

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANS LACS

ULPGL/GOMA



B.P.: 368 Goma

www.ulpgl.net



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES

Département de Génie Civil

**L'AMELIORATION DU PROPRIETE
MECANIQUE DU BETON CONFECTIONNE A
BASE DES GRAVIERS ROULES**

Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur Civil des constructions

Option : **Structures et Ouvrages d'Art (SOA)**

Rédigé par : **NAMUHYAHYA KUBIHA Divin**

Directeur : **Prof. Dr. Ir. François NGAPGUE**

Encadreur : **Ir Pascal KATUMBI KOKO**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021 - 2022

EPIGRAPHE

“ Il y a dans le cœur de l'homme beaucoup de projets mais c'est le dessein de l'Eternel qui s'accomplit. ”

Proverbe 19, 21

DEDICACES

A!

- Mes parents Stanislas KUBIHA ET Solange MUPENDA

- Ma tante Gisèle CIFUNDIRE

NAMUHYAHYA KUBIHHA Divin

REMERCIEMENTS

Ce travail n'est pas le résultat de nos seules propres forces mais plutôt des efforts conjugués par plusieurs personnes à qui nous devons pleines reconnaissances.

Nos profonds remerciements s'adressent tout d'abord à l'Eternel Dieu Tout Puissant qui n'a cessé de faire grâce.

Nos sentiments de profonde gratitude au Prof. Dr. Ir François NGAPGUE et à l'Ingénieur Pascal KOKO qui ont accepté respectueusement de diriger et d'encadrer ce travail en dépit de leurs occupations diverses. Nos grandes reconnaissances s'en vont aux autorités académiques de l'ULPGL, et plus particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et des Technologies Appliquées, Département de Génie Civil pour leurs efforts fournis durant tout notre parcours académique au sein de cette faculté.

Nos sincères remerciements restent méritoires à mes nos chers parents Stanislas KUBIHA et Solange MUPENDWA, nos sœurs et frères Daniel KUBIHA, Pascaline KUBIHA, Michael KUBIHA, Trésor KUBIHA, au couple Bertin LUKEBA et Gisèle CIFUNDIRE, au couple KULIMUSHI et SIFA Joëlle, au couple Christian MWERU et Rachel CIFUNDIRE ainsi que à toute la famille Thaddée HYAWE-HINYI et à toute la famille Pierre MAZAMBI.

Longue reste la liste de personnes vers qui se tournent mes sincères sentiments de gratitude pour la réalisation de ce travail, je ne saurai ici les adresser tous.

A tous nos amis et connaissances plus particulièrement à la promotion de tech2 et les étudiants logés, dont les avis et conseils étaient pour nous plus qu'une source de motivation en vue de l'aboutissement de la présente œuvre, nous adressons nos sentiments de profonde gratitude.

NAMUHAYAHYA KUBIHA Divin

RESUME

La résistance du béton souhaitée à 28 jours est influencée par plusieurs facteurs notamment la qualité des divers constituants entrant dans sa formulation ainsi que leurs proportions (dosage) dans le béton. Parmi ces constituants il y a les granulats qui représentent la grande partie de la résistance mécanique du béton. L'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration de la propriété mécanique du béton formulé à base des graviers roulés avec différents constituants en évaluant la composition offrant la meilleure résistance en compression après 28 jours. Pour ce faire, il a été nécessaire de caractériser les différents matériaux utilisés (sable et graviers), de formuler le béton de référence (avec le ciment nyati), de confectionner des éprouvettes du béton. La détermination de la composition offrant la meilleure résistance à la compression s'est faite en prenant le béton avec les différentes compositions. La nomination de ces bétons est respectivement de B1, B2, B3, B1', B2', B3' dosé à 350 kg/m^3 . Dans cette série, les bétons B1 et B3' ont donné l'enveloppe (limite inférieure et supérieure) de résistance en compression à 28 jours de 4.359 MPa et de 14.88 MPa. Ceux dosés à 400 kg/m^3 de nomination respectives A1, A2, A3, A1', A2', A3', les bétons A1 et A3' ont donné l'enveloppe (limite inférieure et supérieure) de résistance en compression à 28 jours de 7.1 MPa et 19.2 MPa. L'augmentation des résistances a été exprimée en terme de pourcentage en faisant la variation du dosage en ciment, la variation du type de sable, la variation en même temps du dosage en ciment et du type de sable ; avec les compositions respectives graviers roulés ciment Hima, graviers roulés ciment Nyati, graviers roulés ciment Prime. Les variations des résistances les plus élevées en terme de pourcentage ont été respectivement d'une augmentation de 46.3%, 51% et 58.6%. Ces résultats ont permis de conclure que la famille, la classe et le dosage du ciment ainsi que la nature du sable permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons formulés à base des graviers roulés.

ABSTRACT

The desired strength of concrete at 28 days is influenced by several factors, notably the quality of the various constituents used in its formulation as well as their proportions (dosage) in the concrete. Among these constituents there is the aggregate which represents the great part of the mechanical resistance of concrete. The main objective of this work is to contribute to the improvement of the mechanical properties of the concrete formulated on the basis of the rolled gravels with different constituents by evaluating the composition offering the best resistance in compression after 28 days. To do this, it was necessary to characterize the different materials used, to formulate the reference concrete, to make concrete specimens. The determination of the composition offering the best compressive strength was done by taking the concrete with the different compositions. The name of these concretes is respectively B1, B2, B3, B1', B2', B3' dosed at 350 kg/m³. In this series, B1 and B3' concretes gave the envelope (lower and upper limit) of compressive strength at 28 days of 4.359 MPa and 14.88 MPa. Those dosed at 400 kg/m³ of respective nominations A1, A2, A3, A1', A2', A3', the concretes A1 and A3' gave the envelope (lower and upper limit) of resistance in compression at 28 days of 7.1 MPa and 19.2 MPa. The increase in strength was expressed in terms of percentage by varying the cement dosage, the type of sand, the cement dosage and the type of sand at the same time; with the respective compositions Hima cement rolled gravel, Nyati cement rolled gravel, Prime cement rolled gravel. The highest variations of resistances in terms of percentage were respectively of an increase of 46.3%, 51% and 58.6%. These results allowed to conclude that the family, the class and the dosage of cement as well as the nature of the sand allow to improve the mechanical properties of the concretes formulated on the basis of the rolled gravels.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Volume hachuré = Volume absolu (sans pores)	8
Figure 2 : Volume hachuré = Volume réelle (apparent)	8
Figure 3 : Volume hachuré = Volume du récipient.....	9
Figure 4 : Détermination de l'équivalent de sable	10
Figure 5 : la tamiseuse avec les tamis et l'échantillon des graviers	23
Figure 6 : Echantillon dans le récipient pour la masse volumique apparente	25
Figure 7 : Eprouvette d'essai d'équivalent sable.....	28
Figure 8 : Tambour de Los angeles	31
Figure 9 : Courbe granulométriques du mélange sec	33
Figure 10 : courbe optimale du mélange	34
Figure 11 : Position du point D sur la courbe optimale de BOLOMEY.....	35
Figure 12 : Verticale pour la juxtaposition des courbes	36
Figure 13 : Verticale de la superposition partielle des courbes	37
Figure 14 : Essai sur l'affaissement du béton.....	40
Figure 15 : ciment Nyati, Prime et Hima.....	42
Figure 16 : Sables concassés et sables roulés.....	43
Figure 17 : Graviers roulés.....	43
Figure 18 : Courbe granulométrique gravier roulé	44
Figure 19 : Courbe granulométrique du sablé roulé.....	45
Figure 20 : Courbe granulométrique du sablé concassé.....	45
Figure 21 : variation en pourcentage des résistances.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : types de ciments courants [8]	11
Tableau 2 : classification des ciments en fonction de leur résistance. [8]	12
Tableau 3 : classe du béton suivant l'affaissement au cône d'abrams [1]	16
Tableau 4 : Classification selon la classe granulaire.....	31
Tableau 5 : Résumé les valeurs de A. Source : GHOMARI Fouad	34
Tableau 6 : Valeurs du coefficient K	38
Tableau 7 : Classe de résistance [8]	40
Tableau 8 : Masse volumique des ciments utilisés	44
Tableau 9 : Masse volumique absolue, apparente.....	46
Tableau 10 : Résultats de l'essai équivalent sable	46
Tableau 11 : coefficient Los Angeles gravier tout-venant et sable concassé.....	47
Tableau 12 : Composition du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m ³ avec le Ciment Hima 32.5N.....	48
Tableau 13 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m ³ avec le ciment Hima 32.5N.....	49
Tableau 14 : Composition du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m ³ avec le ciment Nyati 32.5N.....	50
Tableau 15 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m ³ avec le ciment Nyati CEM IV 32.5N.....	51
Tableau 16 : Composition du béton dosage (sable roulé) 350 kg/m ³ avec le prime 42.5N ...	51
Tableau 17 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m ³ avec le Prime CEM II 42.5N.....	52
Tableau 18 : Composition du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m ³ avec cimierwa de classe CEM II 32.5N.....	54
Tableau 19 : Composition corrigée de la formulation du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m ³ avec le ciment Hima de classe 32.5N.....	55
Tableau 20 : Composition du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m ³ avec le ciment Nyati 32.5N.....	55
Tableau 21 : Composition corrigée du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le Nyati CEM IV 32.5N	56
Tableau 22 : Composition du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m ³ avec le prime de classe CEM II 42.5N.....	57

<i>Tableau 23 : Composition corrigée du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le Prime 42.5N.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 24 : Composition du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima 32.5N.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 25 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima CEM II 32.5N.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 26 : Composition du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Nyati CEM IV 32.5N</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 27 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Nyati 32.5N.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 28 : Composition du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime 42.5N.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 29 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime CEM II 32.5N.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 30 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima 32.5N.....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 31 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima 32.5N.....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 32 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Nyati 32.5N.....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 33 : Composition corrigée du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 34 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime 32.5N.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 35 : Composition corrigée du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime CEM II 42.5N.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 36 : Affaissement par cône d'Abrams.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 37 : Résultat de la résistance à la compression.....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 38 : la variation des résistances en compression du béton à 28 jours en Mpa</i>	<i>72</i>
<i>Tableau 39 : Variation des résistances en compression à 28 jours en pourcentage.....</i>	<i>72</i>
<i>Table 40 : Composition granulométrique du gravier roulé.....</i>	<i>79</i>
<i>Table 41 : Composition granulométrique de sable roulé</i>	<i>80</i>
<i>Table 42 : Composition granulométrique de sable concassé.....</i>	<i>81</i>

SIGLES ET ABBREVIATIONS

AG	:	Analyse Granulométrique
Cm	:	Centimètre
E/C	:	Rapport eau sur ciment
ESV	:	Equivalent de sable mesuré visuellement
ESP	:	Equivalent de sable mesuré au piston
Fc28	:	Résistance caractéristique du béton à 28 jours
KN	:	Kilo Newton
Kg	:	Kilogramme
LA	:	Los Angeles
Mf	:	Module de finesse
Mm	:	Millimètre
MPa	:	Méga Pascal
NF	:	Norme française
BAP	:	Béton autoplaçant
ULPGL	:	Université Libre des Pays du Grands Lacs

NOTATIONS

B₁	:	Gravier roulé-sable roulé-Hima CEM IV B-P, 32,5N à 350 kg/m ³
B₂	:	Gravier roulé -sable roulé-Nyati CEM II B(P), 32,5N à 350 kg/m ³
B₃	:	Gravier roulé -sable roulé-Prime CEM II A(P), 42,5N à 350 kg/m ³
B₁'	:	Gravier roulé -sable concassé-Hima CEM IV B-P, 32,5N à 350 kg/m ³
B₂'	:	Gravier roulé -sable concassé-Nyati CEM II B(P), 32,5N à 350 kg/m ³
B₃'	:	Gravier roulé -sable concassé-Prime CEM II A(P), 42,5N à 350 kg/m ³
A₁		Gravier roulé-sable roulé-Hima CEM IV B-P, 32,5N à 400 kg/m ³
A₂		Gravier roulé -sable roulé-Nyati CEM II B(P), 32,5N à 400 kg/m ³
A₃		Gravier roulé -sable roulé-Prime CEM II A(P), 42,5N à 400 kg/m ³
A₁'		Gravier roulé -sable concassé-Hima CEM IV B-P, 32,5N à 400 kg/m ³
A₂'		Gravier roulé -sable concassé-Nyati CEM II B(P), 32,5N à 400 kg/m ³
A₃'		Gravier roulé -sable concassé-Prime CEM II A(P), 42,5N à 400 kg/m ³
C	:	Dosage en ciment
E	:	Proportion en eau
D	:	Diamètre du plus gros grain
G	:	Proportion gravier
M	:	Masse
N	:	Newton
S	:	Proportion sable
V	:	Volume
P	:	Masse Volumique
°C	:	Degré Celsius

TABLE DE MATIERE

EPIGRAPHE.....	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	ix
NOTATIONS.....	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : L'ETAT DE L'ART.....	3
I.1 GENRALITES SUR LE BETON.....	3
I. 1.1 LE BETON DANS LE GENIE CIVIL	3
I.2. CONSTITUANTS DU BETON	4
I.2.1. LES GRANULATS	4
I.2.2. LE CIMENT.....	10
I.2.3. L'EAU.....	12
I.2.4. LES ADJUVANTS	13
1.3. METHODES D'OBTENTION DU BETON	14
1.3.1. Méthode de BOLOMEY	14
1.3.2. Méthode d'Abrams.....	14
1.3.3. Méthode de Faury	14
1.3.4. Méthode des abaques de Dreux	14
1.3.5. Méthode de SCRAMTAIEV	15
I.4. CARACTERISTIQUES DU BETON	15
I.4.1. Caractéristiques du béton frais	15
I.4.2. Caractéristiques du béton durci	17
I.5. TYPOLOGIE DES BETONS	17
I.5.1. Béton ordinaire	17
I.5.2. Béton léger	18
I.5.3. Béton lourd.....	18
I.5.4. Béton autoplaçant (BAP)	18
I.5.5. Béton de haute performance (BHP).....	18
I.5.6. Béton de fibre	18

I.5.7. Béton à durcissement rapide.....	18
I.6. PATHOLOGIE DU BETON COURANT	19
I.6.1. A l'état frais.....	19
I.6.2. A l'état durci.....	20
I.7. PREVENTION DES PATOLOGIES DU BETON	20
CONCLUSION PARTIELLE	20
Chapitre II : METHODOLOGIE	21
II .1. NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS.....	21
II.1.1 Les granulats	21
II.1.2. Le ciment	21
II.1.3. Eau de gâchage.....	22
II.2. CARACTERISATION DES CONSTITUANTS	22
• Les granulats.....	22
II.2.1.. Analyse granulométrique par tamisage.....	22
II.2.2. Masse volumique apparente (papp)	24
II.2.3. Masse volumique absolue (pabs).....	26
II.2.4. Propreté du sable (ES)	27
II.2.5. Résistance au choc.....	29
II.3. METHODE DE FORMULATION	32
II.3.1. Présentation de la méthode et principe	32
II.3.2. Principe.....	32
II.3.3. Détermination de la courbe optimale.....	33
II.3.4. Calcul des pourcentages des constituants	35
II.3.5. Détermination de la quantité d'eau.....	37
II.4. CARACTERISATION DU BETON.....	39
II.4.1. Affaissement au cône d'Abrams du béton à l'état frais	39
II.4.2. Essai de résistance en compression du béton à l'état durci	40
CONCLUSION PARTIELLE	41
Chapitre III : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	42
III.1. PRESENTATION DES CONSTITUANTS	42
III.1.1. L'eau de gâchage	42
III.1.2. Les ciments	42
III.1.3. Le sable.....	42
III.1.4. Les graviers.....	43
III.2. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS.....	43

III.2.1. Le ciment	44
III.2.2. Granulats.....	44
III.3. FORMULATION DU BETON	47
III.3.1. Dosage en ciment (350 kg)	47
III.3.2. Dosage en ciment (400 kg)	58
III.4. CARACTERISTIQUES DU BETON	69
III.4.1. Consistance des bétons	69
III.4.2. Résistance à la compression	70
Conclusion partielle	73
CONCLUSION GENERALE.....	74
BIBLIOGRAPHIE	76
ANNEXES.....	78
ANNEXE 1: ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	79
ANNEXE 2: EQUIVALENT DES SABLES	82
ANNEXE 3 : MODULE DE FINESSE DU SABLE	83
ANNEXE 4 : MASSE VOLUMIQUE	84
ANNEXE 5 : LOS ANGELES ET ABSORPTION.....	89
ANNEXE 6: RESISTANCE DES BETONS EN COMPRESSION	90
ANNEXE 7 : COURBE OPTIMALE	92

INTRODUCTION GENERALE

Tout comme avant, le béton de nos jours est le matériau manufacturé le plus consommé. Cette position trouve sa justification dans le faible coût énergétique et donc économique lié à sa fabrication ainsi que dans la disponibilité de ses composants, la réputation de ce dernier à travers les âges s'explique par ses multiples qualités dont la principale est sa durabilité [1]. La République Démocratique du Congo, par ses diverses ressources, est considérée comme un pays émergent surtout dans le domaine de construction des ouvrages tels que les bâtiments, les routes, les ponts, les barrages, etc. Toutes ces constructions, font le plus souvent recours à ce matériau qui n'a cessé de marquer l'histoire du monde de la construction [2]. Le béton doit ses caractéristiques physiques et mécaniques à ses différents constituants, les granulats appelés matériaux inertes formés du sable et de gravier, sont en poids les principaux constituants du béton et ils constituent le squelette granulaire de ce matériau composite, et représente environ 80% du poids total du béton, ils lui confèrent donc l'essentiel de sa résistance mécanique.

De par l'origine minéralogique parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent des roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites, ou des roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres. Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories qui doivent être conformes à la norme NF EN 12-620 [3], notamment les granulats roulés ainsi que concassés. La cité d'Uvira est une ville de la République Démocratique du Congo dans la Province du Sud-Kivu située sur les rives du lac Tanganyika. Outre les granulats concassés, la ville d'Uvira connaît la particularité des granulats roulés disponible en quantité dans cette région. Ceux-ci sont tirés et ramassés de la rivière Kavinvira utilisés en quantité dans la construction des éléments en béton armé. Quand bien même les bétons obtenus à partir de ces granulats connaissent des résistances moindres comparés à d'autres bétons, les granulats roulés restent plus utilisés de part leur disponibilité ainsi que leur faible coût.

Dans le cadre de ce travail de recherche, il sied de s'interroger : avec quelle composition des constituants du béton formulé à base des graviers roulés doit-on atteindre une bonne résistance en compression du béton à 28jours?

Dans le but d'orienter la recherche à la question précédemment formulée, il est important de vérifier les hypothèses selon lesquelles la nature du sable, le type du ciment ainsi que le dosage en ciment pourraient améliorer les propriétés mécaniques des bétons à base des graviers roulés.

L'objectif du présent travail consiste à contribuer à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton formulé à base des graviers roulés. Cette amélioration sera évaluée après avoir fait les essais de caractérisation des constituants du béton, confectionner le béton, faire des études sur ce béton à l'état frais et à l'état durci et enfin évaluer cette amélioration des propriétés mécaniques sur le béton formulé.

Les résultats de cette étude pourraient apporter un plus-value sur la manière d'amélioration des propriétés mécaniques de béton pour la construction dans cette région.

Pour atteindre l'objectif de ce travail, il sera nécessaire de caractériser les constituants qui vont intervenir dans la formulation du béton, de formuler et de confectionner le béton à base des graviers roulés tout en prenant le type de sable (roulé et concassés), le type de ciment (CEM IV 32,5N ; CEM II 32,5N ; CEM II 42,5N) ainsi que le dosage du ciment (350 kg/m³ et 400 kg/m³) comme différents variables, de mesurer les éprouvettes à la compression au laboratoire afin de déterminer leur résistance et enfin d'analyser les différentes résistances obtenues dans le but de dégager la composition offrant la meilleure résistance en compression après 28 jours.

Hormis l'introduction et la conclusion, le présent travail comporte trois chapitres. Le premier traite de l'état de l'art notamment des généralités sur le béton et ses constituants, ses méthodes d'obtention, sa typologie ainsi que ses pathologies. Le second chapitre s'articule sur la méthodologie en présentant l'origine des constituants, la caractérisation des granulats ainsi que la méthode de formulation du béton. Le troisième présente les résultats notamment les caractéristiques des granulats, les résultats de la formulation du béton ainsi que les caractéristiques des bétons.

Chapitre I : L'ETAT DE L'ART

INTRODUCTION

Le béton est l'un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction. Ce chapitre présente les généralités sur le béton et ses constituants, ses méthodes d'obtention, sa typologie, ses caractéristiques, ses pathologies courantes ainsi que ses quelques méthodes de formulation.

I.1 GENRALITES SUR LE BETON

On appelle béton une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau et des granulats choisis de façon rationnelle [4]. Une bonne connaissance des propriétés des matériaux de construction permet de bien les utiliser et de construire des ouvrages solides, durables, et économiques. Le béton est un produit artificiel car il est produit par une technique et non par la nature.

Ceci s'explique par le fait qu'il offre : la possibilité de varier ses propriétés dans des longues limites en utilisant les composants aux qualités correspondantes, et en appliquant des méthodes spéciales de traitement mécanique et physico-chimique.

I. 1.1 LE BETON DANS LE GENIE CIVIL

Le béton à travers ses performances et sa souplesse d'emploi est présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics, ainsi donc cette partie présente le béton dans le Génie civil.

Le béton fait partie du cadre de vie. Il a mérité sa place par ses caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements, écoles, hôpitaux...) aussi bien que dans les constructions liées à l'activité professionnelle (business, ateliers, commerces, bureaux) ou dans des réalisations diverses (socioculturelles, sportives ou de loisir...) [5].

Le béton permet de franchir des grandes portées à cause de la précontrainte qui a pu améliorer ses performances. Les dernières évolutions techniques concernent la précontrainte extérieure et l'allègement des âmes des tabliers, en particulier par l'utilisation des structures triangulées. Le béton est dans les routes. Supprimant pratiquement toutes les servitudes inhérentes à l'entretien, le béton routier s'est fait sa place dans tous les types de voiries, de l'autoroute, au chemin de

vignoble, en passant par les pistes cyclables. Dans les villes, les dalles et les pavés en béton apportent leur esthétique particulière, en harmonie avec le mobilier urbain. Le béton participe de manière visible à l'architecture, il n'est plus seulement une « pierre artificielle » mais un matériau adopté aux formes tendues, propres aux ouvrages d'art, au même titre qu'aux réalisations actuelles des architectes [5].

I.2. CONSTITUANTS DU BETON

Cette section présente les constituants du béton notamment les granulats (le sable et le gravier), le ciment, l'eau et les adjuvants.

I.2.1. LES GRANULATS

Ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm, les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 80 % du poids total du béton [6]. Ils sont constitués des sables et des graviers. Les granulats utilisés dans le béton sont de plusieurs origines et présentent différentes caractéristiques. Cette section présente en premier les origines des granulats et en second leurs caractéristiques.

I.2.1.1. Origines des granulats

Les granulats peuvent être d'origine naturel, artificiel ou recyclés.

- Les granulats naturels sont des grains minéraux qui proviennent des roches massives ou meubles n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. ;
- Les granulats artificiels sont des grains minéraux qui résultent d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres ;
- Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction [7].

A. Granulats naturels

Lorsque les granulats sont issus des roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) tel que le concassage, criblage, lavage. Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites, ou des roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres. Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en granulats alluvionnaires dits roulés et granulats concassés dits de carrière.

i. Les granulats roulés

Les granulats alluvionnaires ou de roches meubles, dits roulés, dont la forme arrondie 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 granulaires. Ils sont exploités dans les cours d'eau ou à proximité ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est réalisée donc en fonction du gisement, de la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique à sec ou dans l'eau. 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 obtenus par criblage, lavage, dragages ou soit par extraction. Ceux-ci sont catégorisés en granulats de rivière (d'oued), granulats de mer et granulats de dunes.

ii. Les granulats concassés

Les granulats concassés (de carrière) quant à eux sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention des 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. Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues.

B. Les granulats artificiels

Les granulats sont dits artificiels lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais. Ils sont regroupés en différents sous-groupes notamment les sous-produits industriels (concassés ou non), les granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement, les granulats allégés par expansion ou frittage et les granulats très légers.

i. Sous-produits industriels, concassés ou non

Le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau sont les sous-produits industriels (concassés ou non) les plus utilisés. Leur masse volumique

apparente est supérieure à 1250 kg/m^3 pour le laitier cristallisé concassé, supérieure à 800 kg/m^3 pour le granulats.

ii. Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit des granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels, ou granulats réfractaires.

iii. Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats sont très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les Etats- Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m^3 selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids sont intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m^3 .

iv. Les granulats très légers

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 kg/m^3), ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m^3 . On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants. [7]

I.2.1.2. Propriétés des granulats

Les propriétés des granulats sont classées en propriétés géométriques, en propriétés physiques ainsi qu'en propriétés mécaniques. [8]

A. Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques des granulats sont notamment les classes granulaires, la forme des granulats ainsi que la composition granulométrique.

i. Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres (mm). Le terme granulats d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros

éléments. La norme NF XP P 18-540 expérimentale précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles.

Cette norme distingue quatre familles de granulats : les fillers, les sablons, les sables et les gravillons, et également quatre catégories pour les granulats naturels A, B, C et D.

- ✓ Filler 0/D pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- ✓ Sablon 0/D pour $D < 1$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- ✓ Sable 0/D lorsque D est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6,33$ mm ;
- ✓ Graves 0/D lorsque $D > 6,3$ mm ;
- ✓ Gravillons d/D lorsque $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm ;
- ✓ Ballast d/D lorsque $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en (mm) :

0.063 ; 0.08 ; 0.100 ; 0.125 ; 0.160 ; 0.200 ; 0.250 ; 0.315 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.63 ; 0.80 ; 1.00 ; 1.25 ; 1.60 ; 2.00 ; 2.50 ; 3.15 ; 4.00 ; 5.00 ; 6.30 ; 8.00 ; 10.00 ; 12.50 ; 16.00 ; 20.00 ; 25.00 ; 31.50 ; 40.00 ; 50.00 ; 63.00 ; 80.00 ; 100.00 ; 125.00. [8]

ii. *Forme des granulats*

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité du béton, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère ; une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspect comme la ségrégation.

L'analyse permet également de classer les granulats. La classe granulaire repère, un granulat afin de le différencier d'un autre. Cette classification désigne le granulat en indiquant son plus petit diamètre représentatif, d et son plus grand diamètre représentatif, D. le granulat est appelé d/D (exemple : gravier 4/12,5, d=4mm et D= 12,5 mm). [8]

B. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des granulats sont la masse volumique apparente, la masse volumique absolue, le degré de propreté, [9]

i. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. La figure 1 présente le volume absolu d'un gravier.

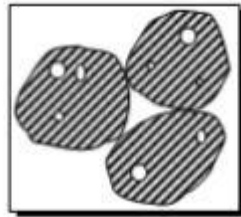


Figure 1 : Volume hachuré = Volume absolu (sans pores)

La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température [9].

ii. La masse volumique réelle

La masse volumique réelle d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides entre particules. La déduction ne concerne pas les vides compris dans le matériau mais seulement ceux entre les particules. La figure 2 présente le volume réel d'un gravier.

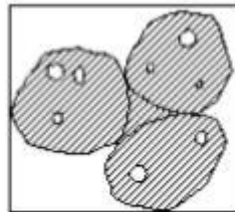


Figure 2 : Volume hachuré = Volume réelle (apparent)

La densité réelle est le rapport de la masse réelle d'une unité de volume du matériau sec dans l'air à température donnée à la masse d'un égal volume d'eau distillée à la même température [9].

iii. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. Il faut

donc préciser : la masse volumique apparente à l'état compacté ou masse volumique apparente à l'état non compacté. La figure 3 présente le gravier en volume apparente dans un récipient.

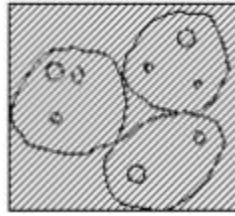


Figure 3 : Volume hachuré = Volume du récipient

La densité apparente à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissant le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.

La masse volumique apparente d'un granulat dépend de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que le degré de compactage et d'humidité. La valeur apparente est utilisée dans le cas où l'on effectue les dosages en volume des différentes composantes du béton [9].

iv. Propreté des granulats et forme des granulats

- **Propreté des granulats**

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. La propreté désigne:

- D'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.
- D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

La figure 4 présente l'éprouvette pour la détermination de l'équivalent de sable.

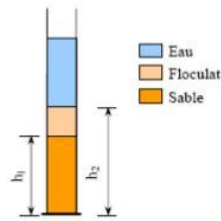


Figure 4 : Détermination de l'équivalent de sable

La propreté du sable est étudiée par un essai de lavage (équivalent de sable) qui consiste à laver le sable avec une solution faisant flocculer les grains argileux [9]. 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 présences 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. Des telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés.

- **Forme des granulats**

La forme d'un granulats est définie par trois grandeurs géométriques:

- La longueur L , distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulats,
- L'épaisseur E , distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulats,
- La grosseur G , dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulats.

La forme des granulats influence:

- La facilité du mélange
- L'adhérence du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

Pour les cailloux et gravillons les impuretés représentent le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm qui doit être compris entre 2 % et 5 % pour des granulats concassés. Pour un sable, la propreté est définie par l'essai d'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène. [9]

I.2.2. LE CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un

mélange sans cohésion en un corps solide [10]. Cette section présente les types ainsi que les classes des ciments courants qui permettent le choix de ciment le mieux adapté à chaque usage.

I.2.2.1. Les types de ciments courants (NF P 15-301)

Le tableau 1 présente les différents types des ciments courants avec leurs compositions et principe d'utilisation.

Tableau 1 : types de ciments courants [8]

Type de ciment	Notation	Teneur en clinker	Autres composants	Principales utilités
Ciment Portland	CPA – CEM I	Min. 95%	Max. 5% de filler	Bétons armés
Ciment Portland composé	CPJ – CEM II / A Ou CPJ – CEM II / B	80 à 94% 65 à 79%	Max. 35% de cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice, laitiers	Travaux de dallage, routes
Ciment de haut fourneau	CHF – CEM III / A Ou CHF – CEM III / B	35 à 64% 20 à 34%	De 35 à 80% de laitier de haut fourneau	Convient aux travaux peu soumis à une trop grande augmentation de chaleur : travaux hydrauliques souterrains, ouvrages massifs, travaux en eaux agressives. A éviter par temps froid
Ciment de haut fourneau	CLK – CEM III / C	5 à 19%	81 à 95% de laitier de haut fourneau	
Ciment aux laitiers et aux cendres	CLC – CEM V / A Ou CLC – CEM V / B	40 à 64% 20 à 39%	18 à 30% laitier et 18 à 30% pouzzolanes ou cendres volantes 31 à 50% laitier et 31 à 50% de cendres volantes ou pouzzolanes	

I.1.2.2. Les classes de résistance des ciments courants

La norme (NF P 15 301) prévoit trois classes de résistance en compression, définies par la valeur minimale de la résistance du ciment mesurée à vingt-huit jours, elle est exprimée en N/mm² : 32,5, 42,5, 52,5 chacune de ses classes de résistance, dites «normales» est subdivisée en fonction de la résistance du ciment au jeune âge : la première, ordinaire, est sans mention, la deuxième, élevée, est signalée par la lettre R (exemple : 42,5R) [8]. Le tableau 2 présente les classifications des ciments en fonction de leur résistance.

Tableau 2 : classification des ciments en fonction de leur résistance. [8]

Classe des ciments	Résistance à 2 jrs	Résistance minimale à 28 jours	Résistance maximale à 28 jours
32,5	--	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 13,5	≥ 32,5	≤ 52,5
42,5	≥ 12,5	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	≥ 42,5	≤ 62,5
52,5	≥ 20	≥ 52,5	--
52,5R	≥ 30	≥ 52,5	--

Les classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication, etc.

I. 2. 2. 1. Prise

Le phénomène de prise qui est déclenché par l'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important. Le déclenchement de ce phénomène est accéléré par plusieurs facteurs parmi lesquels le type de ciment, la finesse de mouture du ciment, la température ambiante, la présence des matières organiques dans l'eau. L'excès de l'eau de gâchage quant à lui agit comme retardateur de prise.

D'une façon générale, les temps de prise sont de l'ordre de grandeur allant de 2h30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments. Ces valeurs s'accroissent à une température ambiante de 20 °C. [10]

I. 2. 2. 2. Dosage en ciment

Le dosage en ciment est dépendant de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés. Le dosage n'est pas déterminé par un calcul théorique absolu, mais il résulte de l'application des règles dont la valeur a pu être appréciée à l'usage et vérifiée expérimentalement [10]

I.2.3. L'EAU

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication des bétons armés ou précontraints [10]. Toutes les eaux usées, des rejets industriels, des

ruissellements doivent faire l'objet d'un contrôle selon toujours cette même norme. La teneur en chlorure dans l'eau ne doit jamais excéder 500 mg/litre. L'eau facilite la mise en œuvre du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton dans la mesure où l'on n'abuse pas cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. Une augmentation du dosage en eau a une incidence directe sur les performances mécanique notamment la baisse de la résistance à la compression / flexion, la baisse de la compacité, l'augmentation de la porosité et l'augmentation de la perméabilité.

La quantité d'eau varie avec un très grand nombre des facteurs (teneur en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais). Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simples connus. Le rapport E/C est un critère important des études du béton, c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité, et a une influence sur la résistance mécanique à la compression et durabilité.

I.2.4. LES ADJUVANTS

Sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont :

- Les plastifiants, qui jouent un double rôle. Ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide, donc très maniables, par défloculation des grains de ciment. A maniabilité donnée, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton. La résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. La durée d'action de ces adjuvants est de 1 à 3 heures.
- Les retardateurs de prise du ciment, qui prolongent la durée de vie du béton frais. Ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de grandes distances ou la mise en place par pompage, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.
- Les accélérateurs de prise et de durcissement, qui permettent, pour les premiers, la réalisation de scellements ou d'étanchements et, pour les seconds, une acquisition plus rapide de résistance au béton durci.

- Les entraîneurs d'air, qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène. Le volume d'air occlus doit être de l'ordre de 6% de celui du béton durci[10].

1.3. METHODES D'OBTENTION DU BETON

La formulation d'un béton, revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, de gravier, de l'eau et éventuellement des adjuvants entrant dans la composition d'un mètre cube de béton partant des propriétés recherchées [11]. Il existe plusieurs méthodes de formulation parmi lesquelles nous citons : la méthode de Bolomey, d'Abrams, de Faury, etc.

1.3.1. Méthode de BOLOMEY

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. Cette méthode aboutit théoriquement tout ou moins à une granularité continue [12].

1.3.2. Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange des granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Les modules de finesse du mélange sont choisis de manière que les vides dans le mélange soient, en principe, réduits au minimum [12].

1.3.3. Méthode de Faury

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation de type continu. Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{d}$, c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{d}$. La courbe idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories [12].

1.3.4. Méthode des abaques de Dreux

Les abaques de Dreux permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois cette composition déterminée, elle devra, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner

les dosages indiqués. En général, les données telles que la résistance à la compression du béton comprise entre 20 et 40 MPa à 28 jours ainsi que la maniabilité sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux. Selon les hypothèses de la théorie de Dreux le ciment doit être de classe 42.5 [12].

1.3.5. Méthode de SCRAMTAIEV

Cette méthode est appelée la méthode des volumes absolus. Le principe de cette méthode est la suivant : la somme des volumes absolus de tous les matériaux composants pour un dosage de $1m^3$ de béton frais est égale 1000 litres. La dépense de ciment, d'eau, de sable, et de gravier ou pierres concassées est établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode d'essai de dosages expérimentaux de mélange du béton [12].

I.4. CARACTERISTIQUES DU BETON

Le béton est une pierre naturelle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau et de granulats de façon rationnelle. Les caractéristiques du béton s'évaluent à l'état frais alors qu'il est encore malléable et à l'état durci quand il ne peut pas se mouler.

I.4.1. Caractéristiques du béton frais

Les caractéristiques prépondérantes du béton à l'état frais sont l'ouvrabilité qui est la capacité du béton à se mettre en œuvre ainsi que la densité [8].

I.4.1.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. Elle doit être donc telle, que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. L'ouvrabilité est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de bétons classiques, elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant,
- La forme des granulats,
- La granularité, la granulométrie,
- Le dosage en eau.

Le rôle de l'eau est prépondérant pour l'ouvrabilité du béton frais et sur les propriétés du béton durci :

- L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment et fines) avec elle.
- L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton.

Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications de la vitesse de durcissement et des performances mécaniques. Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au-delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont :

- risque de ressuage,
- augmentation du retrait,
- augmentation de la porosité,
- défectuosité du parement : bullage,
- risque de ségrégation des constituants du béton,
- diminution de la compacité et corrélativement des résistances [10].

L'ouvrabilité du béton se mesure à l'aide du cône d'Abrams qui classe le béton à l'aide des différents affaissements observés. Le tableau 3 reprend les différentes classes de consistance ainsi que leurs domaines d'utilisation.

Tableau 3 : classe du béton suivant l'affaissement au cône d'abrams [1]

Affaissement (cm)	Classe de la consistance	Domaine d'utilisation
0 à 4	Ferme (F)	Béton de propreté, fondation non armée, voirie
5 à 9	Plastique (P)	Semelle coffrée, mur de soutènement, planché, dallage, poutre, poteau, voile
10 à 15	Très Plastique	Fondation coulée en fouille, pieu, voile de faible épaisseur, paroi moulée
≥ 16	Fluide (F)	Pieu, paroi moulée

I.4.1.2. La densité du béton

La densité apparente du béton traditionnel est de l'ordre de 2,2 à 2,4. la densité du béton varie en fonction de la densité des constituants (principalement les granulats – sable gravier), leurs dosages (formulation de béton), mais également de la quantité d'air qu'il renferme (air inclus lors de la fabrication, du transport par camion toupie et à la mise en œuvre). Par

exemple, un béton qui aura été bien vibré contiendra peu d'air. Il sera donc très compact et plus lourd qu'un béton qui n'aura pas été vibré et qui sera poreux [8].

I.4.2. Caractéristiques du béton durci

A l'état durci la forme du béton ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années. La résistance à la compression et la durabilité sont les deux propriétés prépondérantes du béton à l'état durci. [8]

I.4.2.1. La résistance à la compression

La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. C'est sur elle que se basent le calcul et le dimensionnement d'une structure en béton. Conventionnellement, le béton est classé selon sa résistance mécanique en compression mesurée à 28 jours. Elle est exprimée en Méga pascals (MPa). La norme NF EN 206/CN définit 16 classes de résistance normalisées pour les bétons normaux. [8]

I.4.2.2. La durabilité du béton

La durabilité des structures en béton est un point important dans l'approche normative des ouvrages. Ainsi, les Euro codes (règles européennes de construction) définissent la notion de durée d'utilisation de projet, durée pour laquelle la structure doit être dimensionnée de sorte que sa détérioration n'influe pas ses performances au-dessous de celles qui sont escomptées, compte tenu de l'environnement et du niveau de maintenance prévu. [8]

I.5. TYPOLOGIE DES BETONS

Les bétons sont classifiés selon plusieurs paramètres notamment la masse volumique, la résistance à la compression, les performances recherchées, etc. Cette section présente les types des bétons à savoir le béton ordinaire, les bétons légers, les bétons lourds, les bétons autoplaçants, les bétons de haute performance et les bétons de fibre.

I.5.1. Béton ordinaire

Le béton ordinaire est un mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulats, eau, avec un rapport (E/C) qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre 20 et 50MPa.

I.5.2. Béton léger

Les bétons légers ont une masse volumique d'environ 2100 kg/m^3 . Parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique.

I.5.3. Béton lourd

Le béton lourd est un béton dont la masse volumique est supérieure à 2600 kg/m^3 , les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau.

I.5.4. Béton autoplaçant (BAP)

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

I.5.5. Béton de haute performance (BHP)

Les bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral (E/C) inférieur à 0.4. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants.

I.5.6. Béton de fibre

Le béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres, ce qui permet suivant l'ouvrage de supprimer le treillis soudé traditionnel.

I.5.7. Béton à durcissement rapide

Le béton à durcissement rapide est un béton dont le développement des résistances mécaniques est accéléré, ces bétons permettent la réalisation des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide, ainsi que le décoffrage prématuré ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication [13].

I.6. PATHOLOGIE DU BETON COURANT

Les bétons hydrauliques présentent diverses pathologies à l'état frais comme à l'état durci. Cette section présente les pathologies du béton notamment le ressuage, la ségrégation et le retrait ; ainsi qu'à l'état durci notamment les pathologies mécaniques et les pathologies physico-chimiques [8].

I.6.1. A l'état frais

Cette section présente les pathologies du béton à l'état frais notamment le ressuage, la ségrégation et le retrait.

A. Le ressuage

Le ressuage est le fait que le béton fraîchement malaxé se tasse et une couche d'eau limpide apparaît en surface et s'appelle « eau de ressuage ». Ce phénomène se présente pendant ou après la mise en place du béton et dure jusqu'au début de la prise, c'est-à-dire du processus de durcissement. Il est dû à la différence de masse volumique entre chacun des composants du béton, lesquels tendent de ce fait à se séparer les uns des autres sous l'effet de la pesanteur. Une granularité inadéquate ou un rapport C/E trop élevé favorisent le ressuage. Mais un coffrage lisse et non absorbant peut aussi provoquer la remontée de l'eau. D'autres causes de ressuage peuvent encore être une température trop basse ou un compactage excessif. On peut faire disparaître de telles traces par application d'une couche de mortier.

B. La ségrégation

La ségrégation est le phénomène de séparation des éléments les plus gros du mélange. Ces derniers tendent à descendre. Les granulats placés dans la pâte de ciment sont soumis à leur poids propre, à la poussée d'Archimède (étant donné que la pâte de ciment est considérée comme un fluide) et aux forces de liaison (liées à la viscosité de la pâte). Lorsque les forces de liaison sont faibles (faible viscosité de la pâte), les granulats plus lourds tendent à descendre et les bulles d'air, plus légères tendent à remonter vers la surface. Quand le béton est soumis à des vibrations ou des chocs importants ou répétés, il y a risque de « décohesion » des éléments les plus gros du mélange.

C. Le retrait

La diminution du volume d'un mortier ou d'un béton apparaît à la suite de l'évaporation rapide de l'eau incorporée dans la masse (atmosphère sèche, température élevée, vent chaud) ou par absorption (coffrage poreux, coffrage en bois non traité). L'importance du retrait dépend de la quantité de liant employé, la teneur en eau, la quantité des particules fines. Le retrait chimique est dû au fait que le ciment hydraté occupe un volume plus petit que la somme des volumes du ciment et de l'eau. Le

retrait plastique est causé par l'évaporation de l'eau libre (c'est-à-dire qui n'a pas hydraté le ciment). Le retrait de dessiccation (retrait hydraulique) résulte de l'évaporation de l'eau des pores du béton durci suivie de la contraction des pores par les forces capillaires.

I.6.2. A l'état durci

A l'état durci, les pathologies mécaniques sont les plus prépondérantes. Ainsi, l'origine des pathologies mécaniques est liée aux erreurs de dimensionnement, aux défauts d'exécution (erreur dans le ferrailage, décoffrage prématuré) ou aux utilisations anormales de l'ouvrage (surcharge d'exploitation). Parmi les pathologies mécaniques, on rencontre essentiellement des phénomènes de fissuration liés aux problèmes structurels dont les fissures verticales liées à un ferrailage insuffisant dans les zones les plus sollicitées ainsi que les fissures à 45° causées par un nombre insuffisant de cadres aux extrémités [8].

I.7. PREVENTION DES PATOLOGIES DU BETON

La principale prévention des pathologies du béton est la maîtrise de la compacité et de la porosité du béton. La compacité et la porosité sont des caractéristiques physiques essentielles du béton. Une bonne compacité pour le béton fabriqué sur chantier, entraîne une meilleure résistance aux contraintes mécaniques et une bonne durabilité. A l'inverse, une porosité relativement élevée provoque des risques d'infiltration d'eau, une mauvaise protection des armatures et une moindre résistance du béton aux agents agressifs. La porosité est inférieure à 3% pour les bétons à très faible perméabilité destinés à des ouvrages particuliers tels que radiers, tuyaux, etc. La compacité est améliorée en augmentant la proportion d'éléments fins dans les granulats [8].

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a porté sur l'état d'art du béton en parlant sur les généralités et les constituants du béton, les différentes méthodes de sa formulation, ses caractéristiques à l'état frais ainsi que à l'état durci et ses différentes pathologies ainsi que les préventions.

Chapitre II : METHODOLOGIE

Introduction

Pour mener à bien cette étude sur la contribution à l'amélioration du propriété du béton faites à base des graviers roulés, un travail en deux étapes sera fait, en premier, la présentation de la nature et origine des constituants du béton, la détermination des certaines caractéristiques des différents constituants du béton au travers des essais normalisés notamment l'analyse granulométrique, les masses volumiques apparentes et absolues des granulats, le module de finesse et d'équivalent de sable. Deuxièmement, elle consiste à la présentation d'une part des méthodes de formulation des bétons à étudier, et d'autre part l'ensemble des essais qui permettent de caractériser qualitativement et quantitativement les propriétés du béton à savoir : la consistance du béton et la résistance à la compression à 28 jours.

Dans ce chapitre sont présentés les modes opératoires des différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées de l'ULPGL/Goma.

II .1. NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS

Les constituants utilisés pour la formulation du béton étudié sont d'origines et natures différentes.

II.1.1 Les granulats

Les matériaux granulaires utilisés dans cette étude sont issus d'origine diverses,

- Pour le sable, deux types ont été utilisés dont, le sable de rivière de classe 0/5 , propre de granulométrie différente, provenant d'idjwi et le sable concassé de 0/5 provenant de la carrière de MUGUNGA.
- Pour les graviers, les graviers roulés provenant de la rivière kavinvira dans la ville d'Uvira de classe 5 /20.

II.1.2. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment Hima produit en Uganda, de classe commerciale 32,5MPa, le ciment Nyati produit en Ouganda, de classe commerciale 32,5MPa, le ciment Prime produit au Rwanda, de classe commerciale 42,5MPa.

II.1.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est potable fournie par la Régie de distribution d'eau (REGIDESO en sigle), d'où elle ne contient pas d'impuretés qui peuvent nuire à la qualité du béton.

II.2. CARACTERISATION DES CONSTITUANTS

L'eau et le ciment n'ont pas fait objet d'essais de caractérisation. La détermination des caractéristiques des constituants du béton à savoir les granulats s'est effectuée à travers des essais normalisés sur des échantillons réduits. La réduction des échantillons s'est faite par quartage, opération qui consiste à diviser l'échantillon en quarts afin d'obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble. Les propriétés des granulats nécessaires dans la formulation du béton seront déterminées à l'instar de l'analyse granulométrique, du calcul du module de finesse, de degré de propreté, de la masse volumique absolue et la masse volumique apparente. Cette section présente ainsi le but, le principe, le mode opératoire ainsi que l'expression des résultats des essais effectués.

- **Les granulats**

La série d'essais sur les granulats s'est résumée à la recherche des caractéristiques granulométriques (l'analyse granulométrique par tamis), physiques (masse volumique) et à la résistance au choc (essai de Los Angeles).

II.2.1.. Analyse granulométrique par tamisage

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique qui est normalisé NF P 94-056 [14]. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

A. But

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la répartition pondérale des grains d'un granulats suivant leurs dimensions par traçage de la courbe granulométrique.

B. Principe

- L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.
- Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique [15].

C. Appareillage

L'appareillage utilisé dans la réalisation de l'analyse granulométrique était constitué de :

- La balance et différents poids ;
- Le tamis en mm (20-16-12,5-10-8-6,3-5,4-3,5-1-0,2-0,08) ;
- Le vibreur de tamis.

La figure 5 présente la tamiseuse avec les tamis superposés et l'échantillon des graviers sur le tamis



Figure 5 : la tamiseuse avec les tamis et l'échantillon des graviers

D. Mode opératoire

Le mode opératoire poursuivi dans l'exécution de l'essai d'analyse granulométrique a été effectuée de la manière suivante :

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R_1 la masse de ce refus.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...
- Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m .
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisats cumulés sera déduit.

E. Expressions de résultats

Les résultats obtenus sont exprimés sous forme des courbes dont les abscisses sont les modules ou les dimensions des mailles des tamis et les ordonnées sont soit les pourcentages cumulés des passants

(ou tamisât) soit ceux des refus partiels des différents tamis. Les sables font l'objet de la détermination du module de finesse. Le module de finesse est un coefficient caractérisant un sable, obtenu en divisant par 100 la somme des pourcentages des tamis de dimension (5 ; 2,5 ; 1,25 ; 0,63 ; 0,315 ; 0,16) selon la norme XP P 18-540. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être qualifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. La relation 1 présente le calcul du module de finesse.

$$MF = \frac{1}{100} \sum RC \text{ (en \%)} \text{ des tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5) mm} \quad (1)$$

Lorsque le module de finesse est compris entre :

- 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.

II.2.2. Masse volumique apparente (ρ_{app})

La masse volumique apparente a été déterminée selon les normes NF P 18-554 [16] pour les graviers et NF P 18-555 [17] pour les sables. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

A. But

Souvent appelé improprement densité apparente, la masse volumique apparente a pour but de rendre compte de la masse de matériau contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air interstitiel [18].

B. Principe

L'essai a consisté au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé pesé de masse M.

C. Appareillage

L'appareillage utilisé dans la réalisation de l'essai de masse volumique apparente était constitué de :

- Une moule dont on connaît le volume
- Une spatule pour araser
- Une balance de précision

La figure 6 présente l'échantillon dans la moule pour évaluer sa masse volumique apparente



Figure 6 : Echantillon dans le récipient pour la masse volumique apparente

D. Mode opératoire

Le mode opératoire poursuivi dans l'exécution de l'essai de masse volumique apparente a été conforme à la norme NF P 18-554 [16] et la norme NF P 18-555 [17] :

- Savoir le volume du moule à utiliser
- Peser le moule pour avoir la masse M_1
- Verser lentement le sable ou le gravier entre les deux mains à une distance de 10 cm au-dessus du moule.
- Araser avec la spatule
- Prendre le poids de l'échantillon dans le moule pour avoir la masse M_2 et en déduire la masse M de l'échantillon.
- Ensuite calculer avec la relation

E. Expression de calcul

La masse volumique apparente notée ρ_{app} sera ainsi déterminée à partir de la relation. La relation 2 est le rapport de la masse volumique apparente en g/cm^3 .

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Avec :

- **M** : est la masse sèche de l'échantillon (en g).
- **V** : est le volume du moule (en cm^3).

II.2.3. Masse volumique absolue (ρ_{abs})

L'essai de la masse volumique absolue s'est effectué par la méthode de l'éprouvette graduée conformément à la norme NF P 18-554 [16] pour les graviers et NF P 18-555 [17] pour le sable. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

A. But

La masse volumique absolue d'un granulat permet d'établir un lien entre sa masse et son volume. Elle permet donc de connaître le volume d'un granulat lorsque l'on connaît sa masse et réciproquement [19].

B. Principe

La masse volumique absolue c'est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains.

C. Appareillage

L'appareillage utilisé dans la réalisation de l'essai de masse volumique absolue était constitué de :

- La balance ;
- Pycnomètre.

D. Mode opératoire

Le mode opératoire poursuivi dans l'exécution de l'essai de masse volumique apparente a été conforme à la norme NF P 18-554 et la norme NF P 18-555 [17] :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau ;
- Peser un échantillon sec M de granulats ;
- Introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air,
- Lire le nouveau volume V_2 .

E. Expression de résultat

La masse volumique absolue notée ρ sera ainsi déterminée à partir de la relation 3 en g/cm^3 .

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (3)$$

Avec :

- M : la masse sèche du matériau, (en g).
- V_1 et V_2 : la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du granulat, (en cm^3).

II.2.4. Propreté du sable (ES)

Le sable est un grain minéral dont le diamètre est inférieur à 5mm ; il est utilisé dans le béton afin de combler les vides entre les grains de gravier et la réalisation des mortiers. A l'état naturel, les sables se composent de grains de diamètre inférieur à 5mm, mais ils peuvent aussi se composer des grains organiques comme les argiles de diamètre inférieur à 0,08mm. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

A. But

L'objectif de l'essai d'équivalent de sable consiste à analyser la nature du sable en déterminant le degré de propreté de ce dernier. Ou encore de déceler la présence d'éléments fins dans un sable, c'est à dire de trouver un moyen d'observer et de déterminer la proportion d'élément argileux dans le sable.

B. Principe

Cette analyse permet de vérifier si l'argile se trouve dans les proportions et permettre si le sable est utilisable dans la construction. L'essai de l'équivalent de sable se fait selon la norme NFP 18-598.

C. Appareillage

L'appareillage utilisé dans la réalisation de l'essai de degré de propreté ou équivalent de sable était constitué de :

- La bonbonne de 5 ml de solution
- Le tuyau souple
- Le tube laveur
- Le piston taré
- L'éprouvette avec son bouchon
- L'entonnoir
- La machine agitatrice
- La règle métallique

La figure 7 présente l'échantillon de sable dans l'éprouvette pour la détermination de l'équivalent de sable.



Figure 7 : Eprouvette d'essai d'équivalent sable

D. Mode opératoire

Cet essai se fait à partir des deux essais par l'utilisation de l'agitateur électrique.

Le mode opératoire des essais d'équivalent de sable que nous avons effectués se présente comme suit :

- Préparer l'échantillon ;
- Faire la mise au point de l'appareil ;
- Remplir les éprouvettes de la solution lavante jusqu'au premier trait repère ;
- Verser la quantité de sable nécessaire pour l'essai ;
- Eliminer les bulles d'air, laisser reposer pendant 10 minutes ;
- Boucher les éprouvettes et agiter (mouvement rectiligne sinusoïdal horizontal de 20cm d'amplitude : 90 aller et retour en 30 secondes) ;
- Laver et remplir les éprouvettes à l'aide du tube laveur jusqu'au dernier trait repère ;
- Laisser reposer pendant 20 minutes ;
- Descendre lentement le piston taré, l'immobiliser au contact du sable ;
- Mesurer h_1 et h_2 qui sont respectivement la hauteur du sable propre et la hauteur du Sable propre plus flocculat ;

E. Interprétation des résultats et qualité du sable

L'équivalent sable est déterminé par les relations (4, 5, 6)

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \quad (4)$$

$$ES_p = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \quad (5)$$

$$ES = \frac{ES_v + ES_p}{2} \quad (6)$$

Avec :

- h_1 : Hauteur de sédiment + flocculat (fines en suspension) (en cm).
 - h_2 : Hauteur de sédiment (en cm).
 - h'_2 : Hauteur lue avec le piston (en cm).
 - ES_v : Equivalent de Sable Visible (en %).
 - ES_p : Equivalent de Sable par Piston (en %).
 - ES : Equivalent de Sable (en %).
- Pour l'essai d'équivalent de sable à vue inférieur à 65% ($ES_v < 65\%$) et l'essai d'équivalent de sable au piston inférieur à 60% ($ES_p < 60\%$), cela mène à des conclusions telles que le sable est argileux. Il y a alors risque de retrait ou de gonflement. Dans ce cas, il s'agit d'un sable à rejeter pour le béton de qualité ;
 - Pour $65\% < ES_v < 75\%$ et $60\% < ES_p < 75\%$: il s'agit d'un sable légèrement argileux de propreté admissible pour le béton de qualité courante quand le retrait n'a pas des conséquences notables sur la qualité du béton ;
 - Pour $75\% < ES_v < 85\%$ et $70\% < ES_p < 80\%$: il s'agit d'un sable propre à faible proportion des fines argileuses. C'est donc un sable convenant parfaitement pour le béton de haute qualité ;
 - $ES_v \geq 85\%$ et $ES_p \geq 80\%$: il s'agit d'un sable très propre. L'absence des fines argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

II.2.5. Résistance au choc

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

A. Principe

Ce mode opératoire est issu de l'essai américain défini par la norme ASTM C.131.55 L [20] qui permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm–10/14 mm –10/25 mm–16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre. Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. Si P est le matériau soumis à l'essai, p le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité: $CLA = 100 \times p / P$ Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, "coefficient Los Angeles" du matériau [15].

B. Appareillage

L'appareillage utilisé dans la réalisation de l'essai de la résistance aux chocs ou encore essai de Los Angeles était constitué de :

- Un jeu de tamis de dimension convenable, leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm ;
- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage ;
- Une machine Los Angeles comprenant : Des charges de boulets (constituées de boules sphériques pesant 437.4 g en acier Z 30C ($\varnothing = 47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), un moteur d'au moins 0,75kw assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours / mm, un bac destiné à recueillir les matériaux après essai, un compte tour de type relatif arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulus.

La figure 8 suivante représente le tambour de Los Angeles, qui est muni d'un tableau de commande et en bas d'un bac pour recueillir l'échantillon sortant dans le tambour.



Figure 8 : Tambour de Los angeles

C. Mode opératoire

- La quantité envoyée au laboratoire sera au moins égale à 15000g
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie en commençant par le tamis le plus grand ;
- Laver le matériau tamisé et le sécher à 105°C jusqu'à l'obtention de la masse constante ;
- Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie (voir tableau 4 suivant).

Tableau 4 : Classification selon la classe granulaire

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 –6,3			3080 ±20	5000 ±2
6,3 –10		9	3960 ±25	5000 ±2
10 –14		11	4840 ±25	5000 ±2
10-25	10-16	11	4840 ±25	3000
	16-25	11	4840 ±25	2000
16 -31,5	16 –25	12	5280 ±25	2000
	25 –31,5	12	5280 ±25	3000
25 -50	25 –40	12	5280 ±25	3000
	40 -50	12	5280 ±25	2000

- Remplacer le couvercle ;
- Faire effectuer à la machine 500 rotations sauf pour la classe 25/50 où l'on effectue 1000 rotations à une machine régulière comprise entre 30 et 33 tours/mm ;
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac,
- Tamiser l'échantillon provenant du tambour avec le tamis de 1,6 mm ;
- Peser le refus.

D. Expression de résultats

Soit M la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments de dimension inférieure à 1,6 mm produit au cours de l'essai. La fragmentation au choc s'exprime par le coefficient Los Angeles (LA) de l'expression 7:

$$LA = \frac{m}{M} \times 100 \quad (7)$$

LA ne doit pas excéder 45 pour les granulats pour le béton. Pour des granulats utilisés dans la construction de chemin de fer, LA doit être compris entre 15 et 25. Pour les granulats utilisés dans la construction des routes LA doit être compris entre 25 et 35.

II.3. METHODE DE FORMULATION

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques, la mise au point du béton peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux : les données du projet (caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferrailage, etc.), les données du chantier (matériels de mise en œuvre, conditions climatiques, etc.), les données liées aux propriétés du béton (maniabilité, compacité, durabilité, aspect, etc.) [21]. Ce travail a été fait avec la méthode de Bolomey dont nous allons présenter les principes dans les lignes suivantes.

II.3.1. Présentation de la méthode et principe

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2.5 et 2.7 g/cm^3 .

II.3.2. Principe

On se réfère aux courbes granulométriques des constituants secs (voir figure 9). Un mélange quelconque de ces constituants a lui aussi une courbe granulométrique. Le problème est donc de déterminer parmi l'infinité de courbes représentant ces mélanges, une qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter. Cette courbe sera nommée 'courbe optimale' [6]. D'où le principe de la

méthode qui consiste à la détermination de la courbe optimale du mélange des éléments secs, à la recherche les pourcentages de ces constituants permettant de réaliser un mélange sec de la sorte que la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale et la déduction la composition d'un mètre cube de béton.

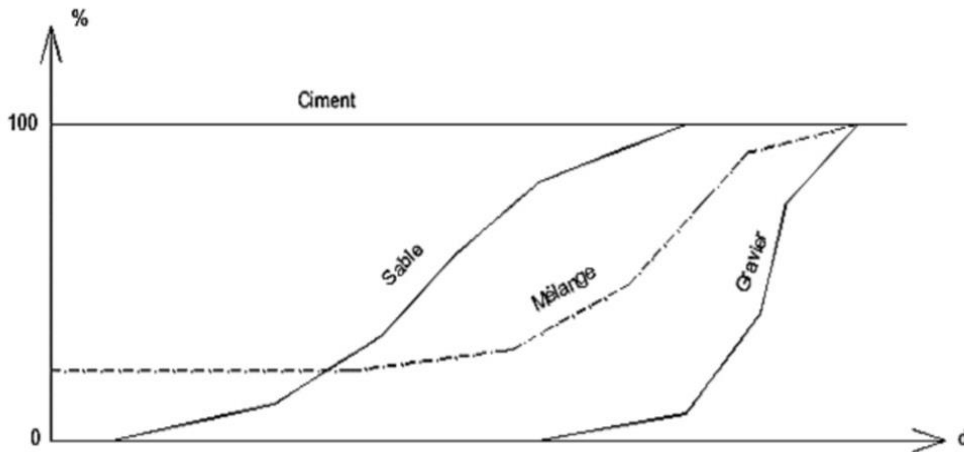


Figure 9 : Courbe granulométriques du mélange sec

II.3.3. Détermination de la courbe optimale

Par une formulation appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique [22]. La formule de base (8) présente le pourcentage des grains passants à la passoire d . L'axe des abscisses présente les diamètres des tamis, gradués proportionnellement à d (segments proportionnels aux racines carrées des dimensions des tamis correspondants). Et l'axe des ordonnées présente le pourcentage du tamisât. La figure 10 présente la courbe optimale du mélange.

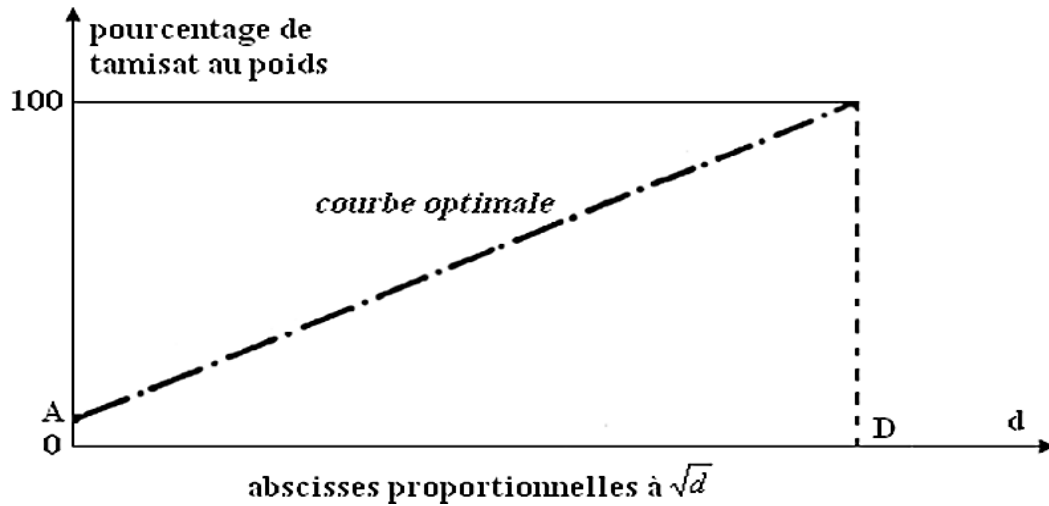


Figure 10 : courbe optimale du mélange

$$P = A + (100 - A)\sqrt{\frac{d}{D}} \quad (8)$$

Avec :

- P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : diamètre du plus gros grain, Cette équation est de la forme $y = ax + b$, eu égard au mode de graduation de l'axe des abscisses, elle représente la droite qui passe par les points :

$$\begin{cases} d = 0 \\ D = A \end{cases} \text{ Et } \begin{cases} d = D \\ P = 100 \end{cases}$$

Il suffit donc de déterminer A et D.

• Valeurs de A

(A) est un point d'une courbe granulométrique qui représente le pourcentage des éléments très fin contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton.

Le tableau 5 nous donne les valeurs de A en fonction de :

- ✓ La consistance souhaitée pour le béton ;
- ✓ La provenance des granulats.

Tableau 5 : Résumé les valeurs de A. Source : GHOMARI Fouad

Consistance de béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Sec (béton vibré)	6 à 8	8 à 10
Plastique (non vibré)	10	12 à 14
Mou (béton coulé)	12	14 à 16

- **La valeur de D**

Elle est comprise entre 16 et 20mm. Pour l'obtenir, il suffit de prolonger l'avant dernier tronçon de la courbe du plus gros granulat. On remarque que cette construction n'est possible que lorsque l'on se trouve en présence d'une queue de granulométrie (cas très fréquent), si le point était situé au-delà de 1/3 de l'intervalle 16-20 ou à droite de 20 c'est 20 qui serai la valeur retenue D. La figure 11 ci-dessous illustre cette théorie.

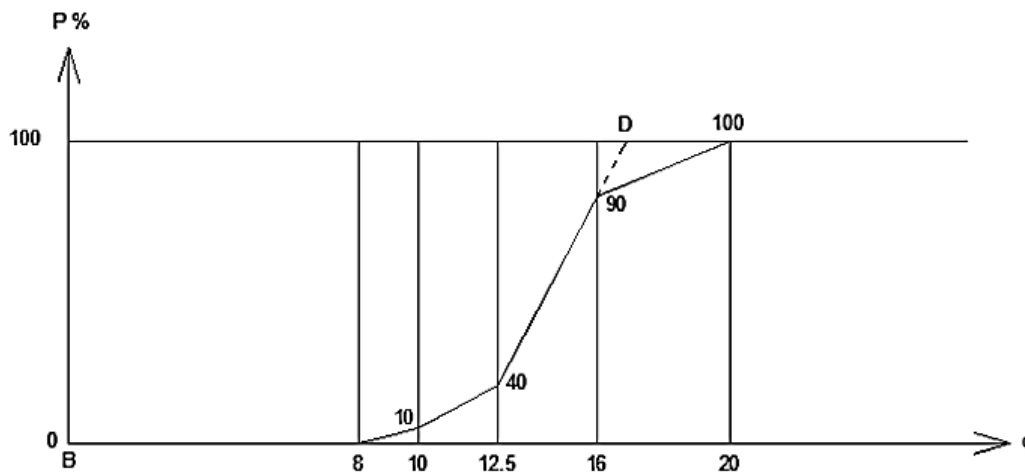


Figure 11 : Position du point D sur la courbe optimale de BOLOMEY

II.3.4. Calcul des pourcentages des constituants

Dans cette section il est présenté le pourcentage de chaque constituant entrant dans la formulation du béton.

II.3.4.1. Cas du ciment

Le pourcentage du ciment est donné par l'expression 9 :

$$C(\%) = \frac{\text{masse du ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \times 100 \quad (9)$$

II.3.4.2. Cas des granulats

Une méthode graphique nommée « Méthode de Josiel » est appliquée. Cette dernière est universelle, applicable à toutes les courbes optimales et tous les modes de graduation des axes.

Si on considère le cas le plus simple, mélange de deux granulats (d_1/d_2) et (d_3/d_4) ; en traçant leurs courbes granulométriques, il présente 3 cas seulement qui sont possibles sur le diagramme, notamment :

- d_2 et d_3 coïncident : on a une juxtaposition des deux granulats ;

- d_3 à gauche de d_2 : superposition partielle ;
- d_3 à droite de d_2 : discontinuité de deux granulats.

La méthode de Josiel repose sur le tracé d'une parallèle à l'axe des coordonnées prenant successivement les 3 cas :

A. Juxtaposition des deux courbes : la verticale ici est l'ordonnée correspondant à d_2 d_3 comme illustré à la figure 12. Cette verticale coupe la courbe optimale en un point M qui, reporté en N sur l'échelle des ordonnées détermine deux segments :

- Le segment ON : pourcentage des granulats d_1 et d_2 ou pourcentage des composants de dimension inférieure à d_2 .
- Le segment N100 : c'est le pourcentage des granulats d_3 et d_4 , ou pourcentage de tout ce qui est supérieur à d_2 .

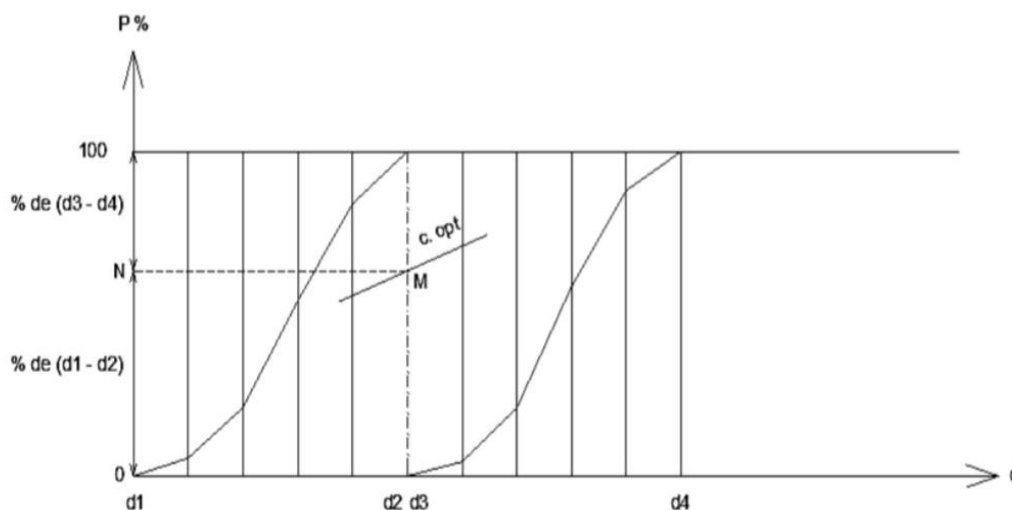


Figure 12 : Verticale pour la juxtaposition des courbes

B. Superposition partielle des deux courbes : pour ce cas, la verticale est placée à l'abscisse « d_0 » telle que pour cette dimension de tamis le pourcentage de tamisât du gros élément soit égal au pourcentage de refus du plus petit ($ab = cd$). M et N ont la même signification que précédemment. Il est important de placer avec précision la verticale « d_0 » car l'ordonnée du point d'intersection de la courbe optimale et de cette verticale dépend de son abscisse. Le procédé consiste à déplacer une règle jusqu'à ce que les deux segments apparaissent égaux. La figure 13 suivante illustre ce cas.

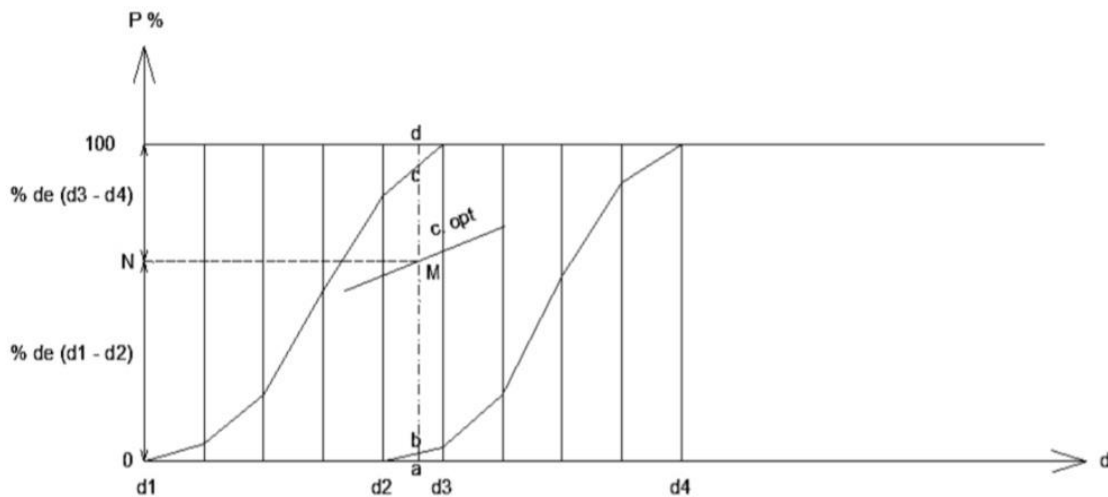


Figure 13 : Verticale de la superposition partielle des courbes

C. Discontinuité entre les deux courbes :

la verticale est au point d'abscisse présenté par l'expression 10.

$$d_0 = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (10)$$

Avec d_1 et d_2 les pourcentages des granulats

II.3.5. Détermination de la quantité d'eau

On ne s'est préoccupé que des éléments secs ; mais le béton contient aussi de l'eau, il nous faut alors déterminer cette quantité.

Il n'existe pas de méthode rigoureuse pour cette détermination ; il est donc nécessaire de faire un calcul en fonction des relations empiriques telles que :

1. Petits constituants ($D < 0.16$ mm) : la quantité d'eau est exprimée par la relation 11

$$E_1 = 0.23 * \text{poids des éléments secs} < 0.16 \quad (11)$$

Avec E_1 : Quantité d'eau correspondant aux petits constituants présenté à l'expression 11

2. Gros éléments ($D > 0.16$ mm) : la quantité d'eau est exprimée par la relation 12

$$E_2 = \frac{K \times \text{poids des éléments secs} \geq 0.16}{1.17 \times \sqrt[3]{0.16 \times D'}} \quad (12)$$

S'il s'agit de passoire au lieu de tamis, le coefficient 1,17 sera remplacé par 1.

Avec :

- E_2 : Quantité d'eau correspondant aux gros éléments présenté à l'expression 11.
- D : Diamètre du plus gros granulat
- K : coefficient dont les valeurs sont reprises dans le tableau 6

Tableau 6 : Valeurs du coefficient K

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	0.08	0.095
Béton armé	0.09 à 0.095	0.1 à 0.11
Béton coulé	0.1 à 0.11	0.12 à 0.13

La quantité d'eau doit être exprimée en pourcentage comme pour le ciment et les granulats, Le rapport E/C est important dans la composition du béton ; cette valeur doit se rapprocher le plus de 0.5.

L'essai de gâchée, fournit une valeur plus précise. Il s'agit d'introduire dans une bétonnière des quantités de constituants secs proportionnels à ceux calculés, après leur mélange à sec, on ajoute l'eau progressivement jusqu'à ce que la consistance voulue soit obtenue.

La quantité d'eau qui y correspond est multipliée par le facteur de réduction pour déterminer la quantité d'eau gâchage pour 1m³.

L'expérience montre que si la valeur absolue de la différence entre la quantité réelle et la quantité calculée est inférieure ou égale à la moitié du volume trouvé ; les résultats trouvés sont conservés sans modification. Dans le cas contraire, les calculs sont faits avec la valeur trouvée par l'essai de gâchage avec comme l'illustre l'expression 13.

$$E(\%) = \frac{\text{quantité réelle d'eau gâchage}}{\text{masse des éléments secs}} \times 100 \quad (13)$$

Avec $E(\%)$: La quantité d'eau en %

Le calcul du poids des éléments secs s'effectue en supposant connue la densité apparente du béton.

La masse des éléments sec = masse totale - masse de l'eau de gâchage ;

La masse des granulats = masse des éléments secs - masse du ciment ;

La masse de chaque granulat = % cumulé * masse des granulats.

Cette méthode donne des bétons riches en éléments fins, donc maniable, susceptibles de rester bruts de décoffrage.

II.4. CARACTERISATION DU BETON

La caractérisation des bétons consistera à la détermination de la consistance du béton à l'état frais et de la résistance à la compression du béton à l'état durci.

II.4.1. Affaissement au cône d'Abrams du béton à l'état frais

Il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm.

II.4.1.1. But de l'essai

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams a pour but de caractériser la maniabilité ou l'ouvrabilité du béton frais en vue de classer le béton selon sa consistance et d'en définir les utilisations.

II.4.1.2. Principe de l'essai

Le moule tronconique étant légèrement huilé et fixé sur la plaque d'appui, on le remplit en trois couches d'égale hauteur, mises en place par piquage à raison de 25 coups par couche à l'aide de la tige de piquage. Après avoir arasé le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure exprimée en cm, est réalisée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage [23].

II.4.1.3. Mode opératoire

L'essai de maniabilité du béton comporte : un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure ; une plaque d'appui ; une tige de piquage et une règle graduée. Le déroulement de l'essai suit les étapes suivantes :

- ✓ Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- ✓ Le cône est rempli avec du béton frais en trois couches et chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- ✓ Le cône est arasé avec une tige ;
- ✓ Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes ;
- ✓ Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près.

La figure 14 illustre l'essai sur l'affaissement du béton



Figure 14 : Essai sur l'affaissement du béton

II.4.1.4. Expression des résultats

La norme (NF P 18-305) définit les classes d'affaissement, Et le tableau 7 nous présente les différentes classées possibles en fonction de la valeur trouvée lors de l'essai.

Tableau 7 : Classe de résistance [8]

Affaissement (cm)	Classe selon la consistance	Domaine d'utilisation
0 à 4	Ferme (F)	Béton de propreté, fondation non armée, voirie
4 à 9	Plastique (P)	Semelles coffrée, mur de soutènement, plancher, dallage, poutre, poteau, voile
10 à 15	Très plastique (TP)	Fondation coulée en fouille, pieu voile de faible épaisseur, paroi moulée
16 \geq	Fluide (F)	Pieu, paroi moulée

II.4.2. Essai de résistance en compression du béton à l'état durci

L'essai de résistance à la compression se fait après 28 jours d'immersion conformément à la norme NF EN 12390-7.

II.4.2.1. But de l'essai

Tel que son nom l'indique, l'essai de résistance en compression a pour but de déterminer la résistance en compression du béton durci.

II.4.2.2. Principe de l'essai

L'essai de résistance en compression consiste à déterminer la résistance en compression des éprouvettes cylindriques de béton au moyen de la presse électrique. La presse en question est électrique à doubles manomètres et grands plateaux.

II.4.2.3. Mode opératoire

Le mode opératoire s'est déduit de la Norme en vigueur et se présente comme suit :

- Nettoyage de l'éprouvette à l'aide de la lame
- Pesage de l'éprouvette en utilisant la balance de précision
- Centrage de l'éprouvette avec précision sur la partie inférieure de la presse avec une erreur maximale de 1% de son diamètre
- Mise en charge à une vitesse de montée comprise entre 4 kN/s et 20kN/s

II.4.2.4. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de résistance en compression du béton sont obtenus à l'aide de la relation représenté par l'expression 14 :

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Avec :

- R_{cj} : résistance à la compression à j jours en MPa ou N /mm²
- F : valeur de la charge de rupture en N
- A : section de l'éprouvette cylindrique en mm²

CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre, il a été question de présenter la méthodologie utilisée pour la documentation, la nature, l'origine et la caractérisation des constituants, la caractérisation du béton ainsi que la formulation du béton à base des ciments Nyati, Hima et Prime par la méthode de Bolomey. Les différents essais qui ont été effectués sur les matériaux (sable et gravier) et ceux effectués sur le béton sont également présentés.

Chapitre III : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours des différents essais effectués au cours des travaux de laboratoire. Il s'agit en premier lieu des caractéristiques des constituants du béton notamment des granulats (sable roulé, sable concassé et gravier concassés) et Deuxièmement, de la formulation des bétons ainsi que les caractéristiques du béton à l'état frais (la consistance) et l'état durci (la résistance à la compression à 28 jours).

III.1. PRESENTATION DES CONSTITUANTS

Les constituants qui ont été utilisé pour la formulation du béton sont les ciments, l'eau, le sable et les graviers.

III.1.1. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton est l'eau potable fournie par la REGIDESO.

III.1.2. Les ciments

Les différents ciments utilisés sont le ciment Hima 32.5N, produit en ouganda, le ciment Nyati 32.5N produit en ouganda et le ciment Prime 42.5 N produit au rwanda illustré sur la figure 15.



Figure 15 : ciment Nyati, Prime et Hima

III.1.3. Le sable

Deux types de sable ont été utilisé pour la formulation du béton :

- Le sable roulé tiré de la rivière en provenance d'Idjwi présenté à gauche sur la figure 16.
- Le concassé en provenance de la carrière de Mugunga présenté à droite sur de figure 16.



Figure 16 : Sables concassés et sables roulés

III.1.4. Les graviers

Les graviers utilisés sont les graviers roulés tiré de la rivière Kavinvira dans la ville d'Uvira, ils sont présentés sur la figure 17.

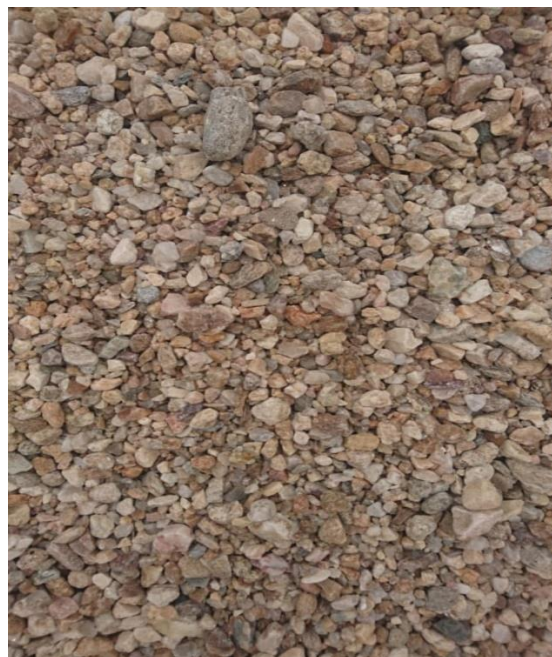


Figure 17 : Graviers roulés

III.2. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS

Dans cette partie, il sera présenté les résultats de la caractérisation des différents matériaux en commençant par le ciment et ensuite les granulats ayant servis dans la formulation.

III.2.1. Le ciment

- Masse volumique absolue

Le tableau 8 présente les différentes masses volumiques absolues des ciments utilisés.

Tableau 8 : Masse volumique des ciments utilisés

Ciments	Masse volumique absolue (g/cm^3)
Hima	2,997
Nyati 32.5	2,891
Prime 42.5	2.8

A la lecture du tableau 8, on remarque que le ciment Hima possède la masse volumique absolue la plus élevée, soit $2.997 g/cm^3$.

III.2.2. Granulats

A. Composition granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée sur les graviers roulés, le sable roulé et le sable concassé. La composition granulométrique est représentée respectivement à la figure 18, 19 et 20 tandis que les répartitions granulométriques sont reprises en Annexe 1 au tableau 40, tableau 41 et tableau 42.

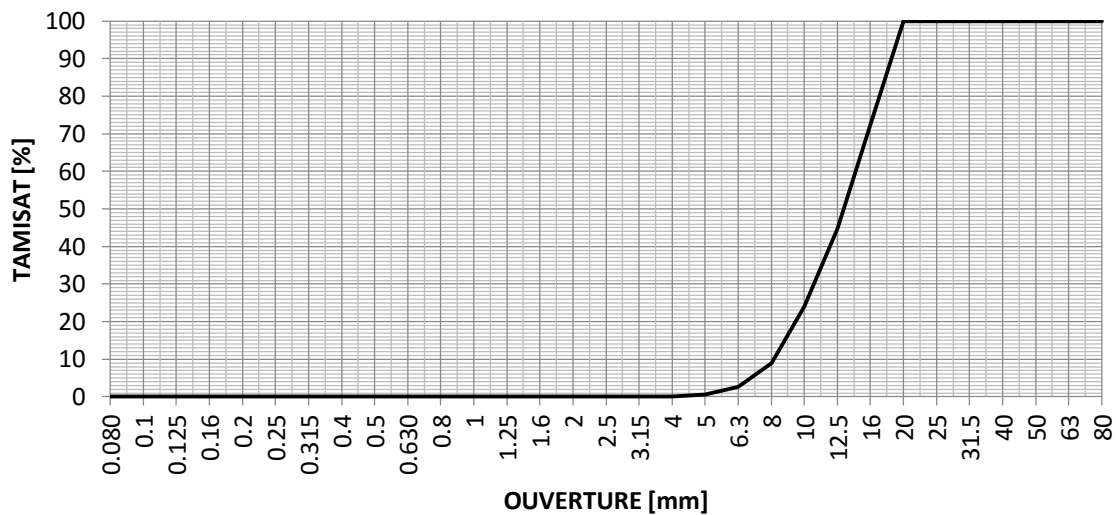


Figure 18 : Courbe granulométrique gravier roulé

La figure 18 montre que le gravier roulé utilisé est de classe 5/20 et de concavité tournée vers le haut.

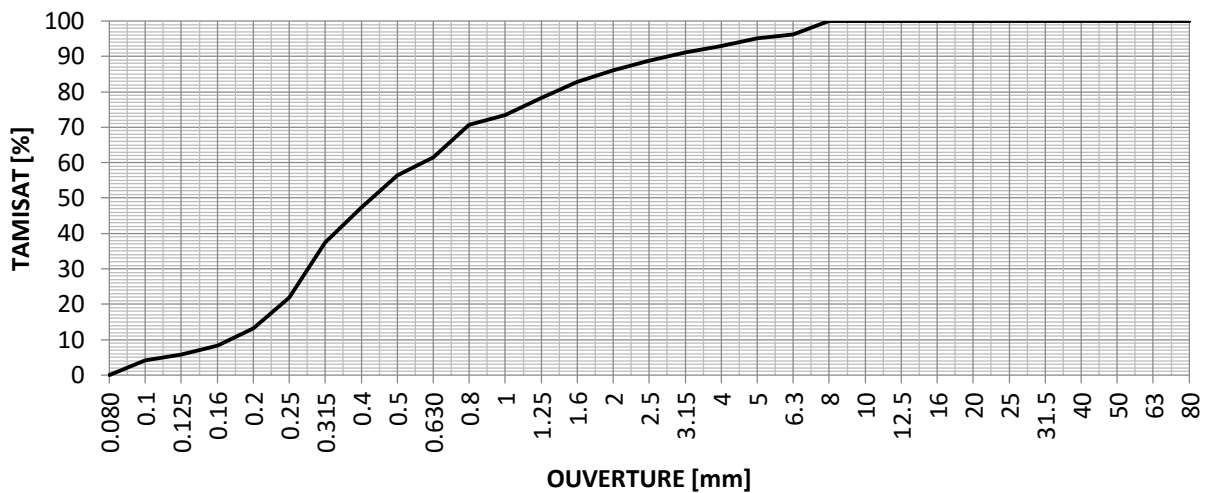


Figure 19 : Courbe granulométrique du sablé roulé

La figure 19 montre que le sable roulé utilisé est de classe 0/5 et a la concavité de la courbe granulométrique tournée vers les deux sens avec un module de finesse de 2.3, cela atteste que pour le sable roulé nous sommes en présence d'un sable préférentiel.

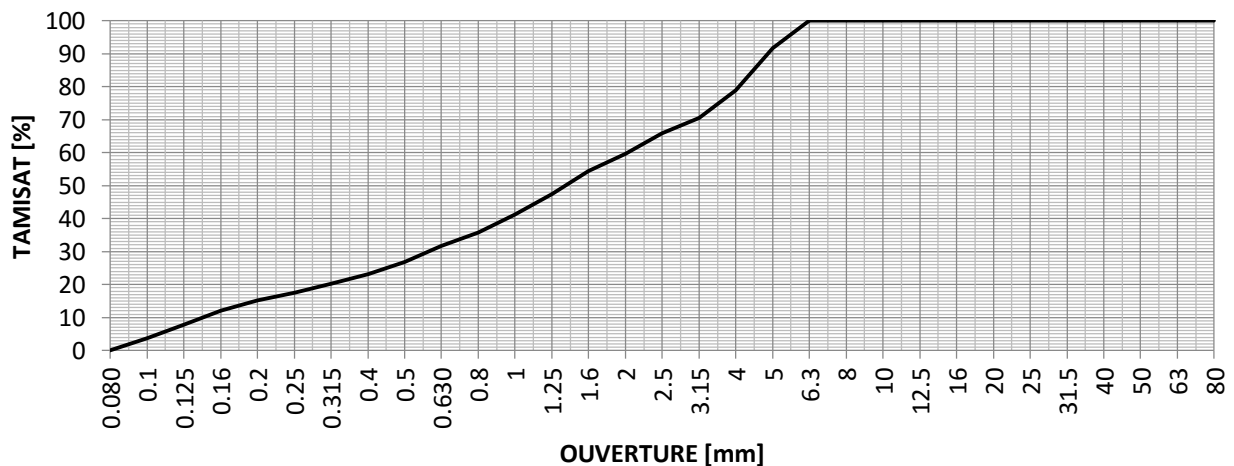


Figure 20 : Courbe granulométrique du sablé concassé

La figure 20 montre que le sable roulé utilisé est de classe 0/5 et a la concavité de la courbe granulométrique tournée vers le haut et de module de finesse 3.3. Cela atteste que le sable concassé est un peu grossier, il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

B. Finesse du sable

Les résultats du module de finesse sur le sable roulé et concassé viennent d'être présenté ci-haut.

- **Masses volumiques des granulats**

Les masses volumiques, sont trouvées suivant les prescriptions de la norme NF P 18-554 [24]. Les résultats des masses volumiques du sable roulé, du sable concassé et du gravier roulé sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Masse volumique apparente et absolue

Matériaux	Masse volumique apparente en $\frac{g}{cm^3}$	Masse volumique absolue en $\frac{g}{cm^3}$
Sable roulé	1.58	2.54
Sable concassé	1.62	2.6
Gravier roulé	1.41	2.55

Le tableau 9 renseigne que la masse volumique apparente du sable concassé a comme valeur 1.62 g/cm^3 , c'est une valeur la plus élevée de toutes les masses volumiques apparentes des sables utilisés dans cette étude, et en ce qui concerne la masse volumiques absolue, celle du sable concassé qui a comme valeur 2.6, est la plus élevée de toutes les masses volumiques absolue des sables utilisés, toute fois toutes les valeurs des masses volumiques absolue des graviers s'inscrivent dans la plage de valeur préconiser par la méthode Bolomey qui est de 2.5 à 2.7 $\frac{g}{cm^3}$.

- **Degré de propreté du sable**

Les résultats de l'essai d'équivalent sable sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Résultats de l'essai équivalent sable

Equivalent sable en %		
	Sable roulé	sable concassé
A piston	78.9	83.0
Visuel	84.9	86.8
Moyen	81.9	84.9

Le tableau 10 renseigne que nous sommes face à deux types de sable de bonne qualité chacune pour la confection du béton car ayant le module de finesse $E_s \geq 80\%$.

- **Résistance au choc (Los Angeles)**

La résistance aux chocs ou les coefficients Los Angeles pour les graviers roulés est présenté dans le tableau 11.

Tableau 11 : coefficient Los Angeles gravier tout-venant et sable concassé

Matériaux	Coefficient Los Angeles (%)
Gravier tout-venants	51,4

La résistance au choc a donné une valeur de 51,4%. Nous remarquons que le coefficient Los Angeles est supérieur à 45%, ce qui nous amène à conclure que ce gravier est très léger pour la confection du béton.

III.3. FORMULATION DU BETON

Dans cette partie sera présenté la formulation du béton respectivement à 350 kg/ m³ et à 400 kg/ m³.

III.3.1. Dosage en ciment (350 kg)

Pour 1m³ de béton on :

- Masse du ciment : 350 kg
- Masse total des éléments secs : 2200 kg

III.3.1.1. Pourcentage des constituants du béton à base de graviers roulés et sable roulé

1. Ciment

Masse du ciment : 350 kg/m³, l'application de la formule 2 permet d'écrire que

$$C (\%) = \frac{350}{2200} \times 100 = 15,9\%$$

2. Graviers

Le squelette granulaire du béton, déterminé par l'abaque présenté en annexe 2 au tableau 28 et dont la courbe optimale présentée en annexe 7 à la figure 13, donne les résultats suivants :

- La composition granulaire est ; S + C = 81% et G = 19% ;
- Le sable sera : S = 81% - 15.9 % = 65.1 %.

3. Eau

1. D<0.16 mm

- Ciment : 350kg
- A partir du tamis de 0.16, le tamisât est de 11.2 de 65.1
On a 7.3% de 2200 = 160.6 kg
- Le total est : 350 +160,6 Soit 510.6 kg
- Le total à mouiller est : 510.6 * 0.23. Soit 117.4 kg

2. D > 0.16 mm

- K = 0.09 ; d1 = 0.16 mm ; d2 = 20 mm
- Poids total des éléments secs : 2 200 kg
- Dont inférieurs à 0.16 : 510.6 kg
- Restent supérieurs ou égaux à 0.16 mm : 2 200kg – 510.6 kg, soit 1689.4 kg
- Donc Eau = $\frac{0,09 \times 1689,4}{1,17 \times \sqrt[3]{0,16 \times 20}} = 88,4\text{kg}$
- Soit total 117.4 kg + 88.4kg = 205,8 kg

3. Pourcentage eau

$$E (\%) = \frac{205,8}{2200} \times 100 = 9,3 \%$$

- **Composition pour Ciment HIMA 32.5N**

Le tableau 12 reprend la composition du béton avec le ciment HIMA 32.5 N.

Tableau 12 : Composition du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m³ avec le Ciment Hima 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composant en valeurs absolue	Masse Volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	15.9	2.997	5.31	2.27	14.55	330.59	1	350
S	65.1	2.5	26.04		59.56	1353.53	1,58	856,66
G	19	2.55	7.45		17.38	395.04	1,41	280,17
E	9.3	1	9.30		8.51	193.36	1	193,36
Totaux	109.3	X	48.10		100.0	2272.52		

- **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 3.99 kg d'eau
- On a utilisé 1.87 kg
- Il est resté 2.12 kg
- Pour 1m³ il a fallu 329.7 kg
- On a 329.7 kg – 205.8 kg = 123.9 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 123.9 kg > 5 kg, les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{329.7}{2098.54} \times 100 = 15,7\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{350}{2098.54} \times 100 = 16,6 \%$

Le tableau 13 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Hima 32.5N.

Tableau 13 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m³ avec le ciment Hima 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	16.6	2.997	5.54	2.13	14.26	303.31	1	350
S	65.1	2.5	26.04		55.93	1189.48	1,58	752,83
G	19	2.55	7.45		16.32	347.16	1,41	246,21
E	15.7	1	15.70		13.49	286.86	1	286,86
Totaux	116.4	X	54.73		100.0	2126.81		

- **Composition pour NYATI 32.5N**

Le tableau 14 reprend la composition du béton avec le ciment Nyati 32.5 N.

Tableau 14 : Composition du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m³ avec le ciment Nyati 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	$\times 6$		7/8
C	15.9	2.891	5.50	2.26	14.55	329.26	1	350
S	65.1	2.5	26.04		59.56	1348.08	1,58	853,21
G	19	2.55	7.45		17.38	393.45	1,41	279,04
E	9.3	1	9.30		8.51	192.58	1	192,58
Totaux	109.3	X	48.29		100.0	2263.37		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 3.99 kg d'eau
- On a utilisé 1.87 kg
- Il est resté 2.12 kg
- Pour 1m³ il a fallu 329.7 kg
- On a 329.7 kg – 205.8 kg = 123.9 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 123.9 kg > 5 kg, les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{329.7}{2098.54} \times 100 = 15,7\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{350}{2098.54} \times 100 = 16,6$

Le tableau 15 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Hima 32.5N.

Tableau 15 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m³ avec le ciment Nyati CEM IV 32.5N

Compositi on	Compositi on en Poids	Masse volumiq ue absolue	Compositi on en valeur absolue	Masse volumiq ue du béton	Poids en %	Compositi on en Poids	Masse volumiq ue apparent e	Compositi on en volume apparente
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			(2/3)	($\Sigma 2 / \Sigma$ 4)	2/ Σ 2	(5*6)		(7/8)
C	15.85	2.997	5.28862	2.1222	13.153 5	350	1	350
S	50.09	2.5	17.3322		41.568 5	882.164	1.58	558.33
G	34	2.55	13.6		28.215 8	598.794	1.41	424.67
E	20.56	1	20.56		17.062 2	362.094	1	362.094
TOT	120.5		56.7808		100			1932.095

- **Composition pour Prime CEM 42.5N**

Le tableau 16 reprend la composition du béton avec le ciment prime 42.5 N.

Tableau 16 : Composition du béton dosage (sable roulé) 350 kg/m³ avec le prime 42.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en %	Compositi on en poids	ρ_{app}	Compositi on en valeurs apparents
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2/ $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	15.9	2.8	5.68	2.26	14.55	328.04	1	328.041
S	65.1	2.5	26.04		59.56	1343.11	1.58	850.0704

G	19	2.55	7.45		17.38	392.00	1.41	278.0132
E	9.3	1	9.30		8.51	191.87	1	191.873
Totaux	109.3	X	48.47		100.0	2255.02		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau
- On a utilisé 2.84 kg
- Il est resté 2.16 kg
- Pour 1m³ il a fallu 335.9 kg
- On a 335.9 kg – 205.8 kg = 130.1 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 130.1 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{335.9}{2085.1} \times 100 = 16,1\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{350}{2085.1} \times 100 = 16,7\%$

Le tableau 17, reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Prime 42.5N.

Tableau 17 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 350 kg/m³ avec le Prime CEM II 42.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolues	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	16.7	2.8	5.96	2.10	14.38	302.34	1	302.3431
S	64.3	2.5	25.72		55.38	1164.11	1.58	736.7793

G	19	2.55	7.45		16.37	343.98	1.41	243.9597
E	16.1	1	16.10		13.87	291.48	1	291.4804
Totaux	116.1	X	55.24		100.0	2101.92		

III.3.1.2 Pourcentage de constituants du béton à base de gravier roulé et sable concassé

1. Ciment

Masse du ciment : 350 kg/m³, l'application de la formule 2 permet d'écrire que

$$C (\%) = \frac{350}{2200} \times 100 = 15,9\%$$

2. Graviers

Le squelette granulaire du béton, déterminé par l'abaque présenté en annexe 2 au tableau 29 et dont la courbe optimale représentée en annexe 8 à la figure 14, donne les résultats suivants :

- La composition granulaire est ; S + C = 82 % et G= 18%
- Le sable sera : S = 82% - 15.9 % = 66.1 %

3. Eau

D < 0.16 mm

- Ciment : 350kg
- A partir du tamis de 0.16, le tamisât est de 5.5 % de 66.1
On a 3.6355% de 2200 = 80 kg
- Le total est : 350 + 80 Soit 430 kg
- Le total à mouiller est : 430 * 0.23. Soit 99 kg

4. D > 0.16 mm

- K = 0.09 ; d1 = 0.16 mm ; d2 = 20 mm
- Poids total des éléments secs : 2 200 kg
- Dont inférieurs à 0.16 : 430 kg
- Restent supérieurs ou égaux à 0.16 mm : 2 200kg – 430 kg, soit 1770 kg
- Donc Eau = $\frac{0,09 \times 1770}{1,17 \times \sqrt[3]{0,16 \times 20}} = 92.6 \text{ kg}$
- Soit total 92.6 kg + 99 kg = 191.6 kg

5. Pourcentage eau

$$E (\%) = \frac{191.6}{2200} \times 100 = 8.7 \%$$

• **Composition pour Ciment HIMA 32.5N**

Le tableau 18 reprend la composition du béton avec le ciment Ciment HIMA 32.5 N et le sable concassé.

Tableau 18 : Composition du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec cimerwa de classe CEM II 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/ \Sigma 4$	2/ $\Sigma 2$	$\times 6$		7/8
C	15.9	2.997	5.31	2.37	14.63	346.30	1	350
S	66.1	2.66	24.85		60.81	1439.66	1,62	888,67
G	18	2.55	7.06		16.56	392.04	1,41	278,04
E	8.7	1	8.70		8.00	189.49	1	189,49
Totaux	108.7	X	45.91		100.0	2367.48		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5.42 kg d'eau
- On a utilisé 3.52 kg
- Il est resté 1.9 kg
- Pour 1m³ il a fallu 295.4 kg
- On a 295.7 kg – 191.6 kg = 104.1 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 104.1 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{295.4}{2181.7} \times 100 = 13,5\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{350}{2181.7} \times 100 = 16,04$

Le tableau 19 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Hima 32.5N et le sable concassé.

Tableau 19 : Composition corrigée de la formulation du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le ciment Hima de classe 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³		g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$			7/8
C	16.04	2.997	5.35	2.24	14.11	315.99	1	350
S	66.1	2.66	24.85		58.17	1302.19	1,62	803,82
G	18	2.55	7.06		15.84	354.61	1,41	251,49
E	13.5	1	13.50		11.88	265.96	1	265,96
Totaux	113.64	X	50.76		100.0	2238.75		

- **Composition pour NYATI CEM IV 32.5N**

Le tableau 20 reprend la composition du béton avec le ciment Nyati 32.5 N et le sable concassé.

Tableau 20 : Composition du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le ciment Nyati 32.5N

Composants	Composants en poids	φ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	φ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³		g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	15.9	2.891	5.50	2.36	14.63	344.84	1	350
S	66.1	2.66	24.85		60.81	1433.58	1,62	884,92
G	18	2.55	7.06		16.56	390.39	1,41	276,87

E	8.7	1	8.70		8.00	188.69	1	188,69
Totaux	108.7	X	46.11		100.0	2357.49		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 3.99 kg d'eau
- On a utilisé 1.87 kg
- Il est resté 2.12 kg
- Pour 1m³ il a fallu 329 kg
- On a 329 kg – 191.6 kg = 137.4 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 137.4 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{329}{2173.8} \times 100 = 15,1\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{350}{2173.8} \times 100 = 16,1$

Le tableau 21 reprend la Composition corrigée du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le Nyati CEM IV 32.5N

Tableau 21 : Composition corrigée du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le Nyati CEM IV 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³		g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$			7/8
C	16.1	2.891	5.57	2.19	13.96	306.21	1	350
S	66.1	2.66	24.85		57.33	1257.19	1,62	776,04
G	18	2.55	7.06		15.61	342.35	1,41	242,8
E	15.1	1	15.10		13.10	287.20	1	287,2

Totaux	115.3	X	52.58		100.0	2192.96		
--------	-------	---	-------	--	-------	---------	--	--

• **Composition pour Prime CEM II 42.5N**

Le tableau 22 reprend la composition du béton avec le ciment prime 42.5 N avec le sable concassé.

Tableau 22 : Composition du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le prime de classe CEM II 42.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	15.9	2.8	5.68	2.35	14.63	343.51 (350)	1	343.5088
S	66.1	2.66	24.85		60.81	1428.05	1.62	881.51
G	18	2.55	7.06		16.56	388.88	1.41	275.7999
E	8.7	1	8.70		8.00	187.96	1	187.9577
Totaux	108.7	X	46.29		100.0	2348.39		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5.345 kg d'eau
- On a utilisé 2.045 kg
- Il est resté 3.3 kg
- Pour 1m³ il a fallu 318.04 kg
- On a 318.04 kg – 191.6 kg = 126.4 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 126.4 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{318.04}{2166.8} \times 100 = 14,6\%$

- Le pourcentage en ciment : $C (\%) = \frac{350}{2166.8} \times 100 = 16,1 \%$

Le tableau 23, reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Prime et le sable concassé.

Tableau 23 : Composition corrigée du béton (sable concassé) pour le dosage 350 kg/m³ avec le Prime 42.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³		g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	16.1	2.8	5.75	2.20	14.05	308.53	1	308.5281
S	65.9	2.66	24.77		57.50	1262.86	1.62	779.5414
G	18	2.55	7.06		15.71	344.94	1.41	244.637
E	14.6	1	14.60		12.74	279.78	1	279.7832
Totaux	114.6	X	52.18		100.0	2196.11		

III.3.2. Dosage en ciment (400 kg)

Pour 1m³ de béton on :

- Masse du ciment : 400 kg
- Masse total des éléments secs : 2200 kg

III.3.2.1. Pourcentage des constituants du béton à base de graviers roulés et sable roulé

1. Ciment

Masse du ciment : 340 kg/m³, l'application de la formule 2 permet d'écrire que

$$C (\%) = \frac{400}{2200} \times 100 = 18.18\%$$

2. Graviers

Le squelette granulaire du béton, déterminé par l'abaque présenté en annexe 2 au tableau 39 et dont la courbe optimale présentée en annexe 7 à la figure 23, donne les résultats suivants :

- La composition granulaire est ; S + C= 81% et G= 19% ;

- Le sable sera : $S = 81\% - 18.18\% = 62.82\%$.

3. Eau

D < 0.16 mm

- Ciment : 400kg
- A partir du tamis de 0.16, le tamisât est de 11.2 de 65.1
On a 7.3% de 2200 = 160.6 kg
- Le total est : 400 + 160,6 Soit 560.6 kg
- Le total à mouiller est : 510.6 * 0.23. Soit 128.938 kg

D > 0.16 mm

- $K = 0.09$; $d_1 = 0.16$ mm ; $d_2 = 20$ mm
- Poids total des éléments secs : 2 200 kg
- Dont inférieurs à 0.16 : 510.6 kg
- Restent supérieurs ou égaux à 0.16 mm : 2 200kg – 560.6 kg, soit 1639.4 kg
- Donc Eau = $\frac{0,09 \times 1639.4}{1.17 \times \sqrt[3]{0.16 \times 20}} = 85.58\text{kg}$
- Soit total 128.938 kg + 85.58kg = 214,52 kg

Pourcentage eau

$$E (\%) = \frac{214.52}{2200} \times 100 = 9.75 \%$$

- **Composition pour ciment Hima**

Le tableau 24 reprend la composition du béton avec le ciment HIMA 32.5 N.

Tableau 24 : Composition du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m3 avec le Ciment Hima 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparentes
					%			
Unités	%	g/m3		g/m3	%	g	g/m3	m^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2 / \Sigma 4$	2 / $\Sigma 2$	5 *6		7/8
C	18.18	2.997	6.07	2.27	16.56	375.66	1	350

S	62.82	2.5	25.13		57.24	1298.07	1,58	821,56
G	19	2.55	7.45		17.31	392.60	1,41	278,43
E	9.75	1	9.75		8.88	201.47	1	201,47
Totaux	109.75	X	48.40		100.0	2267.79		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau
- On a utilisé 1.75 kg
- Il est resté 3.25 kg
- Pour 1m³ il a fallu 272 kg
- On a 272kg – 214.52 kg = 57.48 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 57.4 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{272}{2090.67} \times 100 = 13\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{400}{2090.67} \times 100 = 19,1 \%$

Le tableau 25 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Hima 32.5N.

Tableau 25 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima CEM II 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/ \Sigma 4$	2/ $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	19.1	3.07	6.22	2.20	16.90	371.36	1	350
S	61.9	2.5	24.76		54.78	1203.52	1,58	761,72
G	19	2.55	7.45		16.81	369.42	1,41	262
E	13	1	13.00		11.50	252.76	1	252,76

Totaux	113	X	51.43		100.0	2197.06		
--------	-----	----------	-------	--	-------	---------	--	--

- **Composition pour ciment Nyati**

Le tableau 26 reprend la composition du béton avec le ciment HIMA 32.5 N.

Tableau 26 : Composition du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Nyati CEM IV 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³		g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.18	2.891	6.29	2.26	16.56	373.94	1	350
S	62.82	2.5	25.13		57.24	1292.13	1,58	817,8
G	19	2.55	7.45		17.31	390.81	1,41	277.17
E	9.75	1	9.75		8.88	200.55	1	200,55
Totaux	109.75	X	48.62		100.0	2257.42		

- **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau
- On a utilisé 1.925 kg
- Il est resté 3.075 kg
- Pour 1m³ il a fallu 299.37 kg
- On a 299.37 kg – 214.52 kg = 84.85 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 84.8 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.18	2.8	6.49	2.25	16.56	372.37 (400)	1	372.3743
S	62.82	2.5	25.13		57.24	1286.72	1.58	814.3793
G	19	2.55	7.45		17.31	389.17	1.41	276.0072
E	9.75	1	9.75		8.88	199.71	1	199.7057
Totaux	109.75	X	48.82		100.0	2247.97		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau
- On a utilisé 1.985 kg
- Il est resté 3.015 kg
- Pour 1m³ il a fallu 308.7 kg
- On a 308.7 kg – 214.52 kg = 94.18 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 94.18 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{308.7}{2075.87} \times 100 = 14,8\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{400}{2075.87} \times 100 = 19,2\%$

Le tableau 29 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Prime 42.5N à 400 kg/m³.

Tableau 29 : Composition corrigée du béton (sable roulé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime CEM II 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m³		g/m³	%	g	g/m³	m³
1	2	3	4	5	6	7	8	9

			2/3	Σ2/Σ4	2/Σ2	5*6		7/8
C	19.2	2.8	6.86	2.13	16.72	356.69	1	356.6909
S	61.8	2.5	24.72		53.83	1148.10	1.58	726.6448
G	19	2.55	7.45		16.55	352.98	1.41	250.3371
E	14.8	1	14.80		12.89	274.95	1	274.9492
Totaux	114.8	X	53.83		100.0	2132.71		

III.3.2.2 Pourcentage de constituants du béton à base de gravier roulé et sable concassé

1. Ciment

Masse du ciment : 400 kg/m³, l'application de la formule 2 permet d'écrire que

$$C (\%) = \frac{400}{2200} \times 100 = 18,1\%$$

2. Graviers

Le squelette granulaire du béton, déterminé par l'abaque présenté en annexe 2 au tableau 29 et dont la courbe optimale représentée en annexe 8 à la figure 14, donne les résultats suivants :

- La composition granulaire est ; S + C = 82 % et G= 18%
- Le sable sera : S = 82% - 18.1 % = 63.9 %

3. Eau

D < 0.16 mm

- Ciment : 400kg
- A partir du tamis de 0.16, le tamisât est de 5.5 % de 63.9
On a 3.5145% de 2200 = 77.3 kg
- Le total est : 400 + 77.3 Soit 477.3 kg
- Le total à mouiller est : 477.3 x 0.23. Soit 109.7 kg

D > 0.16 mm

- K = 0.09 ; d1 = 0.16 mm ; d2 = 20 mm
- Poids total des éléments secs : 2 200 kg
- Dont inférieurs à 0.16 : 477.3 kg
- Restent supérieurs ou égaux à 0.16 mm : 2 200kg – 477.3 kg, soit 1722.7 kg
- Donc Eau = $\frac{0,09 \times 1722,7}{1,17 \times \sqrt[3]{0,16 \times 20}} = 89.9 \text{ kg}$
- Soit total 109.7 kg + 89.9 kg = 199.6 kg

Pourcentage eau

$$E (\%) = \frac{199.6}{2200} \times 100 = 9.07 \%$$

1) COMPOSITION POUR CIMENT HIMA

Le tableau 30 reprend la composition du béton avec le ciment HIMA 32.5 N.

Tableau 30 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.1	2.997	6.04	2.36	16.59	391.85	1	350
S	63.9	2.66	24.02		58.59	1383.39	1,58	875,56
G	18	2.55	7.06		16.50	389.69	1,41	276,37
E	9.07	1	9.07		8.32	196.36	1	196,36
Totaux	109.07	X	46.19		100.0	2361.30		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau
- On a utilisé 1.99 kg
- Il est resté 3.01 kg
- Pour 1m³ il a fallu 309.48 kg
- On a 309.48kg – 199.6 kg = 109.8 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 199.6 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{309.48}{2173.08} \times 100 = 14.2\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{400}{2173.08} \times 100 = 18,4 \%$

Le tableau 31 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Hima 32.5N.

Tableau 31 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Hima 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.4	2.997	6.14	2.23	16.11	358.62	1	350
S	63.6	2.66	23.91		55.69	1239.57	1,62	674,87
G	18	2.55	7.06		15.76	350.82	1,41	394,95
E	14.2	1	14.20		12.43	276.76	1	253,31
Totaux	114.2	X	51.31		100.0	2225.77		

- **Composition pour NYATI 32.5N**

Le tableau 32 reprend la composition du béton avec le ciment Nyati 32.5 N.

Tableau 32 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Nyati 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.1	2.891	6.26	2.35	16.59	389.98	1	350
S	63.9	2.66	24.02		58.59	1376.79	1,62	849,87
G	18	2.55	7.06		16.50	387.83	1,41	275,05
E	9.07	1	9.07		8.32	195.42	1	195,42
Totaux	109.07	X	46.41		100.0	2350.03		

- **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau

- On a utilisé 2.02 kg
- Il est resté 2.98 kg
- Pour 1m³ il a fallu 314.15 kg
- On a 314.15 kg – 199.6 kg = 114.55 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 114.5 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{314.15}{2164.62} \times 100 = 14,5\%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{400}{2164.62} \times 100 = 18,4$

Le tableau 33 reprend la composition corrigée du béton avec le ciment Nyati 32.5N.

Tableau 33 : Composition corrigée du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment

Nyati CEM IV 32.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/ \Sigma 4$	2/ $\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.4	2.891	6.36	2.21	16.07	354.98	1	350
S	63.6	2.66	23.91		55.55	1227.01	1,62	757,41
G	18	2.55	7.06		15.72	347.27	1,41	246,29
E	14.5	1	14.50		12.66	279.74	1	279,74
Totaux	114.5	X	51.83		100.0	2209.01		

- **Composition pour Prime CEM 42.5N**

Le tableau 34 reprend la composition du béton avec le ciment Prime 42.5 N.

Tableau 34 : Composition du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime 32.5N

Composants	Comp osants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composit ion en poids	ρ_{app}	Composit ion en valeurs apparent s
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.1	2.8	6.46	2.34	16.59	388.28 (400)	1	388.2815
S	63.9	2.66	24.02		58.59	1370.78	1.62	846.1628
G	18	2.55	7.06		16.50	386.14	1.41	273.8555
E	9.07	1	9.07		8.32	194.57	1	194.5698
Totaux	109.07	X	46.62		100.0	2339.77		

• **Détermination de la quantité réelle d'eau de gâchage**

Cette détermination a été effectuée sur une quantité d'1/100 m³ de béton

- Nous avons pesé préalablement 5 kg d'eau
- On a utilisé 2.58 kg
- Il est resté 2.42 kg
- Pour 1m³ il a fallu 376.36 kg
- On a 376.36 kg – 199.6 kg = 176.7 kg

Comme la valeur absolue de la différence entre la quantité d'eau réelle et la quantité d'eau supposée est égal à 176.7 kg > 5 kg , les calculs de la composition d'un mètre cube du béton sera recommencé en rectifiant l'hypothèse faite sur la masse total des éléments secs.

- Donc E (%) = $\frac{376.36}{2156.8} \times 100 = 17,4 \%$
- Le pourcentage en ciment : C (%) = $\frac{400}{2156.8} \times 100 = 18,5 \%$

Le tableau 35 reprend la Composition corrigée du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime 42.5N

Tableau 35 : Composition corrigée du béton (sable concassé) dosage 400 kg/m³ avec le Ciment Prime CEM II 42.5N

Composants	Composants en poids	ρ_{abs}	Composants en valeurs absolue	Masse volumique du béton	Poids en	Composition en poids	ρ_{app}	Composition en valeurs apparents
					%			
Unités	%	g/m ³		g/m ³	%	g	g/m ³	m ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\Sigma 2/\Sigma 4$	2/$\Sigma 2$	5*6		7/8
C	18.5	2.8	6.61	2.14	15.76	336.74	1	336.7423
S	63.5	2.66	23.87		54.09	1155.85	1.62	713.4848
G	18	2.55	7.06		15.33	327.64	1.41	232.3696
E	17.4	1	17.40		14.82	316.72	1	316.7198
Totaux	117.4	X	54.94		100.0	2136.95		

III.4. CARACTERISTIQUES DU BETON

Le béton obtenu a été analysé en deux manières, la première à l'état frais analysé au cône d'Abrams et la seconde à l'état durci à 28 jours analysé au travers la machine à compression.

III.4.1. Consistance des bétons

La consistance des bétons a été évaluée à partir du cône d'Abrams selon conformément à la norme NF P 18-451 [25]. Le tableau 36 présente les différents affaissements obtenus

Tableau 36 : Affaissement par cône d'Abrams

Gravier	Dosage	Sablé	ciment	Nomination	Affaissement de cône d'Abrams (Cm)
Roulé	350kg/m ³	Roulé	Hima	B1	3.3
			Nyati	B2	3.4
			Prime	B3	3.15
		Concassé	Hima	B1'	2.8
			Nyati	B2'	3.1
			Prime	B3'	2.9
	400Kg/m ³	Roulé	Hima	A1	3.7
			Nyati	A2	3.6
			Prime	A3	4.1
		Concassé	Hima	A1'	2.3
			Nyati	A2'	2.8
			Prime	A3'	4.3

Les différents affaissements obtenus montrent que les bétons confectionnés sont de consistance ferme.

III.4.2. Résistance à la compression

Les résistances à la compression ont été obtenues à partir de l'essai de compression effectué selon la prescription de la norme NF EN 12390-3 [26]. Le tableau 37 présente les résistances à la compression obtenues en terme de moyenne de trois éprouvettes pour chaque béton à 28 jours.

Tableau 37 : Résultat de la résistance à la compression

Dosage	Nomination	Qualité	Résistance à la compression à 28 jours (Mpa)
350kg/m ³	B1	Gravier roulé-Sable roulé-Ciment Nyati	4.359
	B2	Gravier roulé-Sable roulé-Ciment Hima	6.955
	B3	Gravier roulé-Sable roulé-Ciment Prime	10.3
	B1'	Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Nyati	8.41
	B2'	Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Hima	11.51
	B3'	Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Prime	14.88
400kg/m ³	A1	Gravier roulé-Sable roulé-Ciment Nyati	7.1
	A2	Gravier roulé-Sable roulé-Ciment Hima	9.803
	A3	Gravier roulé-Sable roulé-Ciment Prime	12.73
	A1'	Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Nyati	10.41
	A2'	Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Hima	14.09
	A3'	Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Prime	19.2

Ce tableau présente les valeurs de résistances obtenues à la compression en terme de moyenne de trois éprouvettes pour chaque béton à 28 jours, le béton B1 est le béton de référence et après variation de composition le béton A3' est le béton final. Les résultats montrent que le béton final A3' dosé à

400kg/m³ de composition Gravier roulé-Sable concassé-Ciment Prime donne la résistance la plus élevée. Le tableau 38 présente la variation des résistances en compression du béton à 28 jours

Tableau 38 : la variation des résistances en compression du béton à 28 jours en Mpa

	Variation dosage en ciment (400 kg /m ³)	Variation du type sable	Variation dosage Ciment et type de sable
Graviers roulés et ciment Nyati à 350kg/m ³	2.741	4.051	6.051
Graviers roulés et ciment Hima 350kg/m ³	2.848	4.55	7.135
Graviers roulés et ciment Prime 350kg/m ³	2.43	4.58	8.9

Ce tableau résume les variations des résistances du béton à 28 jours. Les compositions du béton ont été faites respectivement des graviers roulé et ciment Nyati à 350kg/m³ , des graviers roulés et ciment Hima 350kg/m³, et des graviers roulés et ciment Prime 350kg/m³, avec comme variable le dosage en ciment, le type de sable et en même temps le dosage en ciment et type de sable. Il est remarqué que la variable dosage en ciment et type de sable est celle qui donne la plus grande variation en terme des résistances en compression à 28 jours.

Le tableau 39 présente ces variations en terme de pourcentage.

Tableau 39 : Variation des résistances en compression à 28 jours en pourcentage

	Variation dosage en ciment	Variation type sable	Variation dsq Ciment et sable
Graviers roulé et ciment Nyati	29.5	40	51
Graviers roulé et ciment Hima	39.4	48.8	58.6
Graviers roulé et ciment Prime	18.89	30.4	46.3

Ce tableau résume l'augmentation des résistances en terme de pourcentage, il est donc trouvé que la variation la plus élevée a été des constituants graviers roulés et ciment hima avec la variation du dosage du ciment et du type de sable, qui a été de 58.6 %. La figure 21 présente ces variations en terme de pourcentage

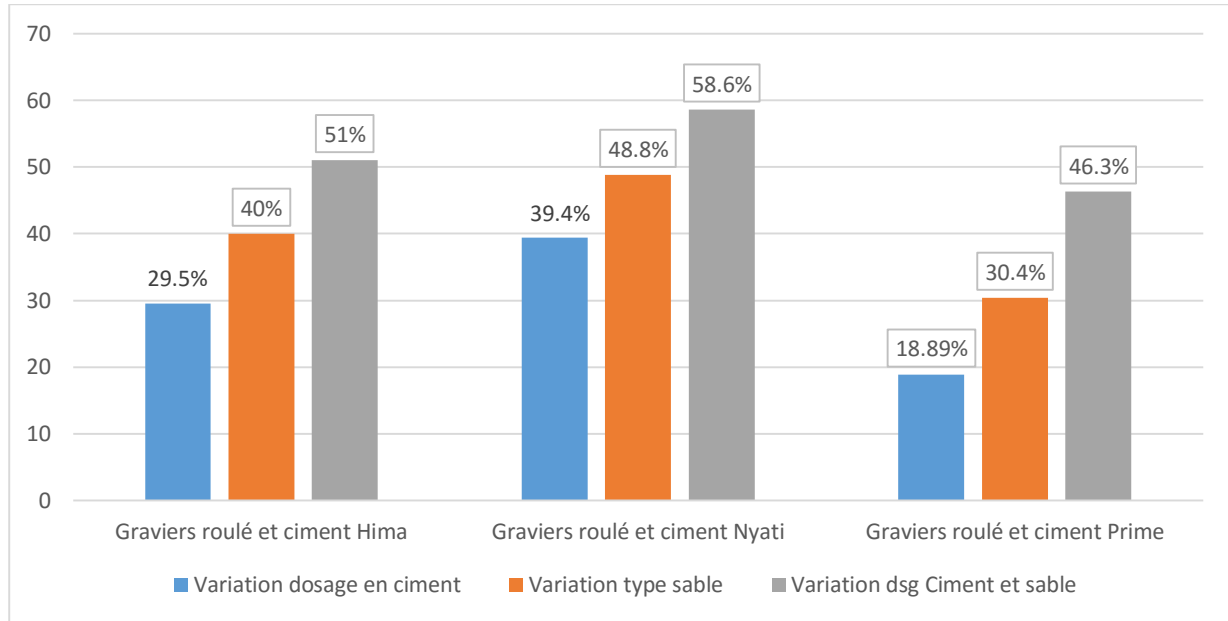


Figure 21 : variation en pourcentage des résistances

En somme les bétons de référence confectionnés a connu une augmentation considérable de sa résistance et la plus élevée a été remarqué lorsque on a varié en même temps le dosage en ciment et le type de ciment ainsi que le type de sable respectivement de 46.3%, 51% 58.6% et avec le ciment Nyati 32.5 N, Hima 32.5 N et Prime 42.5 N. Le ciment Prime de classe commercial 42.5 N, dosé à 400 kg /m³ de mélange sable concassé et gravier roulé a donné la résistance en compression à 28 jours la plus élevée.

Conclusion partielle

Ce chapitre a porté sur la présentation des résultats, d'une manière générale il a été présenté les caractéristiques des ciments et des granulats, la formulation des bétons et les caractéristiques du béton. Il advient que la résistance en compression du béton à 28 jours connait une amélioration avec la variation du type de sable, du type de ciment ainsi que l'augmentation du dosage en ciment pour les bétons faites à base des graviers roulés.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a porté sur l'amélioration du propriété mécanique du béton formulé à base des graviers roulés . Pour y arriver, il a été nécessaire en premier lieu de caractériser et identifier les constituants entrant dans la formulation notamment le ciment, le sable roulés et les sables concassés ainsi que les graviers roulés. En deuxième lieu faire il a été question de faire la formulation des bétons et finalement faire la caractérisation de ces bétons.

La caractérisation des granulats a montré que pour le sable roulé de classe 0/5, le module de finesse est de 2,3, l'équivalent de sable moyen de 81,9 % , de masse volumique apparente de $1,58 \text{ g/cm}^3$ et de masse volumique absolue de $2,54 \text{ g/cm}^3$. Pour le sable concassé de classe 0/5, le module de finesse est de 3,3, l'équivalent de sable moyen de 84,9 % , de masse volumique apparente de $1,62 \text{ g/cm}^3$ et de masse volumique absolue de $2,6 \text{ g/cm}^3$. Pour le gravier roulé de classe 5/20, la masse volumique apparente est $1,41 \text{ g/cm}^3$, la masse volumique absolue est $2,55 \text{ g/cm}^3$.

La formulation du béton a été faite avec un dosage en ciment de 350kg /m³ et 400 kg/m³ pour les différentes compositions du béton avec les graviers roulés, ayant comme variable le type et le dosage en ciment ainsi que le type de sable. La détermination de la composition offrant la meilleure résistance à la compression s'est faite en confectionnant le béton avec les différentes compositions. La nomination de ces bétons est respectivement de B1,B2, B3, B1',B2',B3' dosé à 350 kg/m³ avec B1 comme béton de référence de compositions respectives gravier roulé – sable roulé – ciment Hima 32.5N de résistance 6.95 MPa à 28 jours, gravier roulé – sable roulé – ciment Nyati de résistance 4.35Mpa à 28 jours, gravier roulé - sable roulé - ciment Prime 42.5N de résistance 10.3 MPa à 28 jours, gravier roulé – sable concassé – ciment Hima 32.5N de résistance 10.3Mpa à 28 jours, gravier roulé – sable concassé – ciment Nyati 8.41 MPa de résistance à 28 jours, gravier roulé - sable concassé - ciment Prime 42.5N de résistance 14.88 à 28 jours. Ceux dosés à 400 kg/m³ de nomination respectives A1, A2, A3, A1', A2', A3' de compositions respectives gravier roulé – sable roulé – ciment Hima 32.5N de résistance 9.8Mpa à 28 jours , gravier roulé – sable roulé – ciment Nyati de résistance 7.1 MPa à 28 jours, gravier roulé - sable roulé - ciment Prime 42.5N de résistance 12.73 MPa à 28 jours, gravier roulé – sable concassé – ciment Hima 32.5N de résistance 13.29 Mpa à 28 jours, gravier roulé – sable concassé – ciment Nyati de résistance 10.41 à 28 jours, gravier roulé - sable concassé - ciment Prime 42.5N de résistance 19.2 MPa à 28 jours. De toutes les compositions le béton A3' est celui ayant une résistance plus élevée.

La composition ayant donné la plus grande résistance s'avère donc être la composition graviers roulés/sables concassés avec un dosage en ciment à 400 kg /m³ . Les différentes résistances obtenues permettent de conclure que le type et le dosage en ciment ainsi que la nature du sable permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons à base des graviers roulés.

Ne prétendant pas avoir abordé tous les aspects liés à ce travail, les études futures pourront établir l'influence de cette amélioration de résistance sur le coût du béton localement produit dans cette région.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. ALINABIWE, Cours de physique et technologie du béton, Goma, 2020.
- [2] H. HAFID, Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles, Paris.
- [3] N. f. N. E., granulats pour béton, aout 2003.
- [4] P. F. NGAPGUE, Cours de physique de béton, Goma, 2018.
- [5] M. M. Abdias, Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma, Goma, 2017, p. P.4.
- [6] XP, Octobre 1997, pp. 18-540.
- [7] D. N. Abdelkader, Granulat, Institut des Séances de la terre et de L'univers.
- [8] A. BYAMUNGU, INFLUENCE DES FINES PARTICULES DU SABLE CONCASSE SUR LES PROPRIETES DU BETON, 2020.
- [9] [Online]. Available: <https://apprentimaths.files.wordpress.com/2014/05/les-caractc3a9ristiques-principales-des-granulats.pdf>.
- [10] M. Saddika, Matériaux et Ouvrages de Génie Civil, 2014.
- [11] P. F. NGAPGUE, Cours de physique et technologie du béton, cours inédit, Faculté des Sciences et Technologies appliquées, , ULPGL,, 2015-2016, 58p ;
- [12] J. F. e. G. DREUX, Nouveau guide du béton et de ses constituants,, Novembre 2006..
- [13] Typologie du béton.
- [14] N. f. N. P. 94-056, "sols: Reconnaissance et essais-analyse granulométrique-méthode par tamis à sec après lavage," mars 1996.
- [15] A. F. e. Bendi-Ouis, "SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION," 2007 -2008.
- [16] N. F. P. 18-554, "Granulats-mesures des masses volumique ,de la porosite ,du coefficient d absorption et de la teneur en eau des cailloux,AFNOR,," 1990.
- [17] 1.-B. 1. British Standard, 1984.
- [18] "Masses volumiques apparentes - 514 Mots | Etudier," [Online]. Available: <https://www.etudier.com/dissertations/Masses-Volumiques-Apparentes/72776935.html>.
- [19] "Masse Volumique - 272 Mots | Etudier," [Online]. Available: <https://www.etudier.com/dissertations/Masse-Volumique/70650709.html>.

- [20] N.F., p. P18.573.
- [21] G. Fouad, cours de matériaux de construction ,faculte de technologie,departement de genie civil,universite ABOUBEKR BELKAID.
- [22] R.LANCHON, Manuel des essais, 1977.
- [23] T. Belkacem, ETUDE DE L'INFLUENCE DES HAUTES TEMPERATURES SUR LE COMPORTEMENT DU BETON, p. 68.
- [24] N. F. P. 18-554, Granulats-mesures des masses volumique ,de la porosite ,du coefficient d absorption et de la teneur en eau des gravillons et caillaux,AFNOR,, 1990.
- [25] n. f. N. E. 12350-2, essai pour béton frais- partie 2 : essai d'affaissement, juin 2019.
- [26] n. f. e. européenne, NF EN 12390-3 Essai de béton durci- partir 3 : résisynce à la compression des éprouvettes, fevrier 2003.
- [27] N. f. N. P. 94-056, Sols: reconnaissance et essais-analyse granulométrique-méthode par tamis à sec apres lavage, mars 1996.
- [28] M. W. M. Abdias, Etude comparative des proprietés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville Goma, Goma, 2017.

ANNEXES

ANNEXE 1: ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Table 40 : Composition granulométrique du gravier roulé

Gravier roulé

Masse Echantillon: 3500

Masse sèche : 3490

N° TAMIS		N° TAMIS		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
3''	50	76.2	80	0	0.0	100.0
2 1/2''	49	63.5	63	0	0.0	100.0
2''	48	50.8	50	0	0.0	100.0
1 1/2''	47	38.1	40	0	0.0	100.0
1 1/4''	46	31.7	31.5	0	0.0	100.0
1''	45	25.4	25	0	0.0	100.0
3/4 ''	44	19.1	20	0	0.0	100.0
2/3''	43	16.9	16	970	27.8	72.2
1/2''	42	12.7	12.5	1930	55.3	44.7
3/8''	41	9.52	10	2655	76.1	23.9
1/3''	40	7.93	8	3180	91.1	8.9
1/4''	39	6.35	6.3	3400	97.4	2.6
3/16''	38	4.76	5	3470	99.4	0.6
5	37	4	4	3485	99.9	0.1
6	36	3.36	3.15	3490	100.0	0.0
8	35	2.38	2.5	0	0.0	0.0
10	34	2	2	0	0.0	0.0
12	33	1.68	1.6	0	0.0	0.0
16	32	1.19	1.25	0	0.0	0.0
18	31	1	1	0	0.0	0.0
20	30	0.84	0.8	0	0.0	0.0
30	29	0.59	0.63	0	0.0	0.0
35	28	0.5	0.5	0	0.0	0.0
40	27	0.4	0.4	0	0.0	0.0
50	26	0.315	0.315	0	0.0	0.0
60	25	0.25	0.25	0	0.0	0.0
70	24	0.2	0.2	0	0.0	0.0
100	23	0.16	0.16		0.0	0.0
120	22	0.125	0.125	0	0.0	0.0
140	21	0.1	0.1		0.0	0.0
200	20	0.08	0.08	0	0.0	0.0

Table 41 : Composition granulométrique de sable roulé

Sable roulé

Masse Echantillon: 2500
Masse sèche : 2420

N° TAMIS		N° TAMIS		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
3''	50	76.2	80	0	0.0	100.0
2 1/2''	49	63.5	63	0	0.0	100.0
2''	48	50.8	50	0	0.0	100.0
1 1/2''	47	38.1	40	0	0.0	100.0
1 1/4''	46	31.7	31.5	0	0.0	100.0
1''	45	25.4	25	0	0.0	100.0
3/4 ''	44	19.1	20	0	0.0	100.0
2/3''	43	16.9	16	0	0.0	100.0
1/2''	42	12.7	12.5	0	0.0	100.0
3/8''	41	9.52	10	0	0.0	100.0
1/3''	40	7.93	8	0	0.0	100.0
1/4''	39	6.35	6.3	90	3.7	96.3
3/16''	38	4.76	5	120	5.0	95.0
5	37	4	4	170	7.0	93.0
6	36	3.36	3.15	215	8.9	91.1
8	35	2.38	2.5	270	11.2	88.8
10	34	2	2	335	13.8	86.2
12	33	1.68	1.6	415	17.1	82.9
16	32	1.19	1.25	525	21.7	78.3
18	31	1	1	645	26.7	73.3
20	30	0.84	0.8	710	29.3	70.7
30	29	0.59	0.63	930	38.4	61.6
35	28	0.5	0.5	1055	43.6	56.4
40	27	0.4	0.4	1275	52.7	47.3
50	26	0.315	0.315	1515	62.6	37.4
60	25	0.25	0.25	1890	78.1	21.9
70	24	0.2	0.2	2100	86.8	13.2
100	23	0.16	0.16	2220	91.7	8.3
120	22	0.125	0.125	2280	94.2	5.8
140	21	0.1	0.1	2320	95.9	4.1
200	20	0.08	0.08	2420	100.0	0.0

Table 42 : Composition granulométrique de sable concassé

Masse Echantillon: 3000 Sable concassé
Masse sèche : 2950

N° TAMIS		N° TAMIS		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
3"	50	76.2	80	0	0.0	100.0
2 1/2"	49	63.5	63	0	0.0	100.0
2"	48	50.8	50	0	0.0	100.0
1 1/2"	47	38.1	40	0	0.0	100.0
1 1/4"	46	31.7	31.5	0	0.0	100.0
1"	45	25.4	25	0	0.0	100.0
3/4 "	44	19.1	20		0.0	100.0
2/3"	43	16.9	16		0.0	100.0
1/2"	42	12.7	12.5		0.0	100.0
3/8"	41	9.52	10		0.0	100.0
1/3"	40	7.93	8		0.0	100.0
1/4"	39	6.35	6.3		0.0	100.0
3/16"	38	4.76	5	245	8.3	91.7
5	37	4	4	625	21.2	78.8
6	36	3.36	3.15	870	29.5	70.5
8	35	2.38	2.5	1005	34.1	65.9
10	34	2	2	1190	40.3	59.7
12	33	1.68	1.6	1345	45.6	54.4
16	32	1.19	1.25	1550	52.5	47.5
18	31	1	1	1735	58.8	41.2
20	30	0.84	0.8	1895	64.2	35.8
30	29	0.59	0.63	2015	68.3	31.7
35	28	0.5	0.5	2160	73.2	26.8
40	27	0.4	0.4	2265	76.8	23.2
50	26	0.315	0.315	2355	79.8	20.2
60	25	0.25	0.25	2435	82.5	17.5
70	24	0.2	0.2	2500	84.7	15.3
100	23	0.16	0.16	2595	88.0	12.0
120	22	0.125	0.125	2720	92.2	7.8
140	21	0.1	0.1	2840	96.3	3.7
200	20	0.08	0.08	2950	100.0	0.0

ANNEXE 2: EQUIVALENT DES SABLES

Essais équivalent sable

✚ Sable concassé

❖ 1^{er} éprouvette

$$h_1 = 8.8 \text{ cm}$$

$$h_2 = 10.1 \text{ cm}$$

$$E_S = \frac{h_1}{h_2} \times 100 = \frac{8.8}{10.1} \times 100 = 87.1$$

Pour le piston : h = 8.3 cm

$$E_S = \frac{h}{h_2} \times 100 = \frac{8.3}{10.1} \times 100 = 82.17$$

❖ 2^{em} éprouvette

$$h_1 = 8.9 \text{ cm}$$

$$h_2 = 10.0 \text{ cm}$$

$$E_S = \frac{h_1}{h_2} \times 100 = \frac{8.9}{10.0} \times 100 = 89.0$$

Pour le piston : h = 8.7 cm

$$E_S = \frac{h}{h_2} \times 100 = \frac{8.4}{10.0} \times 100 = 84.0$$

$$E_{Sf} = \frac{87.1+82.17+89.0+84.0}{4} = 85.5 \text{ cm}$$

✚ Sable roulé

❖ 1^{er} éprouvette

$$h_1 = 8.4 \text{ cm}$$

$$h_2 = 9.9 \text{ cm}$$

$$E_S = \frac{h_1}{h_2} \times 100 = \frac{8.4}{9.9} \times 100 = 84.8$$

Pour le piston : h = 7.7 cm

$$E_S = \frac{h}{h_2} \times 100 = \frac{7.7}{9.9} \times 100 = 77.7$$

❖ 2^{em} éprouvette

$$h_1 = 8.9 \text{ cm}$$

$$h_2 = 10.1 \text{ cm}$$

$$E_S = \frac{h_1}{h_2} \times 100 = \frac{8.6}{10.1} \times 100 = 85.1$$

Pour le piston : h = 8.1 cm

$$E_S = \frac{h}{h_2} \times 100 = \frac{8.1}{10.1} \times 100 = 80.1$$

$$E_{Sf} = \frac{84.8+77.7+85.1+80.1}{4} = 81.92 \text{ cm}$$

ANNEXE 3 : MODULE DE FINESSE DU SABLE

Module de finesse du sable

1) Sable roulé

$$MF = \frac{1}{100} \sum RC \text{ (en \%)} \text{ des tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5) mm}$$

$$0,16 = 91.7 \%$$

$$0,315 = 62.6 \%$$

$$0,63 = 38.4 \%$$

$$1,25 = 21.7$$

$$2,5 = 11.2 \%$$

$$5 = 5 \%$$

$$MF = \frac{91.7+62.6+38.4+11.2+5}{100} = 2.33$$

2) Sable concassé

$$MF = \frac{1}{100} \sum RC \text{ (en \%)} \text{ des tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5) mm}$$

$$0,16 = 91.7 \%$$

$$0,315 = 62.6 \%$$

$$0,63 = 38.4 \%$$

$$1,25 = 21.7$$

$$2,5 = 11.2 \%$$

$$5 = 5 \%$$

$$MF = \frac{91.7+62.6+38.4+11.2+5}{100} = 3.29$$

ANNEXE 4 : MASSE VOLUMIQUE

Masses volumiques

3) Sable roulé

a) Masse volumique apparente

❖ 1^e échantillon :

$$m_{moule} = 38.3 \text{ g}$$

$$M_1 = 350.83 \text{ g}$$

$$D = 7.5 \text{ cm}$$

$$H = 4.45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,59 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$m_{moule} = 41.76 \text{ g}$$

$$M_1 = 350.83 \text{ g}$$

$$D = 7.5 \text{ cm}$$

$$H = 4.45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,57 \text{ g/cm}^3$$

❖ 3^e échantillon :

$$m_{moule} = 38.33 \text{ g}$$

$$M_1 = 350.83 \text{ g}$$

$$D = 7.5 \text{ cm}$$

$$H = 4.45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,59 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{1.59 + 1.57 + 1.59}{3} = 1.58 \text{ g/cm}^3$$

b) Masse volumique absolue

❖ 1^e échantillon :

$$M_{ech} = 300 \text{ g}$$

$$V_1 = 150 \text{ ml}$$

$$V_2 = 270 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$M_{ech} = 590 \text{ g}$$

$$V_1 = 800 \text{ ml}$$

$$V_2 = 1030 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,56 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$M_{ech} = 505 \text{ g}$$

$$V_1 = 600 \text{ ml}$$

$$V_2 = 795 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,58 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{abs} = \frac{2,63 + 2,7 + 2,66}{3} = 2,54 \text{ g/cm}^3$$

4) Sable concassé

a) Masse volumique apparente

❖ 1^e échantillon :

$$m_{moule} = 33,76 \text{ g}$$

$$M_1 = 350,83 \text{ g}$$

$$D = 7,5 \text{ cm}$$

$$H = 4,45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196,49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,61 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$m_{moule} = 14,66 \text{ g}$$

$$M_1 = 131,9 \text{ g}$$

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$H = 3,7 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 72.61 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,613 \text{ g/cm}^3$$

❖ 3^e échantillon :

$$m_{moule} = 33.76 \text{ g}$$

$$M_1 = 356.05 \text{ g}$$

$$D = 7.5 \text{ cm}$$

$$H = 4.45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,64 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{1.61 + 1.613 + 1.64}{3} = 1.621 \text{ g/cm}^3$$

b) Masse volumique absolue

❖ 1^e échantillon :

$$M_{ech} = 448.18 \text{ g}$$

$$V_1 = 600 \text{ ml}$$

$$V_2 = 770 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,63 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$M_{ech} = 731.65 \text{ g}$$

$$V_1 = 800 \text{ ml}$$

$$V_2 = 1070 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$M_{ech} = 420.46 \text{ g}$$

$$V_1 = 600 \text{ ml}$$

$$V_2 = 758 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,66 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{abs} = \frac{2,63 + 2,7 + 2,66}{3} = 2.663 \text{ g/cm}^3$$

5) Gravier

a) Masse volumique apparente

❖ 1^e échantillon :

$$m_{moule} = 33.76 \text{ g}$$

$$M_1 = 318.4 \text{ g}$$

$$D = 7.5 \text{ cm}$$

$$H = 4.45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,43 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$m_{moule} = 33.76 \text{ g}$$

$$M_1 = 307.45 \text{ g}$$

$$D = 7.5 \text{ cm}$$

$$H = 4.45 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 196.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,39 \text{ g/cm}^3$$

❖ 3^e échantillon :

$$m_{moule} = 14.66 \text{ g}$$

$$M_1 = 117.26 \text{ g}$$

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$H = 3.7 \text{ cm}$$

$$V_m = \pi \frac{D^2}{4} H = 72.6125 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - m_{moule}}{V_m} = 1,41 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{app} = \frac{1.43 + 1.39 + 1.41}{3} = 1.41 \text{ g/cm}^3$$

b) Masse volumique absolue

❖ 1^e échantillon :

$$M_{ech} = 559.28 \text{ g}$$

$$V_1 = 800 \text{ ml}$$

$$V_2 = 1020 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,54 \text{ g/cm}^3$$

❖ 2^e échantillon :

$$M_{ech} = 417.26 \text{ g}$$

$$V_1 = 600 \text{ ml}$$

$$V_2 = 765 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,52 \text{ g/cm}^3$$

❖ 3^e échantillon :

$$M_{ech} = 416.6 \text{ g}$$

$$V_1 = 600 \text{ ml}$$

$$V_2 = 760 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{M_{ech}}{V_1 - V_2} = 2,6 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{abs} = 2,54 + 2,52 + 2,6 = 2.553 \text{ g/cm}^3$$

ANNEXE 5 : LOS ANGELES ET ABSORPTION

Los Angeles

Gravier roulé	
Poids échantillon (M ₁)	5000
Poids refus tamis 1.6 mm (M ₂)	2436
Poids passant tamis 1.6 mm (M ₁ -M ₂)	2564
Coefficient Los Angeles $= 100 * \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right)$	51.28

ABSORPTION

Tout-venant de Goma/ RDC		
A	Poids de l'échantillon (séchage à l'étuve) g	1714.8
B	Poids de l'échantillon (saturé et superficiellement sec) g	1739.7
C	Poids de l'échantillon dans l'eau g	1016.5
Sd	Masse volumique relative (OD)=(A/(B-C) g/cm ³	2.40
Ss	Masse volumique relative (SSD)=B/ (B-C) g/cm ³	2.41
Sa	Masse volumique absolue=A(A-C) g/cm ³	2.50
Ab	Absorption = 100(B-A) /A %	1.5

ANNEXE 6: RESISTANCE DES BETONS EN COMPRESSION

Résistance moyenne de compression à 28 jours (Mpa)

Gravier	Sables	Ciments	F en KN	Contrainte Max	Résistance moyenne de compression à 28 jours (MPa)
Roulé	Roulé	Hima CEM IV 32.5N	147.17	7.32	
			132.83	6.607	6.955
			139.5	6.938	
		Nyati CEM II 32.5N	77.661	3.863	
			84.851	4.22	4.359
			100.481	4.995	
		Prime CEM II 42.5N	219.857	10.935	
			184.036	9.153	10.3
			217.795	10.832	
	Concassé	Hima CEM IV 32.5N	166.779	11.09	
			198.514	11.816	11.51
			188.56	9.378	
		Nyati 32.5N	209.26	7.624	
			222.959	9.662	8.41
			219.638	11.64	
		Prime CEM II 42.5N	143.864	8.95	
			182.311	9.873	14.88
			150.33	7.967	
Roulé	Hima CEM IV 32.5N	219.857	10.935		
		208.026	10.346	9.803	
		139.5	8.128		
	Nyati CEM II 32.5N	122.604	6.098		
		156.203	7.769	7.1	
		150.431	7.482		
	Prime CEM II 42.5N	250.167	12.442		
		263.397	13.181	12.73	
		253.037	12.586		
Concassé	Hima CEM IV 32.5N	298.485	14.845		
		291.789	14.512	14.09	
		261.228	12.921		
	Nyati 32.5N	213.566	10.624		
		223.532	11.118	10.41	
	215.489	10.717			

		Prime CEM II 42.5N	399.132	19.851	
			385.418	19.169	19.2
			369.956	18.456	

Variation des résistances de béton en pourcentage

Variation R28 en %						
Constituants	S R/ 350 Kg	S R/ 400 Kg	S R/ 350 Kg	S C/ 350 Kg	S R/ 350 Kg	S C/ 400 Kg
Graviers roulé et ciment Nyati R28	4.3	7.1	4.3	8.41	4.3	10.41
	39.4 %		48.8%		58.6%	
Graviers roulé et ciment Nyati R28	6.9	9.8	6.9	11.5	6.9	14.09
	29.5%		40%		51%	
Graviers roulé et ciment Nyati R28	10.3	12.7	10.3	14.8	10.3	19.2
	18.8%		30.4%		46.3%	

ANNEXE 7 : COURBE OPTIMALE

