Vabs)
- Le volume du matériau représente le volume apparent du matériau (Vapp)

$\gamma = \frac{VC+VG}{\gamma beton}$; Avec $Vc = \frac{c}{MVabsc} = \frac{360kg}{3{,}1kg/dm3} = 116{,}129dm3$

- Vc : volume absolu de ciment en dm3
- C : masse de ciment en kg
- MVabsc : masse volumique absolue du ciment en kg/dm3

Soit 3 100 Kg/m3 = 3,1 kg / dm3.

Volume absolu de granulats (VG)

De la relation de : $\gamma = (Vc + Vg + Vs)$ on en déduit Vg et Vs en remplaçant le volume de granulats Vs + Vg par la valeur VG .On déduit de $\gamma = (Vc + VG)$.

$VG = \gamma * \gamma béton - Vc = (1000 * 0{,}830) - 116{,}13 = 713{,}9 dm^3/m^3$.

Apres que le volume absolu granulaire est déterminé et tenant compte du taux de substitution (0%, 25%, 50%, 75% et 100%) du gravier naturel par le gravier recyclé, cinq (5) mélanges de bétons ont été confectionnés dans le laboratoire de Matériaux de Construction du département de Génie Civil et les détails de calcul ainsi que les codes de ces mélanges de bétons sont donnés ci-après.

- **BO :** Béton 100% gravier roulé naturel + 100% sable roulé naturel
- **GRN_n : (n)** pourcentage de substitution du gravier roulé naturel ; (**GRN)** gravier roulé naturel

- **GRR_n : (n)** pourcentage de substitution de gravier roulé recyclé ; (**GRR)** gravier roulé recyclé
- **SRN_n : (n)** pourcentage de substitution de sable roulé naturel ; (**SRN)** sable roulé naturel
- **BR :** béton 100% gravier roulé recyclé + 100% sable roulé naturel.

g.1. Mélange I: BO (GRN_{100} + SRN_{100})

❖ **Volume de sable**

VS = S % * VG

Vs = 36,2 % * 713,9 = 258,4318 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier naturel**

Vg.naturel = g.naturel % * VG

Vg.naturel =63,8 % * 713,9 = 455,4682 dm^3/m^3

Vérification :

$VG= Vs+V_{g.naturel}+V_{g.naturel}$=258,4318+455,4682=713,9 dm3

Détermination de la composition pondérale sèche en kg.

- Mc= 360 kg/m3
- Masse d'eau=199,25 litres
- Masse de sable :

Sable= Vs*MVabs=0,2584318*2560=661,584 kg/m3

Masse de graviers

1) Gravier roulé naturel = Vg.naturel*MVabs= 0,4554682*2 833 =1 290,34 kg/m3.

Confectionnement du béton en fonction des éprouvettes

V_{moule} (6 éprouvettes)= 6*0,10*0,10*0,10*1,20 m^3 = 0,0072m^3 ; Avec le coefficient de sécurité de 20 %.

1) Sable

1m3 ⟶ 661,584 kg/m3

W sable= 0,05

Sable = 0,0072*661,584*1,05= 5 kg

2) Gravier roule naturel

1m3 ⟶ 1 290,34 kg/m3

gravier roulé naturel = 0,0072*1290,34= 9,29 kg

3) Ciment :

1m3 ⟶ 360 kg

0,0072 m3 ⟶ 0,0072*360 = 2,592 kg.

4) Dosage en eau

= 0,0072*199,25 = 1,4346 L = 1 434,6 mL

g.2. Mélange II : BN75R25 (GRN_{75} de gravier + GRR_{25} de gravier+ SRN_{100})

Taux de référence granulaire en pourcentage dans le volume de granulat déterminé (VG).

GRN+GRR=100% de volume de gravier qui fait 60,8+3=63,8% de gravier dans le béton

- Sable = 36,2 %
- Gravier naturel = 75*63,8/100= 47,85%
- Gravier recyclé = 25*63,8/100= 15,95%

❖ **Volume de sable**

V_S = S % * VG

Vs = 36,2 % * 713,9 = 258,4318 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier roulé naturel**

Vg.naturel = g.naturel % * VG

Vg.naturel =47,85 % * 713,9 = 341,60 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier roulé recyclé**

Vg.recyclé = g. recyclé % * VG

Vg.recyclé = 15,95 % * 713,9 = 113,867 dm^3/m^3

Détermination de la composition pondérale sèche en kg

- Mc= 360 kg/m3
- Masse d'eau=199,25 litres
- Masse de sable :
  1) Sable= Vs*MVabs=0,2584318*2560=661,584 kg/m3
- Masse de graviers :
  2) Gravier naturel = Vg.naturel*MVabs= 0,34160*2 833 = 967,753 kg/m3
  3) Gravier recyclé = Vg. recyclé*MVabs= 0,113867*2 849,7 = 324,487 kg/m3

Confectionnement du béton en fonction des éprouvettes

V_{moule} (6 éprouvettes)= 6*0,10*0,10*0,10*1,20 m^3 = 0,0072m^3 ; Avec le coefficient de sécurité de 20 %.

1) Sable

1m3 ⟶ 661,584 kg/m3

W sable= 0,05

Sable = 0,0072*661,584*1,05= 5 kg

2) Gravier roulé naturel

1m3 ⟶ 967,753 kg/m3

Gravier roulé naturel = 0,0072*967,753= 6,97 kg

3) Gravier roulé recyclé

1m3 ⟶ 324,487 kg/m3

Gravier roulé recyclé = 0,0072*324,487 = 2,34 kg

4) Ciment :

$1m^3$ ⟶ 360 kg

0,0072 m3 ⟶ 0,0072*360 = 2,592 kg.

5) Dosage en eau

= 0,0072*199,25 = 1,4346 L = 1 434,6 mL

g.3. Mélange III : BN50R50 (GRN_{50} de gravier + GRR_{50} de gravier + SRN_{100})

Taux de référence granulaire en pourcentage dans le volume de granulat déterminé (VG).

GRN+GRR=100% de volume de gravier qui fait 60,8+3=**63,8%** de gravier dans le béton

- Sable = 36,2 %
- Gravier naturel = 50*63,8/100= 31,9 %
- Gravier recycle = 50*63,8/100= 31,9 %

❖ **Volume de sable**

VS = S % * VG

Vs = 36,2 % * 713,9 = 258,4318 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier roulé naturel**

Vg.naturel = g.naturel % * VG

Vg.naturel =31,9 % * 713,9 = 227,7341 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier roulé recyclé**

Vg.recyclé = g. recyclé % * VG

Vg.recyclé = 31,9 % * 713,9 = 227,7341 dm^3/m^3

Détermination de la composition pondérale sèche en kg

- Mc= 360 kg/m3
- Masse d'eau=199,25 litres
- Masse de sable :

1) Sable= Vs*MVabs=0,2584318*2560=661,584 kg/m3

- Masse de graviers :

2) Gravier naturel = Vg.naturel*MVabs= 0,2277341*2 833 = 645,171 kg/m3
3) Gravier recyclé = Vg. recyclé*MVabs= 0,2277341*2 849,7 = 648,974 kg/m3

Confectionnement du béton en fonction des éprouvettes

V_{moule} (6 éprouvettes)= 6*0,10*0,10*0,10*1,20 m^3 = 0,0072m^3 ; Avec le coefficient de sécurité de 20 %.

1) Sable

1m3 ⟶ 661,584 kg/m3

W sable= 0,05

Sable = 0,0072*661,584*1,05= 5 kg

2) Gravier roulé naturel

1m3 ⟶ 645,171 kg/m3

Gravier roulé naturel = 0,0072*645,171= 4,645 kg

3) Gravier roulé recyclé

1m3 ⟶ 648,974 kg/m3

Gravier roulé recyclé = 0,0072*648,874 = 4,672 kg

4) Ciment :

1m3 ⟶ 360 kg

0,0072 m3 ⟶ 0,0072*360 = 2,592 kg.

5) Dosage en eau

= 0,0072*199,25 = 1,4346 L = 1 434,6 mL

g.4. Mélange IV : BN25R75 (GRN_{25} de gravier + GRR_{75} de gravier + SRN_{100})

Taux de référence granulaire en pourcentage dans le volume de granulat déterminé (VG).

GRN+GRR=100% de volume de gravier qui fait 60,8+3=**63,8%** de gravier dans le béton

- Sable = 36,2 %
- Gravier naturel = 25*63,8/100= 15,95 %
- Gravier recycle = 75*63,8/100= 47,85 %

❖ **Volume de sable**

$V_S = S\ \% * V_G$

$Vs = 36,2\ \% * 713,9 = 258,4318\ dm^3/m^3$

❖ **Volume de gravier roulé naturel**

Vg.naturel = g.naturel % * VG

Vg.naturel =15,95 % * 713,9 = 113,87 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier roulé recyclé**

Vg.recyclé = g. recyclé % * VG

Vg.recyclé = 47,85 % * 713,9 = 341,60 dm^3/m^3

Détermination de la composition pondérale sèche en kg

- Mc= 360 kg/m3
- Masse d'eau=199,25 litres
- Masse de sable :

1) Sable= Vs*MVabs=0,2584318*2560=661,584 kg/m3

- Masse de graviers :

2) Gravier naturel = Vg.naturel*MVabs= 0,11387*2 833 = 322,594 kg/m^3
3) Gravier recyclé = Vg. recyclé*MVabs= 0,3416*2 849,7 = 973,458 kg/m3

Confectionnement du béton en fonction des éprouvettes

V_{moule} (6 éprouvettes)= 6*0,10*0,10*0,10*1,20 m^3 = 0,0072m^3 ; Avec le coefficient de sécurité de 20 %

1) Sable

1m3 ⟶ 661,584 kg/m3

W sable= 0,05

Sable = 0,0072*661,584*1,05= 5 kg

2) Gravier roulé naturel

1m3 ⟶ 322,594 kg/m3

Gravier roulé naturel = 0,0072*322,594 = 2,323 kg

3) Gravier roulé recyclé

1m3 ⟶ 973,458 kg/m3

Gravier roulé recyclé = 0,0072*973,458 = 7,01 kg

4) Ciment :

1m3 ⟶ 360 kg

0,0072 m3 ⟶ 0,0072*360 = 2,592 kg.

5) Dosage en eau

= 0,0072*199,25 = 1,4346 L = 1 434,6 mL

g.5. Mélange V : BR (GRR_{100} de gravier + SRN_{100})

Taux de référence granulaire en pourcentage dans le volume de granulat déterminé (VG).

GRN+GRR=100% de volume de gravier qui fait 60,8+3=**63,8%** de gravier dans le béton

- Sable = 36,2 %
- Gravier recycle = 100*63,8/100= 63,8 %

❖ **Volume de sable**

VS = S % * VG

Vs = 36,2 % * 713,9 = 258,4318 dm^3/m^3

❖ **Volume de gravier roulé recyclé**

Vg.recyclé = g. recyclé % * VG

Vg.recyclé = 63,8 % * 713,9 = 455,47 dm^3/m^3

Détermination de la composition pondérale sèche en kg

- Mc= 360 kg/m3

- Masse d'eau=199,25 litres
- Masse de sable :

1) Sable= Vs*MVabs=0,2584318*2560=661,584 kg/m3

- Masse de graviers :

2) Gravier recyclé = Vg. recyclé*MVabs= 0,45547*2 849,7 = 1 297,953 kg/m3

Confectionnement du béton en fonction des éprouvettes

V_{moule} (6 éprouvettes)= 6*0,10*0,10*0,10*1,20 m^3 = 0,0072m^3 ; Avec le coefficient de sécurité de 20 %

1) Sable

1m3 ⟶ 661,584 kg/m3

W sable= 0,05

Sable = 0,0072*661,584*1,05= 5 kg

2) Gravier roulé recyclé

1m3 ⟶ 1 297,953 kg/m3

Gravier roulé recyclé = 0,0072*1 297,953 = 9,345 kg

3) Ciment :

1m3 ⟶ 360 kg

0,0072 m3 ⟶ 0,0072*360 = 2,592 kg.

4) Dosage en eau

= 0,0072*199,25 = 1,4346 L = 1 434,6 ml

La synthèse sur l'ensemble des résultats de tous les calculs faits sur les dosages est représentée dans le tableau II.22.

Tableau II. 22. Récapitulation de la synthèse du dosage pour la confection du béton pour les essais

MELANGE	S (kg)	GRN (kg)	GRR (kg)	Ciment (Kg)	Dosage en eau (mL)	Eprouvette 10x10x10cm 3 (pièce)
I. Mélange BO	5	9,29	0	2,592	1 434, 6	6
II. Mélange BN75R25	5	6,97	2,34	2,592	1 434, 6	6

III. Mélange BN50R50	5	4,645	4,672	2,592	1 434, 6	6
IV. Mélange BN25R75	5	2,323	7,01	2,592	1 434, 6	6
V. Mélange BR	5	0	9,345	2,592	1 434, 6	6

A partir de ce tableau, c'est à remarquer que plus le volume du gravier roulé naturel diminue plus le volume du gravier roulé recyclé augmente. Le sable, le ciment, le dosage en eau et le nombre d'éprouvettes restent identiques dans tous les mélanges. (Figure II.9 et II.10) nous montrent les différentes étapes qui ont été suivies pour la confection des différents mélanges de bétons sur lesquels des essais de compression ont été faits.



Masse de ciment



Dosage GRN + GRR + SRN+ Ciment

Figure II.9 : Détermination de la masse des substituants (mélange 1 à 5)



Dosage GRN + GRR +SRN + Ciment



Dosage GRN + GRR + SRN + Ciment

Figure II.10 : mélange 1 à 5.

II.4. Matériels et essais

II.4.1. Etude de béton à l'état frais

On sait que le béton est le matériau obtenu par solidarisation par un liant de ciment, un squelette granulaire composé d'un ou plusieurs sables et d'un ou plusieurs graviers. La norme (NF 18-404) distingue les essais d'études, des essais de convenance et de contrôle.

a)-Affaissement au cône d'Abrams [NA EN 12350-2]

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il est réalisé selon l'ordre suivant:

- introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches égales.
- piquer chaque couche 25 coups avec une tige de ϕ=16mm
- Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur de moule
- démoulé le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre (Figure II.11).





Figure II.11 : Appareillage de cône d'Abrams

Apres la détermination d'affaissement qui est de 8 cm au cône d'Abrams, nous constatons que nous sommes toujours dans le cas d'un béton à consistance plastique.

b)-Vibration : [NA EN 12390-2]

La vibration est la méthode de compactage la plus repandue. Le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'aptitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration. Les étapes suivantes doivent être respectées :

- remplir les moules cubiques et prismatiques
- faire la vibration sur la table vibrante pendant 30s. (figure II.12)

- Peser 3 moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton l'état frais.
- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquer par peinture et conserver dans l'eau.





Figure II.12 : Vibration du béton sur la table vibrante

c)-le malaxage

L'efficacité de malaxage est importante. Elle dépend du type de mélangeurs employés, du temps consacré au mélange lui-même. Les constituants sont introduits dans le malaxeur en suivant l'ordre ci-dessous (Figure II.13) ;

- Introduire le sable, gravier, ciment
- Malaxer pendant 1 min et 30 secs
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendent 3 min et ajouter l'eau tout attentivement
- Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désirée.





Figure II.13 : Photos sur le malaxage (ouvrabilité)

II.4.2. Les essais sur le béton durci

Le béton est considéré comme un solide monolithique après, c'est un matériau perpétuel en évolution. Ceci est dû à plusieurs raisons parmi lesquelles :

- la poursuite de la réaction d'hydratation du ciment pendant plusieurs années notamment, la cohésion et les dimensions du matériau
- les variations du milieu ambiant engendrent des changements lents dans la structure du béton durci

- **Durcissement du béton**

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement dû à l'hydratation progressive du ciment. Comme il est remarqué à la figure (lI.14), c'est bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le temps passe. Ceci peut être expliqué par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décroît elle-même avec le temps.



Masse de béton frais



Enregistrement de masse de béton frais



Bétons hydratés frais imbibés à 28 jrs



Bétons hydratés à l'air libre après 28 jrs

Figure II.14 : Photos à l'étude de béton à l'état frais - état frais durci

II.4.3. Essai de compression

Apres avoir imbibé les bétons hydratés pendant 28 jours, alors nous avons procédé à l'écrasement après la pèse des échantillons (figure II.15). On met la presse en marche à une vitesse (0.5KN/S) jusqu'à la rupture, on décharge puis on note la charge à la rupture F. La résistance du béton à la compression, dans tous les cas, est déterminée par la relation :

$$\mathbf{Rc = \gamma_{(MPa)} = F/S}$$

Rc: résistance à la compression (MPa)

F : la charge de rupture (KN)

S : section de l'éprouvette (mm)



Figure II.15 : Photo illustrant l'essai de compression

Chapitre III : Présentation des Résultats et discussion

III.0. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus après les essais qui ont été suivis par une analyse et une interprétation de ces résultats. Dans ce travail, il a été fait une étude sur la formulation du béton en ouvrabilité jusqu'à la résistance à la compression (Rc) à partir d'un essai destructif par compression à presse hydraulique pour un béton recyclé comparativement au béton ordinaire.

III.1. Méthodologie adaptée à la formulation du béton

Rappelons que le but de notre travail est la caractérisation des bétons au moyen des essais destructifs tel que l'essai de la résistance à la compression par la presse hydraulique d'un béton recyclé à base des matériaux locaux. Pour atteindre les objectifs, comme nous l'avons vu dans le développement, nous rappelons ; que nous avions adopté pour les essais proposés en mettant en pratique la méthodologie suivante :

- Préparation des gâchées pour confectionner 30 éprouvettes (10×10×10) cm^3
- Cinq mélanges de bétons ont été réalisés :
    1. **Mélange BO** : Béton ordinaire formulé à base de gravier naturel 100 % et sable naturel 100 %
    2. **Mélange BN75R25** : Béton recyclé formulé à base de gravier naturel 75 % ; de gravier recyclé 25 % et sable naturel 100 %
    3. **Mélange BN50R50** : Béton recyclé formulé à base de gravier naturel 50 % ; de gravier recyclé 50 % et sable naturel 100 %
    4. **Mélange BN25R75** : Béton recyclé formulé à base de gravier naturel 25 % ; de gravier recyclé 75 % et sable naturel 100 %
    5. **Mélange BR** : Béton recyclé formulé à base de gravier recyclé 100 % et sable naturel 100 %
- Les propriétés étudiées: la masse volumique, l'affaissement, la résistance à la compression (Rc).
- L'essai de compression étant exécuté après 28 jours de durcissement.

III.2. Présentation des résultats

Etat frais et état durci

Les tableaux III.1 à III.5 ci-dessous, présentent l'ensemble des propriétés physiques (masse volumique, affaissement). Les éprouvettes conservées dans un milieu humide sont écrasées par compression après

28jours de durcissement. Les résultats obtenus représentent une grande partie la synthèse sur l'ensemble de travaux effectués dans notre recherche.

La succession du mode opératoire suivant a été essentiellement utile pour indiquer les procédés à suivre :

1) Détermination de la masse volumique à l'état frais et celle de l'état durci avant l'écrasement afin d'avoir une idée de comparaison entre les masses volumiques à l'état frais et celle à l'état durci par la pèse au moyen d'une balance de laboratoire.

2) La presse hydraulique est alimentée et chargée d'un échantillon après l'autre, puis la commande à l'écrasement est activée jusqu'à la rupture d'un échantillon de volume 10x10x10 cm^3.

3) Nettoyage ou décharge d'un échantillon écrasé par la presse hydraulique de 1 500 KN jusqu'au dépôt de déchets.

4) Enregistrement des résultats suivants :

$$\mathbf{Rc = \gamma_{(MPa)} = F/S}$$

F : la charge de rupture (kN).

Rc: résistance à la compression (MPa).





Figure III.1 : Détermination de différentes résistances à la compression après l'écrasement à la presse hydraulique.

Les résultats obtenus lors des essais d'affaissement, la volumique à l'état frais et à l'état durci ainsi que la résistance à la compression sont donnés dans les tableaux IV.1-IV.5.

Tableau III. 1. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange I BO

I. MELANGE BETON ORDINAIRE (BO)						
	ETUDE DE BETON A L'ETAT FRAIS		**LES ESSAIS SUR LE BETON DURCI**			
	Ciment=2,92 kg ; Eau= 1434,6 ml			RESISTANCE A LA COMPRESSION		
Eprouvette	Aff (cm)	$M_{(frais)}$ (kg)	$M_{(durci)}$ (kg)	F(KN)	Rci $= \gamma i_{(MPa)}$	$\boldsymbol{RC} = \boldsymbol{\gamma_{(MPa)\ moyenne}}$
Eprouvette1	8	2,98	2,36	255,729	25,573	**26,134**
Eprouvette2		2,99	2,43	241,872	24,187	
Eprouvette3		3,05	2,44	265,332	26,533	
Eprouvette4		3,09	2,49	253,132	25,313	
Eprouvette5		3,13	2,51	293,438	29,344	
Eprouvette6		3,15	2,53	258,521	25,852	

Tableau III. 2. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange II

II. MELANGE BN75R25						
	ETUDE DE BETON A L'ETAT FRAIS		**LES ESSAIS SUR LE BETON DURCI**			
	Ciment=2,92 kg ;Eau= 1434,6 ml			RESISTANCE A LA COMPRESSION		
Eprouvette	Aff (cm)	$M_{(frais)}$ (kg)	$M_{(durci)}$ (kg)	F(KN)	$RCi = \gamma i_{(MPa)}$	$\boldsymbol{RC} = \boldsymbol{\gamma_{(MPa)\ moyenn}}$
Eprouvette1	8,6	2,96	2,41	250,158	25,016	**26,099**
Eprouvette2		2,96	2,42	259,79	25,979	
Eprouvette3		2,99	2,43	281,262	28,126	

Eprouvette4		3,05		2,47	258,025	25,803	
Eprouvette5		3,07		2,47	255,85	25,585	
Eprouvette6		3,23		2,62	260,85	26,085	

Tableau III. 3. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange III

III. MELANGE BN50R50						
	ETUDE DE BETON A L'ETAT FRAIS		**LES ESSAIS SUR LE BETON DURCI**			
	Ciment=2,92 kg ;Eau= 1434,6 ml			RESISTANCE A LA COMPRESSION		
Eprouvette	Aff (cm)	$M_{(frais)}$ (kg)	$M_{(durci)}$ (kg)	F(KN)	$Rci = \gamma i_{(MPa)}$	$\boldsymbol{Rc = \gamma_{(MPa)\ moyen}}$
Eprouvette1	8	2,89	2,38	247,587	24,759	**26,005**
Eprouvette2		3,02	2,45	274,49	27,449	
Eprouvette3		3,05	2,45	264,863	26,486	
Eprouvette4		3,07	2,46	256,16	25,616	
Eprouvette5		3,11	2,51	270,859	27,086	
Eprouvette6		3,17	2,61	246,34	24,634	

Tableau III. 4 . Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange IV.

IV. MELANGE BN25R75						
	ETUDE DE BETON A L'ETAT FRAIS		**LES ESSAIS SUR LE BETON DURCI**			
	Ciment=2,92 kg ;Eau= 1434,6 ml			RESISTANCE A LA COMPRESSION		
Eprouvette	Aff (cm)	$M_{(frais)}$ (kg)	$M_{(durci)}$ (kg)	F(KN)	$Rci = \gamma_{i(MPa}$	$\boldsymbol{Rc = \gamma_{(MPa)\ moyen}}$
Eprouvette1	7	2,85	2,30	250,216	25,023	**25,472**
Eprouvette2		2,85	2,32	246,878	24,688	

Eprouvette3		2,95		2,40	261,7	26,17	
Eprouvette4		3		2,44	256,614	25,661	
Eprouvette5		3,02		2,44	261,589	26,159	
Eprouvette6		3,07		2,48	251,329	25,133	

Tableau III. 5. Affaissement, Masse volumique et la résistance à la compression pour le Mélange V.

V. MELANGE BETON RECYCLE (BR)						
	ETUDE DE BETON A L'ETAT FRAIS		**LES ESSAIS SUR LE BETON DURCI**			
	Ciment=2,92 kg ;Eau= 1434,6 ml			RESISTANCE A LA COMPRESSION		
Eprouvette	Aff (cm)	$M_{(frais)}$ (kg)	$M_{(durci)}$ (kg)	F(KN)	$Rci = \gamma i_{(MPa}$	$\boldsymbol{Rc = \gamma_{(MPa)\ moyenn}}$
Eprouvette1	7	2,86	2,28	256,329	25,633	**25,287**
Eprouvette2		3,03	2,43	246,58	24,658	
Eprouvette3		3,08	2,46	252,018	25,202	
Eprouvette4		3,09	2,49	259,591	25,959	
Eprouvette5		3,14	2,49	253,693	25,369	
Eprouvette6		3,17	2,52	249,015	24,902	

❖ Il a été remarqué dans les tableaux III.1 à III.5 que :

- L'ouvrabilité du béton à base de graviers recyclés augmente de 7 à 8,6 cm , cela correspond à une variation estimée de 2,3 % par rapport à l'affaissement du béton ordinaire BO. Malgré cette variation, les résultats d'ouvrabilité dans les cinq (5) mélanges restent maintenus dans le classement plastique dont l'intervalle d'affaissement admissible varie entre 5 à 9 cm. Si une fois il y a manque d'une corrélation en diamètre des grains entre les graviers naturels et recyclés, il sera aussi à remarquer la variation d'ouvrabilité. Donc cela s'explique en terme de grosseur des substituants en granulat (graviers). Pour les mélanges d'un même dosage en eaux leur ouvrabilité varie en fonction de la densité des substituants (graviers).

- La masse volumique de béton à l'état frais est supérieure à la masse volumique de béton l'état durci, car au fur et à mesure que le béton frais accélère la prise pendant 28jours et c'est au fur et à mesure que l'eau diminue dans le béton frais en s'évaporant ou en participant à

l'hydratation du ciment. C'est avec ce phénomène que la masse d'eau a été réduite du béton frais afin de devenir le béton durci (béton hydraté).

- Les moyennes des résistances à la compression dans chaque mélange ne sont pas égales ; il est clair que le caractère hétérogène du béton reste la principale cause de ce facteur handicapant. Cela aussi s'explique par l'effet que, le comportement mécanique des granulats dans le béton n'est pas tout à fait constant dans tous les mélanges suite aux plusieurs paramètres comme la forme variable des graviers recyclés, la différence des densités occupées par les granulats dans tous les mélanges par conséquent après vibration, les bétons frais n'ont pas les masses égales. Tous ces facteurs font à ce que les résultats obtenus en résistance à la compression ne soient pas égaux.

Tableau III. 6. Variation des résistances à la compression entre BO et BR

	Rc (Mpa)	Rc (%)	Variation de Rc (%)
BO_{100}	**26,134**	**100**	
BN75R25	26,099	99,9	-0,1
BN50R50	26,005	99,5	-0,5
BN25R75	25,472	97,5	-2,5
BR_{100}	**25,287**	**96,8**	**-3,2**

Tout comme il a été aussi remarqué dans le tableau III.6 et sur la figure III.2 ci-dessous, que la résistance à la compression du béton ordinaire BO et celle du béton recyclé BR varient en diminution de 3,2 % par rapport au bêton ordinaire BO (béton témoin). Cette variation est due à l'augmentation de la teneur en gravier roulé recyclé. C'est à constater que, plus la quantité de gravier roulé recyclé augmente dans le béton, plus la résistance à la compression du béton diminue.

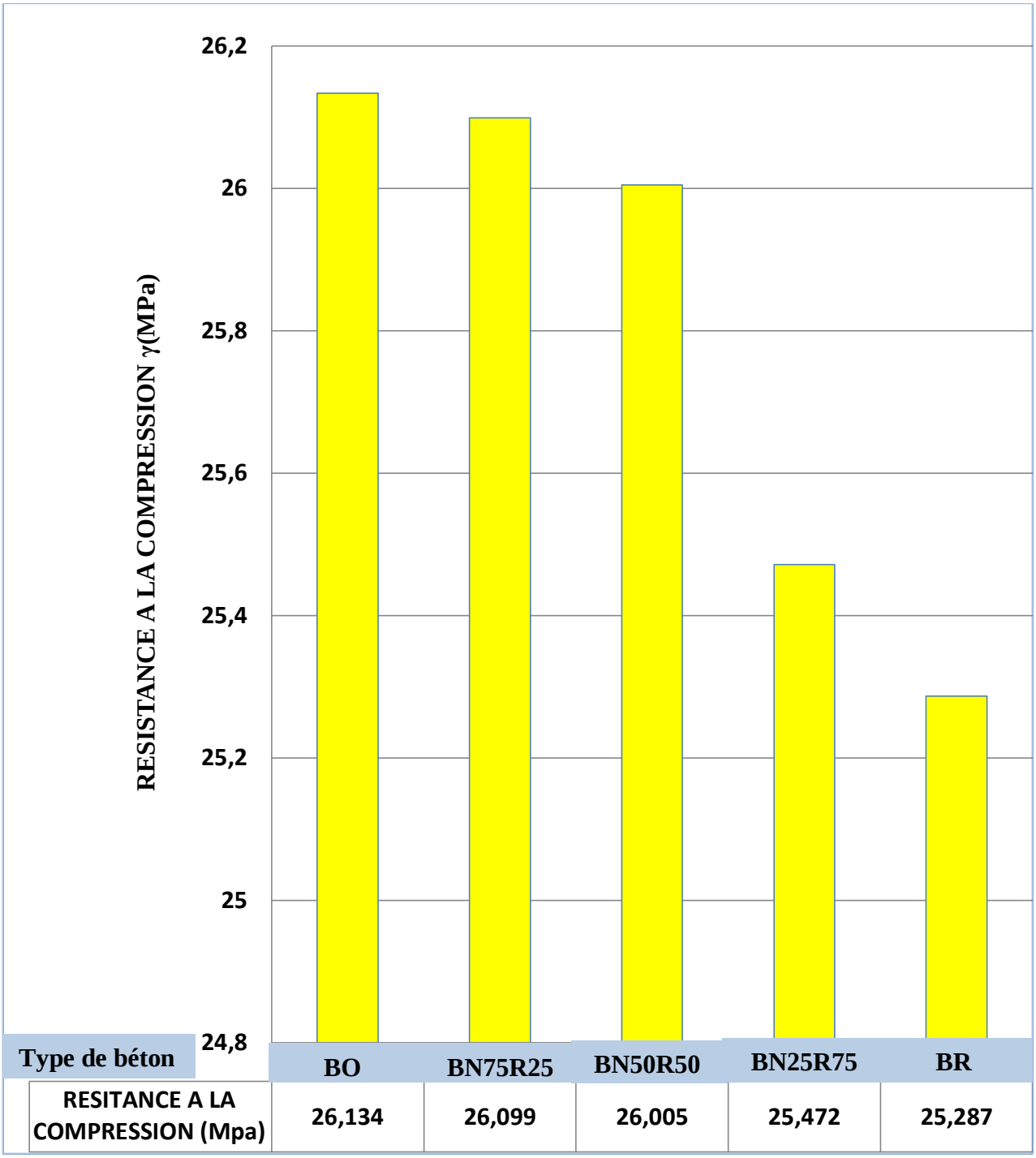


Figure III.2. Graphique de comparaison de la résistance à la compression de béton ordinaire et celles des bétons à base de gravier recyclé.

Conclusion générale

A partir des résultats obtenus nous pouvons remarquer que le béton ordinaire a une résistance importante à la compression. L'étude expérimentale a porté sur les taux de substitution variable (0 ; 25 ; 50 ; 75 ; 100%) pour chaque type de dosage en granulat roulé naturel et recyclé.

Pour ce faire , nous constatons que le comportement physique et mécanique du béton diminue faiblement en fonction de l'irrégularité hétérogène causée par l'augmentation du dosage de graviers roulé recyclé dans le béton. Plus le dosage en graviers roulés recyclés augmente, plus nous avons la présence de gros grains en graviers qui diminue la consistance du béton entre les types de mélanges, d'où il a été remarqué la diminution de la résistance à la compression du béton recyclé par rapport au béton ordinaire. Suivant les études faites sur les graviers roulées recyclés, nous soulignons que cette diminution de la performance mécanique dans les bétons à base des granulats recyclés n'est pas liée du tout à l'absorption de ces granulats car ces derniers ont été bien traité jusqu'à ce que le reste des particules du mortier initial collé sur les surfaces de ces granulats a été presque négligeable avec un degré d'absorption de teneur en eau de 1,13 % par rapport à la masse sèche de gravier recyclé. C'est pourquoi l'introduction de gravier recyclé dans la formulation du béton n'a pas pu occasionner un grand écart de différence entre les résistances à la compression du béton ordinaire aux bétons recyclés avec une diminution de 3,2 % par rapport au béton ordinaire. En général, Il a été remarqué que les bétons étudiés à base des graviers roulés recyclés comportent aussi les résistances à la compression supérieures à 25 MPa, qui fait à ce que la portion étudiée reste dans l'intervalle admissible en terme de la résistance malgré le recyclage des graviers.

Alors, pour mieux sauvegarder le système écologique en préservant l'environnement aux pollutions dues aux démolis mais surtout à l'épuisement des ressources naturelles, nous appelons la conscience scientifique des ingénieurs à réfléchir aux 3R : réduire-réutiliser-recycler les déchets de démolition des bétons afin d'avoir l'esprit de créativité dans l'objectif de produire de moins en moins de déchet.

C'est pourquoi nous avons mené l'étude sur ce présent sujet de mémoire afin de démontrer scientifiquement la possibilité d'utiliser partiellement ou totalement les granulats (déchets de béton de démolition) comme substitution des granulats naturels dans la fabrication du béton recyclé.

D'où par conclusion, les résultats ont été jugés idéalement meilleurs pour la confection du béton armé selon le classement de la recommandation CEB-FIP 1970, afin de répondre favorable à la question sur l'impact environnemental pour la part de la meilleure gestion écologique (ressources naturelles).

Recommandations

Il est recommandé de prendre en compte les paramètres suivants, pour comprendre les propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication du béton à base des granulats recyclés :

- Le contrôle strict de la quantité de graviers recyclés ajoutés au béton lors de la variation du mélange est nécessaire afin de pouvoir comparer le béton avec différents pourcentages en graviers recyclés.

- Compte tenu des caractéristiques d'absorption des granulats recyclés, lors de la préparation du mélange de béton recyclé, il est nécessaire d'effectuer une correction d'humidité pour ce type de granulat, car ce matériau pourrait modifier significativement la quantité d'eau de gâchage disponible.

- Il est recommandé d'effectuer des essais de durabilité sur des périodes prolongées pour le béton recyclé BR. Cela permettra d'avoir plus d'informations sur la façon dont le matériau se comporte à des âges avancés et comment ses propriétés sont modifiées par rapport au béton ordinaire BO, après 8 mois ou plus d'âge des échantillons moyennent l'essai non destructif (scléromètre).

- Dans la mesure du possible, l'utilisation des granulats recyclés homogènes est recommandée pour la réalisation de mélanges de béton. Si le matériau recyclé est très variable, il sera plus difficile de contrôler les paramètres du béton fabriqué à partir de ce matériau. Des facteurs tels que l'utilisation d'un matériau recyclé provenant d'une source unique ou la sélection rigoureuse du matériau recyclé à ajouter peuvent aider à avoir une plus grande homogénéité dans le béton recyclé.

- Les recherches futures sur les bétons à base de graviers recyclés devraient continuer à être menées, de façon que leurs principales caractéristiques puissent être admissibles et leurs critères soient de plus en plus efficaces pour l'utilisation appropriée comme sources de matériaux dans les structures en béton.

Bibliographie.

- OUVRAGE :

[1] Mémoire de fin d'étude « Etude de l'effet de fillers de marbre sur la réponse mécanique d'un béton recyclé à base de ciment CRS » dirigé par Dr. BELAGRAA.L Promotion 2006.

[2] GEORGE DREUS « Nouveau guide de béton »

[3] CYRILE GUERANDEL : « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de lixiviation », Thèse de doctorat, 2009 à l'Université Paul Verlaine- METZ, 2009.

[4] Katz A., «Propriétés du béton fabriqué à partir de granulats recyclés provenant de vieux bétons partiellement hydratés, recherche sur le ciment et le béton», 33 (5), pp. 703-711, 2003.

[5] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina «Influence des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques. Composites de béton de ciment » 2002; 24:269-79.

[6]Rasheeduzzafar, Khan A. «Béton recyclé – une source de nouveaux granulats, ciment, béton et agrégats. Cément, Concrète and Agrégeâtes» , 6, No 1, pp. 17-27, 1984.

[7] A. CHAREF, "La problématique des granulats au Maroc", Push-Button Publishing,(2007)

[8] document sur «Les granulats pour béton»

[9]. Le LERM, "Déchets de chantiers de bâtiment", enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME, (1999).

[10]. H. DJELAL & V. NOUVEL, "Gestion des déchets de démolition et environnement", XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 8 p., (2008).

[11]. N. BOURMATTE, "Granulats Recyclés de substitution pour Bétons Hydrauliques, Caractérisation, Performances, Durabilité", Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 159 p., (2005).

[12], 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).

[13]. Norme Française P 18 554, "Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux", (1990).

[14] Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S. '' Influence du béton de base sur les granulats recyclés. Construction et matériaux de construction'', **23** (2), pp. 829-836, 2009

[15] R. BARON, GAGNE ET J. P. OLIVIER «Viser la durabilité » Le béton bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, N: 2434875 Dépôt légal Janvier 1997 Paris,
2eme tirage, N: d'éditeur : 5820, Page : 309

[16] DREUX.G ET FESTA.J: « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles, 1998.

[17] M. S. JUAN & P. A. GUTIÉRREZ, "Etude sur l'influence en mortier attaché sur les propriétés des granulats de béton recyclé", Construction et matériaux de construction, 23(2), 872-877, (2009).

- REFERENCES INTERNET :

1. https://www.dangotecement.com/tanzania/
2. https://www.iwacu-burundi.org''demolition''