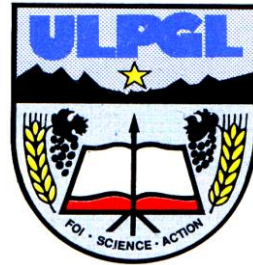


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**ÉTUDE MÉCANIQUE ET ÉCONOMIQUE DU
BÉTON AUX GRAVIERS CONCASSÉS ET DU
BÉTON AUX GRAVIERS TOUT-VENANTS
CONFÉCTIONNÉS À GOMA**

Par BAHATI JOEL Joe

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme de Bachelor en Sciences de l'ingénieur.

Mention : Génie Civil

Directeur : CT. Ing. Ally ALINABIWE

Encadreur : Ir. CIRHUZA BADESIRE Paterne

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

EPIGRAPHE

« Vous ne changerez jamais les choses en combattant la réalité existante. Pour changer les choses, vous devez construire un modèle qui rend le modèle existant obsolète ».

Richard Buckminster Fuller

IN MEMORIAM

À la mémoire de madame DIELA SHUKURU Rosette.

DEDICACES

À nos très chers parents BAHATI KABUYUNGU Deogracias et MAISHA LUGOZI Victoria pour le sacrifice qu'ils se sont donnés afin que nous soyons à ce niveau.

BAHATI JOEL Joe

REMERCIEMENTS

Le présent travail n'est nullement pas le fruit de nos seuls propres efforts, mais plutôt de ceux de plusieurs. Ce serait de l'ingratitude de notre part de ne pas reconnaître leurs interventions.

De prime abord, nos remerciements s'adressent à l'Eternel Dieu pour la grâce qu'il ne cesse de nous accorder.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre directeur, le CT. Ing. Ally ALINABIWE qui, malgré ses multiples occupations, a accepté de diriger ce travail et à notre encadreur, l'Ingénieur CIRHUZA BADESIRE Paterne qui a donné de son temps pour l'encadrement de ce travail.

Nous remercions également l'Assistant Ir. KOKO KATUMBI Pascal de nous avoir guidé tout au long des travaux effectués au laboratoire.

Nous adressons aussi notre plus grande reconnaissance à nos précieux parents notamment à notre père BAHATI KABUYUNGU et à notre mère MAISHA LUGOZI Victoria, les sacrifices consentis nous vont droit au cœur, voilà pourquoi nous vous prions de voir en ceci l'expression de notre reconnaissance.

Nos sentiments de gratitude s'adressent aux familles Justin BAHARANYI et Birindwa BAHARANYI pour leurs soutiens tant morale, matériels et financiers, que Dieu vous bénisse abondamment.

Notre gratitude s'adresse également à nos frères et sœurs, Godefroy BAHATI, Isaac HAKIZA, PATRICK, Deborah BAHATI, Diela BAHATI, Narcisse RUBENGA, Rebecca BAHATI, pour leur tendresse, gentillesse, et les bons moments vécus ensemble.

A tous nos amis, connaissances et camarades de promotion de la L3 Génie-Civil, L3 Génie Elec-Info de l'année académique 2022-2023, avec qui nous avons partagés les joies et peines durant cette longue expérience académique.

En fin, que tous ceux dont les noms ne sont pas énumérés dans ce travail, de peur à blesser leur modestie, trouvent à travers ces quelques lignes l'éclat de leur fierté et qu'ils sachent que nous leur en sommes vivement reconnaissants pour leur générosité.

BAHATI JOEL Joe

RESUME

Le béton est principalement constitué de ciment, de l'eau et des granulats. Les granulats constituent environ 80% du poids total du béton et lui confère sa résistance, ils peuvent être d'origine naturel ou artificiel. Le présent travail s'est proposé de mener une étude mécanique et économique du béton fait à base des graviers concassés et celui fait à base des graviers tout-venants. Pour y parvenir, il a été question tout d'abord de faire la caractérisation des différents constituants du béton, notamment du ciment, du sable et des graviers, ensuite la formulation des bétons d'étude par la méthode de Dreux-Gorisse et enfin la détermination des propriétés des bétons d'étude à l'état frais et à l'état durci. Le travail s'est conclu par une évaluation du coût de production pour 1 mètre cube de béton fait à base de chacun des graviers d'étude. La formulation des bétons a été effectuée à 3 niveaux de résistance, soit 20Mpa, 25Mpa et 30Mpa. Les résultats de l'essai de compression sur les bétons après 28jours d'âge ont donné une moyenne de 8,419Mpa ; 13,818Mpa et 14,184Mpa respectivement pour les trois formulations du béton à base des graviers tout-venant et une moyenne de 9,504Mpa ; 13,846Mpa et 14,309Mpa respectivement pour les trois formulations du béton à base des graviers concassés. Ainsi, les résultats obtenus ont révélé que le béton fait à base de graviers concassés présente respectivement un accroissement de la résistance à la compression d'environ 12,9%, 0,2% et 0,88% en comparaison à la résistance du béton à base des graviers tout-venant. Du point de vue économique, il a été remarqué que le béton à base des graviers concassés revient cher comparé à celui des graviers tout-venant, soit une différence de 7,38\$ /m³ à 20Mpa ; 7,48\$ /m³ à 25Mpa et 7,62\$ /m³ à 30Mpa, ce qui correspond à 6,88% ; 6,2% et 5,69% d'écart respectifs pour les trois formulations.

Mots clés : Graviers Tout-venants, Graviers Concassés, Résistance mécanique, Coût.

ABSTRACT

Concrete consists mainly of cement, water and aggregates. Aggregates make up around 80% of the total weight of concrete and give it its strength. They can be of natural or artificial origin. The aim of the present work was to carry out a mechanical and economic study of concrete made from crushed gravel and that made from all-vegetable gravel. This was achieved by first characterizing the various concrete constituents, notably cement, sand and gravel, then formulating the study concretes using the Dreux-Gorisse method, and finally determining the properties of the study concretes in the fresh and hardened states. The work concluded with an evaluation of the production cost for 1 cubic meter of concrete made from each of the study gravels. The concretes were formulated at 3 strength levels: 20Mpa, 25Mpa and 30Mpa. The results of the compression test on the concretes after 28 days of age gave an average of 8.419Mpa, 13.818Mpa and 14.184Mpa respectively for the three concrete formulations based on all-round gravel and an average of 9.504Mpa, 13.846Mpa and 14.309Mpa respectively for the three concrete formulations based on crushed gravel. The results obtained showed that concrete made with crushed gravel had a respective increase in compressive strength of around 12.9%, 0.2% and 0.88%, compared with concrete made with alluvial gravel. From an economic point of view, it was noted that concrete made from crushed gravel was more expensive than that made from all-veneer gravel, with a difference of \$7.38\$ /m³ at 20Mpa, \$7.48\$ /m³ at 25Mpa and \$7.62\$ /m³ at 30Mpa, corresponding to respective differences of 6.88%, 6.2% and 5.69% for the three formulations.

Key words: *Alluvial gravel, Crushed gravel, Mechanical strength, Cost.*

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I-1 Procédés de fabrication du ciment</i>	11
<i>Figure II-1 Ciment PRIME CEMENT 42,5N</i>	26
<i>Figure II-2 Granulats utilisés: (1)Graviers concassés, (2)Sable du Rwanda et (3)Graviers tout-venants</i>	27
<i>Figure II-3 Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement recherchée.</i>	39
<i>Figure III-1 Courbe granulométrique du sable</i>	49
<i>Figure III-2 Courbe granulométrique des graviers concassés</i>	49
<i>Figure III-3 Courbes granulométrique des graviers tout-venants</i>	50
<i>Figure III-4 Coefficient Los Angeles</i>	51
<i>Figure III-5 Dosage en eau et en ciment</i>	54
<i>Figure III-6 Valeur de l'affaissement cône d'Abrams</i>	56
<i>Figure III-7 Masse volumique des bétons à l'état frais</i>	57
<i>Figure III-8 Masse volumique des bétons à l'état durci</i>	58
<i>Figure III-9 Résistance à la compression à 28jours</i>	59
<i>Figure III-10 Evaluation économique</i>	60

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I-1 Classification et mode d'obtention des granulats naturels</i>	5
<i>Tableau I-2 Classes granulaires et caractéristiques dimensionnelles</i>	7
<i>Tableau I-3 Classification des ciments selon la résistance</i>	13
<i>Tableau II-1 Valeurs préconisées pour l'équivalent de Sable</i>	32
<i>Tableau II-2 Nombre des boulets en fonction de la classe granulaire</i>	34
<i>Tableau II-3 Estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient LA</i>	34
<i>Tableau II-4 Interpretation de l'indice de forme des graviers</i>	35
<i>Tableau II-5 Valeurs du coefficient granulaire G</i>	39
<i>Tableau II-6 Correction sur le dosage en eau en fonction de D_{max}</i>	40
<i>Tableau II-7 Teneur en eau des granulats courants en litre pour 1m³ de matériau (en volume apparent)</i>	41
<i>Tableau II-8 Valeur du coefficient correcteur K</i>	42
<i>Tableau II-9 Valeurs du coefficient de compacité</i>	43
<i>Tableau II-10 Classe de consistance des bétons</i>	46
<i>Tableau III-1 Coefficient d'uniformité et de courbure</i>	50
<i>Tableau III-2 Masse volumique absolue et apparentes du ciment, sable et des graviers</i>	51
<i>Tableau III-3 Indice de forme des graviers</i>	52
<i>Tableau III-4 Teneur en eau et porosité des granulats</i>	52
<i>Tableau III-5 Données de base pour la formulation</i>	53
<i>Tableau III-6 Coordonnées des courbes de référence OAB</i>	54
<i>Tableau III-7 Dosage massique des constituants du béton</i>	55

SIGLES ET ABBREVIATIONS

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AFNOR	: Association Française de Normalisation
BTP	: Bâtiment et Travaux Publics
C	: Dosage en ciment
Cm	: Centimètre
D_{max}	: Diamètre du plus gros granulat
E	: Dosage en eau
EN	: Norme Européenne
$\frac{C}{E}$: Rapport ciment sur eau
G	: Coefficient granulaire
Kg	: Kilogramme
KN	: Kilo Newton
Mpa	: Méga pascal
mm	: Millimètre
MF	: Module de finesse
NF	: Norme Française
ULPGL	: Université Libre des Pays des Grands Lacs

TABLE DES MATIERES

EPIGRAPHE.....	i
IN MEMORIAM.....	ii
DEDICACES	iii
REMERCIEMENTS	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
SIGLES ET ABREVIATIONS	ix
TABLE DES MATIERES	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I. GENERALITES SUR LE BETON.....	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 HISTORIQUE	3
I.3 LES CONSTITUANTS DU BETON.....	4
I.3.1 Les granulats	4
I.3.2 Le ciment.....	10
I.3.3 L'eau de gâchage.....	13
I.3.4 Les adjuvants.....	13
I.4 QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON.....	15
I.4.1 Méthode de Dreux - Gorisse	16
I.4.2 Méthode de Bolomey	16
I.4.3 Méthode de Faury.....	17
I.4.4 Méthode d'Abrams.....	17

I.4.5	Méthode de Caquot	17
I.4.6	Méthode de Valette	18
I.4.7	Méthode de Joisel.....	18
I.5	PROPRIÉTÉS DU BETON.....	18
I.5.1	Propriétés à l'état frais.....	18
I.5.2	Propriétés à l'état durci	19
I.6	LES TYPES DE BETON	20
I.6.1	Bétons légers	20
I.6.2	Bétons lourds.....	21
I.6.3	Le béton armé.....	21
I.6.4	Le béton précontraint	21
I.6.5	Le béton projeté.....	21
I.6.6	Les bétons à hautes performances (BHP).....	21
I.6.7	Les bétons autoplaçants (BAP)	22
I.6.8	Les bétons fibrés.....	22
I.6.9	Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).....	22
I.6.10	Béton compacté au rouleau (BCR).....	23
I.7	PATHOLOGIES DU BETON.....	23
I.7.1	Les pathologies physico-chimiques :	23
I.7.2	Les pathologies mécaniques.....	24
I.8	CONCLUSION PARTIELLE	25
Chapitre II.	PRESENTATION DES MATERIAUX ET METHODES	26
II.1	INTRODUCTION	26
II.2	NATURE ET ORIGINE DES MATERIAUX	26
II.2.1	Le ciment.....	26
II.2.2	L'eau de gâchage.....	27
II.2.3	Les granulats	27

II.3	LES ESSAIS SUR LES MATERIAUX	27
II.3.1	Échantillonnage	28
II.3.2	L'analyse granulométrique.....	28
II.3.3	Essai d'équivalent sable	31
II.3.4	Essai Los Angeles	33
II.3.5	Coefficient de forme des graviers	34
II.3.6	Masse volumique absolue	35
II.3.7	Masse volumique apparente	35
II.3.8	Taux d'absorption	36
II.4	FORMULATION DU BETON	37
II.4.1	Méthode de Dreux-Gorisse	37
II.5	CARACTÉRISATION DU BÉTON	44
II.5.1	Caractérisation à l'état frais.....	45
II.5.2	Caractérisation à l'état durci.....	46
II.6	CONCLUSION PARTIELLE	47
Chapitre III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS		48
III.1	INTRODUCTION	48
III.2	CARACTERISATION DES MATERIAUX	48
III.2.1	Analyse granulométrique	48
III.2.2	Coefficient d'uniformité Cu et de courbure Cz.....	50
III.2.3	Module de finesse.....	50
III.2.4	Equivalent de sable.....	51
III.2.5	Masse volumique.....	51
III.2.6	Essai Los Angeles	51
III.2.7	Coefficient de forme.....	52
III.2.8	Taux d'absorption d'eau.....	52
III.3	RÉSULTATS DE LA FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE	52

III.3.1	Données de base	53
III.3.2	Calcul des dosages	53
III.4	CARACTERISTIQUES DU BETON	56
III.4.1	Caractéristiques à l'état frais	56
III.4.2	Caractéristiques à l'état durci	57
III.5	ÉVALUATION ÉCONOMIQUE	59
III.6	CONCLUSION PARTIELLE	60
	CONCLUSION GENERALE	61
	BIBLIOGRAPHIE	62
	ANNEXES	64

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, dans le domaine du BTP et du Génie Civil, l'utilisation du matériau béton est devenue indispensable. Ce matériau constitue l'un des éléments fondamentaux dans le secteur de la construction. Le béton est défini comme un matériau composite aggloméré composé de granulats durs de différentes dimensions liés entre eux par un liant [1]. Il s'agit tout simplement d'une pierre artificielle obtenue par le durcissement d'un mélange de liant, d'eau, de granulats, éventuellement complété par des adjuvants choisis de façon rationnelle. Dans les bétons ordinaires, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment Portland. Lorsqu'il ne comporte pas les graviers, le mélange est appelé mortier [2]. Les performances, la polyvalence d'utilisation, la résistance élevée à la compression et la disponibilité à un coût abordable des composants permettent au béton d'être largement utilisé dans tous les domaines du bâtiment et du génie civil. Il convient de noter que le ciment constitue le composant le plus coûteux du béton, mais sa proportion dans la formulation du béton est inférieure à celle des autres constituants, notamment les granulats et l'eau, qui représentent une part significative du mélange de béton. Cela explique l'aspect économique du béton [2].

L'industrie du béton s'est largement développée et ceci dans la quête de l'optimisation des propriétés du béton pour une meilleure utilisation et pour en faire ressortir les meilleurs résultats. Face à cette évolution, la ville de Goma n'est pas restée indifférente, et une grande partie des ouvrages construits à Goma sont réalisés à partir de béton. Étant donné l'importance croissante de son utilisation, une étude s'avère nécessaire pour améliorer l'utilisation de ce matériau.

En ce qui concerne les constituants du béton, il est important de noter que sa résistance dépend en grande partie de son squelette granulaire formé principalement par les granulats [3]. Actuellement, la plupart des granulats utilisés dans la confection des bétons sont des granulats naturels issus de l'extraction en rivière ou en mer (granulats roulés), soit du concassage des roches de carrières (granulats concassés) [4]. À Goma, ville à la fois touristique et volcanique, on observe une certaine concurrence dans l'utilisation des granulats, en particulier des graviers, élément crucial dans la fabrication du béton.

Certains ingénieurs préfèrent utiliser des graviers concassés, tandis que d'autres optent pour des graviers provenant des coulées de lave locales, communément appelés « **Makokoto** ». Compte tenu de cette concurrence à Goma, nous proposons de mener une étude comparative entre les bétons confectionnés à partir de ces deux types de graviers présents sur le terrain. Cette étude complétera les recherches antérieures et servira de guide aux ingénieurs de Goma pour choisir le type de gravier à utiliser, choix ayant un impact technique et économique sur la construction dans la ville.

Pour parvenir aux résultats et les interpréter, nous utiliserons différentes méthodes de recherche, notamment :

- La méthode documentaire pour recueillir les ouvrages et documents nécessaires à notre travail ;
- La méthode expérimentale pour guider nos travaux de laboratoire tout au long de l'exécution de notre étude ;
- Les méthodes statistiques pour évaluer les résultats obtenus et orienter nos choix et conclusions.
- Nous tiendrons également compte de l'aspect économique en évaluant le coût de revient d' 1m^3 de béton formulé avec nos deux types de graviers, en utilisant les quantités des matériaux obtenues lors de la formulation et leurs prix sur le marché local. Cette analyse nous permettra de tirer des conclusions sur l'aspect économique de notre étude.

Mis à part l'introduction et la conclusion, Ce travail sera subdivisé en trois grands chapitres. Le premier chapitre présentera une revue de littérature pour comprendre le béton. Le deuxième chapitre abordera les matériaux, matériels et les méthodes utilisées, ainsi que les différents procédés suivis lors de la mise en œuvre des expériences en laboratoire.

Le troisième chapitre portera sur la présentation et de l'interprétation des résultats obtenus lors des expériences au Laboratoire.

Chapitre I. GENERALITES SUR LE BETON

I.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau issu du mélange du ciment, de l'eau, du sable, des graviers et éventuellement des adjuvants. Le présent chapitre traite des généralités sur le béton. Il sera question ici de présenter les constituants du béton, les méthodes de formulation du béton, les propriétés du béton, les différents types des bétons ainsi que les pathologies du béton.

I.2 HISTORIQUE

Du latin bitumen et du vieux français betun, becton, beter, le mot béton désigne un mélange de matériaux, généralement d'origine minérale, dont la qualité première est de se solidifier en constituant ainsi une roche artificielle. Le ciment semble avoir été utilisé comme liant pour fabriquer un béton hydraulique, par les Egyptiens, puis par les Grecs en Italie et enfin par les Romains, qui obtenaient ce ciment en mélangeant à la chaux vive des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles et de la terre cuite constituée de tuiles broyées [5].

L'invention du ciment, généralement attribuée à John Smeaton, vers 1756, ainsi que les développements apportés par Joseph Aspdin, qui déposa en 1824 un brevet sur la fabrication du « ciment Portland », et par Louis-Joseph Vicat, à la même époque, sont cependant à l'origine de la naissance ou de la renaissance du béton.

L'utilisation effective du béton n'a cependant pu se répandre qu'avec l'invention du béton armé. L'invention du béton armé est attribuée à Joseph Lambot, qui, en 1848, fait flotter une barque en « ciment armé », et à Joseph Monier, qui, indépendamment, produit en 1849 des bacs à fleurs avec ce même matériau [6].

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement, d'écoles, d'hôpitaux et d'infrastructures. A la fois robuste et universel, l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, et sa formulation, jusqu'aujourd'hui empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la science des matériaux [7].

I.3 LES CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un matériau composite, ses propriétés dépendent de la nature et de la qualité de ses composants mais aussi de leurs proportions relatives. Les principaux constituants du béton sont entre autres, le ciment, l'eau et les granulats.

Parlant des granulats il sied de préciser qu'ici nous avons les granulats gros (graviers) et les granulats fins (sables) ainsi pour faire court, le terme granulats fait allusion ici aux graviers et au sable. Mis à part ces trois constituants de base, le béton peut être obtenu en ajoutant, selon le besoin et les spécificités du béton, certains produits appelés adjuvants et ceci dans le but d'améliorer certaines propriétés du béton.

I.3.1 Les granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant du recyclage. Ces matériaux sont quelque fois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation est abandonnée depuis fort longtemps car en réalité ce terme signifie tout simplement une réunion de substances diverses formant un tout non homogène [8]. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent des propriétés des granulats utilisés.

En effet, les granulats se distinguent par leurs nature (origine), leur répartition granulométrique, leur masse volumique (granulats légers lorsque la masse volumique réelle est inférieure à 2g/cm^3 , courants si elle est comprise entre 2 et 3g/cm^3 et granulats lourds si la masse volumique réelle est au-delà de 3g/cm^3), etc [2].

I.3.1.1 Classification selon la provenance

De manière très générale, en génie civil, on classe les granulats en trois grandes catégories selon la provenance :

- ❖ Les granulats naturels qu'on tire des carrières, des gravières ou des sablières ;
- ❖ Les granulats recyclés qui proviennent de déchets de démolition (bétons de ciment portland, enrobés bitumineux, verre broyé, matière vitrifiée ;
- ❖ Les granulats artificiels qu'on peut fabriquer pour des usages particuliers, comme les granulats légers pour béton. On trouve aussi des sous-produits d'origine industrielle

comme les laitiers de haut fourneau, les scories, les cendres volantes et les résidus de mines [9].

a) Les granulats naturels

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine. Parmi cette catégorie nous pouvons avoir les granulats roulés ainsi que les granulats concassés. Le Tableau I.1. Présente une classification ainsi que le mode d'obtention des granulats naturels.

Tableau I-1 Classification et mode d'obtention des granulats naturels [10]

Granulats	Obtenus par	A partir de
Roulés (aspect des grains arrondis et polis)	<ul style="list-style-type: none"> • Criblage • Lavage • Dragage • Extraction 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux alluvionnaires • rivières
Concassés (aspect des grains anguleux à arêtes vives)	<ul style="list-style-type: none"> • Concassage • Criblage • Dépoussiérage 	<p>Roches sédimentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carbonatée : calcaires, dolomies, alluvions calcaires • Silicatées : grés, grés quartzites, moraines, alluvions siliceuses <p>Roches magmatiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grenues : granites, diorites • Microgrenues : microgranites, basaltes, andésites <p>Roches métamorphiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grenues : gneiss, calcaire cristallin, migmatites • Microgrenues : schistes, quartzites.

b) Les granulats recyclés

Les granulats recyclés sont des granulats résultant de la transformation des matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se range des granulats comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux, ...

Les granulats recyclés de béton sont formés de granulats d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes : le mortier et le granulat d'origine. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat

d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé de béton. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat de béton. Le mortier résiduel attaché au granulat naturel confère au granulat recyclé de béton des caractéristiques différentes de celles des granulats naturels notamment une masse volumique inférieure à celle des granulats naturels, une absorption d'eau élevée, une faible résistance à l'abrasion, etc. [4].

c) Les granulats artificiels

Ces granulats proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais. Dans cette catégorie on retrouve aussi les sous-produits industriels tel que les laitiers de haut fourneau, les scories, les cendres volantes et les résidus de mines [9].

Nous pouvons ainsi citer les granulats légers, les granulats de laitier et les granulats spéciaux.

❖ Les granulats légers

Les granulats légers sont généralement les argiles ainsi que les polystyrènes expansés, la vermiculite fabriquée avec certains micas et la perlite issue des laves volcaniques. Ils sont appelés granulats légers à cause de leur masse volumique inférieure à celle des granulats naturels.

❖ Les granulats de laitier

Le laitier de haut fourneau qui s'est refroidi lentement est proche d'une roche artificielle cristallisée. Il est ensuite traité comme les granulats concassés pour au final générer des granulats de laitier.

❖ Les granulats spéciaux

Les granulats spéciaux servent à la fabrication des bétons spéciaux tels que les bétons réfractaires (chromite, corindon, etc.) ainsi qu'au revêtement des sols des bâtiments industriels (limonite, magnétite, fonte en paillettes, hématite, etc.) [4].

I.3.1.2 Classification selon la grosseur

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres. On appelle « tamisât » la partie qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis. Le terme « granulat 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 XP P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles comme nous pouvons le voir au niveau du Tableau I.2 [8].

Tableau I-2 Classes granulaires et caractéristiques dimensionnelles [8]

Classes	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2\text{mm}$ et ayant au moins 70% de grains passant au tamis de 0,63mm
Sablons	0/D	$D \leq 1\text{mm}$ et avec au moins 70% de grains passant au tamis de 0,63mm
Sables	0/D	D est tel que $1\text{mm} < D \leq 6,3\text{mm}$
Graves	0/D	$D > 6,3\text{mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$
Ballasts	d/D	$d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont différentes dimensions.

I.3.1.3 Classification selon la destination

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles.

- ❖ La catégorie A correspond aux granulats destinés à la confection de bétons de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiment pour lesquels la résistance R_c est supérieure ou égale à 35MPa ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B et C étant tolérées.
- ❖ Les granulats de catégorie B sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à la condition que leur coefficient d'absorption respecte les spécifications aux granulats de catégorie A.
- ❖ Les catégories C et D conviennent pour les bétons courants à la condition, dans le cas d'utilisation de granulats D, que seules 2 de leurs caractéristiques soient présentes et que les autres correspondent à celles de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la confection de bétons courants [8].

I.3.1.4 Caractéristiques des granulats

Nous distinguons plusieurs caractéristiques des granulats qui, d'une manière générale, peuvent être groupées en trois familles dont la première est celle des caractéristiques géométriques, la deuxième concerne les caractéristiques physiques et la dernière pour les caractéristiques mécaniques.

I.3.1.4.1 Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques des granulats sont entre autres la forme, le coefficient d'aplatissement et l'angularité.

❖ La forme

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

La forme d'un granulat est définie par sa longueur L, son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles, sa grosseur G [8].

❖ Le coefficient d'aplatissement

Il caractérise la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur. Il est par définition le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$ (G représentant en fait la dimension de la maille carrée minimale au travers de laquelle passe l'élément). Le coefficient d'aplatissement est déterminé par un double tamisage, d'abord au travers de la série de tamis à mailles carrées utilisée pour l'étude de la granulométrie, puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58 [8].

❖ L'angularité

L'angularité d'un granulat est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et des rapports de concassages. Une angularité assez forte favorise l'adhérence mécanique entre les granulats et le mortier. Par contre, chaque fois qu'on recherche un angle de frottement interne élevé, on préfère employer des particules angulaires de faible sphéricité [9].

I.3.1.4.2 Caractéristiques physiques

Parlant des caractéristiques physiques des granulats, nous pouvons citer la masse volumique, la porosité, la teneur en eau, le taux d'absorption d'eau et la propreté des granulats.

❖ La masse volumique

Les masses volumiques des granulats sont définies et déterminées suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, EN 1097-3, EN 1097-6.

Nous distinguons ici la masse volumique apparente qui est la masse par unité de volume de l'échantillon de granulats, en tenant compte des vides le constituant. La masse volumique apparente d'un granulat dépend de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que du degré de compactage et d'humidité.

La masse volumique absolue d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci, sans tenir compte des vides le constituant. La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats secs [4].

❖ **La porosité**

La porosité d'un granulat se définit comme le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de celui-ci. La présence de pores internes dans les sables est en rapport direct avec la densité de ceux-ci. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface. La porosité d'un sable est liée au processus de formation de sa roche mère [2].

❖ **La teneur en eau**

La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau contenu au poids des grains composant le granulat. Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats [2].

❖ **Le taux d'absorption d'eau**

L'absorption d'eau (A_b %) des granulats est par définition le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Le taux d'absorption des graviers est déterminé par un essai normalisé (NF P 18 - 555, Décembre 1990). L'essai consiste à exprimer le rapport d'augmentation de la masse de l'échantillon de gravier en pourcentage après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon [2].

❖ **La propreté des granulats**

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques, ...) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains. Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Les granulats qui ne sont pas propres doivent être lavés avant l'utilisation. Les graviers étant facilement lavables, les impuretés semblent être plus courantes dans le sable. Les normes utilisées pour l'évaluation de la propreté des granulats sont : la norme NF EN 933-8 (1999) pour le sable et la norme NF P18-591 pour la propreté des graviers [2].

I.3.1.4.3 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers. La résistance mécanique des granulats dépend des caractéristiques intrinsèques de la roche d'origine.

Nous distinguons entre autres la résistance à la fragmentation déterminée par l'essai Los Angeles suivant les normes NF P 18-573, XP P 18-540 et ASTM C-33 ainsi que la résistance à l'attrition et à l'usure qui à son tour est déterminée par l'essai Micro-Deval suivant les normes NF P 18-577, NF EN 1097-1 et XP P 18-540 [4].

I.3.2 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durci par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. La majorité des propriétés du béton sont liées à la nature du ciment et à sa composition : rhéologie, résistance mécanique, résistance aux agressions chimiques, durabilité, aspect, ... d'où l'intérêt de connaître les caractéristiques de ses composants.

I.3.2.1 La fabrication des ciments courants

Le constituant principal des ciments est le clinker (K), qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne 80 % / 20 %.

Le clinker, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland (CEM I). Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant par Co-broyage au mélange d'autres constituants tels que les laitiers granulés de haut fourneau (S), les matériaux pouzzolaniques (Z ou Q), les cendres volantes (V ou W), les schistes calcinés (T), le calcaire (L ou LL), les fumées de silice(D).

La figure I.1. montre les procédés pour la fabrication du ciment [11].

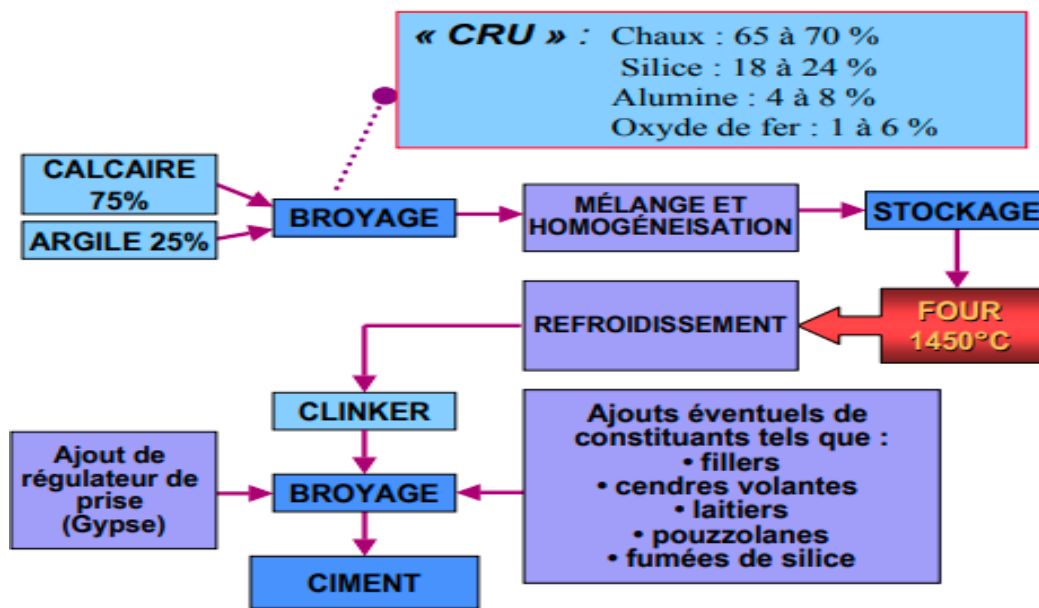


Figure I-1 Procédés de fabrication du ciment [11]

I.3.2.2 Types de ciments

Les types de ciments sont fonction de la teneur en clinker ainsi que d'autres constituants secondaires. Il en existe plusieurs.

La norme NF EN 197-1 classe les ciments courants en 5 types selon la nature et la proportion de leurs constituants.

- ❖ CEM I : Ciment Portland
- ❖ CEM II : Ciment Portland composé
- ❖ CEM III : Ciment de Haut Fourneau
- ❖ CEM IV : Ciment pouzzolanique
- ❖ CEM V : Ciment composé

La norme NF EN 197-1 concerne les ciments les plus courants.

D'autres normes existent concernant soit des propriétés particulières (prise mer : PM, résistance aux eaux sulfatées : ES, ...) soit des ciments ayant des normes entièrement spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel.

➤ Le ciment Portland : CPA-CEM I

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

➤ Le ciment Portland composé : CPJ-CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitiers de haut fourneau, fumées de silice (limitées à 10 %), pouzzolanes naturelles, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Les ciments Portland et Portland composé englobent aussi bien les ciments gris que les ciments blancs.

➤ **Le ciment de haut fourneau : CHF-CEM III/A ou B**

Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker. ... et CLK-CEM III/C (ex. ciment de laitier au clinker) Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

➤ **Le ciment au laitier et aux cendres : CLC-CEM V/A ou B**

Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier. Tous ces ciments peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

➤ **Le Ciment pouzzolanique : CPZ-CEM IV/A ou B**

Il contient 45 à 90% de clinker, 10 à 55% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumé de silice, ces dernières étant limitées à 10%. La teneur en constituants secondaires est limitée à 5% au plus. [12]

I.3.2.3 Les classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur de la résistance normale du ciment à 28 jours

Pour chaque classe de résistance, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm² (1 N/mm² = 1 Mpa = 10 daN/cm² = 10 bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée et est donnée dans le tableau I.3 [12].

Tableau I-3 Classification des ciments selon la résistance [4]

Désignation de la classe	Résistance à la compression (en Mpa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	-	> 16	> 32,5	< 52,5
32,5 R	> 13,5	-		
42,5 N	> 12,5	-	> 42,5	< 62,5
42,5 R	> 20	-		
52,5 N	> 20	-	> 52,5	-
52,5 R	> 30	-		

I.3.3 L'eau de gâchage

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par les normes NF P 18-303 de 1941 et NF EN 1008.

L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la confection du béton. Elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile la mise en place du béton.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher de béton parce qu'elles contiennent dans certains cas un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés du béton, notamment les propriétés physique et mécanique (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité de béton) ces impuretés éventuellement contenue dans l'eau de gâchage, soit des composés chimiques qui peuvent être actifs.

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée. La plus disponible est aussi celle qui sert de référence, c'est l'eau potable distribuée par le réseau de service public, les autres eaux les plus utilisées sont les eaux de pompage en provenance des nappes de cours d'eau ou de réservoir.

Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est grâce à l'eau que le béton peut être manipulé.

I.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des

modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci. Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides. Certains adjuvants existent en poudre, en fin de réduire leur coût de transport.

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique [8].

Selon les normes européennes, on distingue : les plastifiants, les super plastifiants, les rétenteurs d'eau, les entraîneurs d'air, les accélérateurs et retardateurs de prise, les accélérateurs de durcissement et les hydrofuges.

❖ **Les plastifiants réducteurs d'eau**

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ils provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport Eau/Ciment, donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité [8].

❖ **Les super plastifiants**

Ce sont en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de naphthalène. Ils peuvent être aussi fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois purifiés et traités (lignosulfonates). Ces adjuvants peuvent également avoir une caractéristique complémentaire de retardateur. Ils réduisent considérablement la demande en eau et produisent des bétons avec une ouvrabilité normale ou améliorée, voire fluide sans entraîner la diminution de la résistance mécanique [12].

❖ **Les rétenteurs d'eau**

Ce sont des produits d'addition généralement en poudre qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons.

On utilise généralement des méthyl cellulose (Methocel) qui ont la propriété d'augmenter de volume en fixant l'eau libre du béton.

Les rétenteurs d'eau sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment [8].

❖ **Les entraîneurs d'air**

Les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage.

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résines de synthèse, acides gras, etc.

Ces adjuvants introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage, sous forme d'un très grand nombre de microbulles, dont 80% d'entre elles ont un diamètre inférieur à 100micros [8].

❖ **Les accélérateurs de prise et de durcissement**

Les accélérateurs de prise ont pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, les mortiers ou les coulis. Les accélérateurs du durcissement ont pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, les mortiers ou les coulis. Ces adjuvants ne contiennent pas de chlore ; les constituants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque [12].

❖ **Les retardateurs de prise**

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton, le mortier ou le coulis. Ils sont à la base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb.

❖ **Les hydrofuges**

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons, mortiers ou coulis durcis. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates). Ils peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants [12].

Il ne faut pas les confondre avec les hydrofuges de surface qui s'appliquent au rouleau sur le béton durci et qui sont bien souvent à base de silicone. Ces produits ne sont vraiment efficaces que si le béton est bien compact et homogène, et que toutes les précautions sont prises afin d'éviter la formation des fissures [8].

I.4 QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes ; elles aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux », le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac [8].

I.4.1 Méthode de Dreux - Gorisse

La méthode de Dreux, offre 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 déterminée cette composition, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués.

En général, les données suivantes sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux : il s'agit entre autres de la résistance à la compression du béton ainsi que de la maniabilité du béton.

Le domaine d'application des abaques est celui des bétons courants présentant une résistance à 28 jours, comprise entre 15 Mpa et 40 Mpa.

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par l'essai au cône d'Abrams [10].

I.4.2 Méthode de Bolomey

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 kg/m³ ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), la courbe qui soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la formule I.1 :

$$P = A + (100 - A) * \left(\sqrt{\frac{d}{D}} \right) \quad (I.1)$$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ;

D : est le diamètre des plus gros grains ;

A : la valeur de A dépendra de :

- La consistance souhaitée de béton ;
- La provenance des granulats.

Elle varie de 6 à 16, étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue [10].

I.4.3 Méthode de Faury

Cette méthode est venue en 1941 compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent une résistance mécanique supérieure aux bétons Bolomey correspondants.

Cette méthode présente des particularités du fait qu'elle est applicable à tous les granulats, quelle qu'en soit leur masse volumique. Faury étudie l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{D}$.

Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi et du Rayon moyen du moule [10].

L'effet de paroi est déterminé à l'aide de la relation I.2 et le rayon moyen du moule par la relation I.3.

$$Ep = \frac{D}{R} \quad (I.2)$$

$$R = \frac{\text{Volume du béton (aciens déduits)}}{\text{surface de tout ce qui est en contact du béton (coffrage+aciens)}} \quad (I.3)$$

I.4.4 Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduit au minimum [8].

I.4.5 Méthode de Caquot

Caquot a proposé, dès 1937, une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètre maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise en œuvre, la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains [8].

I.4.6 Méthode de Valette

VALETTE a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». On calcule d'abord le dosage de sable et du ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment [8].

I.4.7 Méthode de Joisel

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale, est fonction de \sqrt{dm} , m dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage ; m peut alors varier de 3 à 10.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité.

Comme pour les méthodes Faury et Valette, le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement, sur le plan granulométrique, à la compacité maximale ; ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200Kg/m³) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400Kg/m³ dans la plupart des cas).

Une correction doit donc être apportée dans ce sens [8].

I.5 PROPRIÉTÉS DU BETON

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés. Le béton possède deux comportements : l'état frais et l'état durci.

I.5.1 Propriétés à l'état frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés.

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : nature et

dosage en ciment, forme et dimensions des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau puisse être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité.

Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances et par un phénomène de ressuage, qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité, d'hydratation du ciment et de respect des spécifications liées à la classe d'exposition à laquelle est soumis l'ouvrage.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur le chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou "slump test", qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique (norme d'essai NF EN 12350-2). L'ouvrabilité d'un béton est sa capacité à maintenir, durant un temps déterminé, une fluidité compatible avec les caractéristiques du coffrage ou du moule et les moyens de mise en place prévus [12].

I.5.2 Propriétés à l'état durci

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul de dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la propriété essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à 28 jours d'âge. Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance en compression.

De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres propriétés telles que la perméabilité, la porosité etc. Pour maximiser la résistance du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat [13].

I.5.2.1 Cure humide

En présence d'une humidité relative (HR) $\geq 80\%$ et tant qu'il y a des grains de ciment non encore hydratés, le béton continuera à durcir dans le temps. Lorsque $HR < 80\%$, l'hydratation peut s'arrêter. Si par contre, on sature le béton de nouveau, l'hydratation reprendra. Il est toutefois conseillé d'assurer un bon murissement du béton dès le jeune âge d'une manière continue jusqu'à atteindre les performances voulues [13].

I.5.2.2 La résistance à la compression

La résistance mécanique du béton est caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton et du rapport E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment).

La contrainte maximale en compression est évaluée par un test de compression uni-axial sur une éprouvette cylindrique de longueur L et de diamètre Φ .

Le choix de réaliser le test à 28 jours d'âge n'est que purement normatif [13].

I.5.2.3 La masse volumique du béton durci

Elle dépend de la densité et quantité des matériaux, des quantités d'air emprisonné et entraîné.

I.5.2.4 La porosité

Une propriété essentielle du béton durci est sa porosité, rapport du volume des vides au volume total. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton. La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par :

- ❖ L'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvres adaptés ;
- ❖ L'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité [13].

I.6 LES TYPES DE BETON

Avec les nouveaux moyens technologiques, la famille des bétons est en constante évolution. Le béton est un matériau dont la composition peut évoluer. On peut adapter son dosage et ses constituants en fonction des performances recherchées. En matière de construction, les possibilités sont multiples, notamment en ce qui concerne le choix du béton. En effet, il existe différents types de béton, dont les caractéristiques sont à connaître.

I.6.1 Bétons légers

La norme NF EN 206-1 définit les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2000 kg/m³, parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction.

I.6.2 Bétons lourds

C'est un béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celle des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau.

I.6.3 Le béton armé

C'est un béton auquel on associe des armatures en acier, mélange de fer et de carbone, autrement dit un ferrailage. L'acier associé au béton apporte une certaine résistance mécanique à un ouvrage. Le béton résiste mieux à la compression tandis que l'acier résiste mieux à la traction. Ces deux matériaux sont donc complémentaires et leur association réduit entre autres les problèmes de microfissures qui affectent les bâtiments.

I.6.4 Le béton précontraint

Au moment de la fabrication, le béton va être comprimé à l'aide de câbles de précontrainte en acier. Il existe deux méthodes pour pré contraindre du béton, appelées pré-tension ou post-tension. Le béton précontraint est alors comprimé avant sa prise ou après durcissement. Le béton précontraint est bien souvent employé lors de la réalisation d'ouvrages d'art ou de génie civil.

I.6.5 Le béton projeté

Le béton projeté est mis en œuvre au moyen d'une lance par projection avec jet d'air comprimé. Ce type de béton peut s'employer sur toutes les surfaces, mêmes les plus irrégulières. Il existe deux techniques de projection du béton, à savoir par voie sèche ou par voie humide. Sa composition n'est pas différente de celle des autres bétons, si ce n'est que des fibres métalliques peuvent y être ajoutées. Le béton projeté peut notamment être utilisé dans le cadre de travaux souterrains ou d'assainissement.

I.6.6 Les bétons à hautes performances (BHP)

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- ❖ Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 Mpa sur cylindre ;
- ❖ Un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ils présentent une micro texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs. La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et

les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité.

I.6.7 Les bétons autoplaçants (BAP)

Les BAP se caractérisent par leur fluidité, un faible ressuage, leur pompabilité ainsi qu'un bon maintien de leur ouvrabilité. Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogue à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais. La fluidité du BAP permet sa mise en place aisée par pompage.

I.6.8 Les bétons fibrés

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

On distingue trois grandes familles de fibres.

- ❖ Les fibres métalliques : acier, inox, fonte (amorphe).
- ❖ Les fibres organiques : polypropylène, polyamide, acrylique, mélange polypropylène/polyéthylène, kevlar, aramide, carbone.
- ❖ Les fibres minérales : verre, wollastonite, basalte, mica.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, bi ondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m³ de béton.

I.6.9 Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)

Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP), derniers nés de cette génération de bétons, sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250 Mpa. Leur formulation fait appel à des adjuvants super plastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques ou organiques).

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- ❖ Une très grande ouvrabilité ;
- ❖ Une compacité très importante ;
- ❖ Une faible perméabilité ;
- ❖ Des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises (pour les BFUP structuraux) entre 150 et 250 Mpa ;
- ❖ Des résistances mécaniques, au jeune âge, très élevées ;
- ❖ Une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs) ;

I.6.10 Béton compacté au rouleau (BCR)

Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux (cendres volantes, fibres calcaires, résidus miniers etc...). Il est utilisé pour la construction de barrages en raison de sa faible chaleur d'hydratation initiale (béton de masse) et aussi très utilisé au Canada dans la construction des routes [14].

I.7 PATHOLOGIES DU BETON

Tout au long de son existence, le béton est soumis à de multiples phénomènes (climatiques, physico-chimiques, mécaniques, etc.) pouvant entraîner de potentiels désordres et dégradations impactant directement la santé des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages. Il existe plusieurs types de pathologies dont voici ci-dessous une liste non exhaustive.

Nous allons subdiviser ces pathologies en deux catégories [15] :

I.7.1 Les pathologies physico-chimiques :

A. La carbonatation : le portlandite du ciment hydraté réagit petit à petit avec le CO₂ de l'air. Cette réaction réduit donc le pH du béton de 13 à 9 environ. Il se fait remarquer par la corrosion des armatures entraînant le gonflement voire l'éclatement du béton.

Traitement : utilisation des bétons peu poreux, avec un ciment composé générant peu de portlandite (ciment au laitier, aux cendres, fumée de silice, etc.) [15]

B. Attaque par les ions chlorures : les ions chlorures peuvent pénétrer à travers les réseaux poreux du béton et provoquer l'amorce de la corrosion. Il se fait remarquer par la corrosion des armatures avec présence des fissures dans le béton, réduction de la section des aciers, éclatement local du béton et apparition des rouilles à la surface du béton sous forme de tache non esthétique.

Traitement : utilisation de mortier de réparation après brossage des aciers, rajout d'armatures par scellement ou soudage. Mais pour prévenir, nous pouvons aussi choisir un béton compact, d'un enrobage conforme aux règles de l'art et d'un ciment adapté, utilisation d'armatures en acier galvanisé ou en inox [15].

C. Alkali-réaction : il provient de l'incompatibilité entre les granulats et le ciment. Il se fait voir par l'apparition des réseaux des fissures multidirectionnelles et gonflement pouvant affecter la structure et générant d'autres pathologies.

Traitement : limiter la teneur en alcalin du béton [15].

D. Réaction sulfatique interne(RSI) : elle est dû à l'élévation de la température au-delà de 65°C d'un béton à base de constituants non adaptés, traitement thermique non approprié, à l'industrie de préfabrication ou certaines conditions de forte alcalinité, humidité et température. Pour les symptômes, ils sont les même que l'alcali-réaction en terme de fissurations et déformation.

Traitement : pas réellement de solution directe mais pour ralentir le phénomène, réduire les apports d'eau exogènes. Nous pouvons prévenir en limitant la température du béton avec l'utilisation de ciments peu exothermiques, eau froide, de granulats refroidies à la glace, etc [15].

E. Gel et dégel : les cycles gel et dégel fragilisent le béton. Si l'eau pénètre dans le réseau des fissures et de pores du béton pour favoriser le processus (état de saturation favorable). Il se fait observer par des fissurations internes dues à un gonflement du béton à cœur, écaillage du béton à sa surface sous l'effet du gel avec de déverglaçage.

Traitement : utilisation d'isolants pour éviter au béton de subir les températures inférieures à zéro. Pour prévenir, on utilise des granulats non gélifs et entraîneurs d'air [15].

I.7.2 Les pathologies mécaniques

A. Désordre structurel lié à l'action des charges supérieures aux charges de service : provient d'une mauvaise conception ou mise en œuvre déficiente. Il se manifeste par des fissures de retrait, de déformation de poinçonnement, de compression, de flexion, d'effort tranchant [15].

Traitement : Renforcement par l'ajout d'armatures, reprises en sous-œuvre.

B. Désordre structurel lié à un sinistre : provient d'un incendie, dégât des eaux ou catastrophe naturelle de type action du vent ou séisme. Il se manifeste par des fissures

mécaniques ou de retrait, de flexion, d'effort tranchant suite à des surcharges ou actions mécaniques supérieures à celles de la capacité portante.

Traitement : en cas d'un incendie, remplacer la partie du béton altérée et renforcer par un mortier de réparation avec de la fibre polypropylène.

Il est à noter que la meilleure protection contre ces pathologies se situe en amont de la construction, dans le choix, la qualité et la formulation des matériaux et dans leur mise en œuvre [15].

I.8 CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a porté sur les généralités sur le béton. Tout au long de ce dernier, nous avons présenté une littérature en rapport avec les différents constituants du béton, quelques méthodes de sa formulation, présenté aussi certaines propriétés courantes du béton ainsi que sa typologie. Nous clôturons ce chapitre par la présentation de quelques pathologies du béton ainsi que certains traitements y relatif.

Le chapitre suivant portera sur la présentation des matériaux ainsi que les méthodes utilisées pour l'expérimentation.

Chapitre II. PRESENTATION DES MATERIAUX ET METHODES

II.1 INTRODUCTION

Comme indiqué au niveau de la subdivision du travail dans l'introduction générale, le présent chapitre traite de la présentation des matériaux utilisés ainsi que les différentes méthodes qui ont conduit nos expérimentations.

Ce chapitre donne un aperçu sur la nature et l'origine des matériaux utilisés, présente le mode opératoire des différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de la Faculté de Sciences et Technologies Appliquées de l'ULPGL/Goma et se conclut par le choix de la méthode de formulation ainsi que la caractérisation du béton.

II.2 NATURE ET ORIGINE DES MATERIAUX

Les matériaux utilisés dans la mise en œuvre de notre travail sont de diverses natures et origines ainsi donc il sied de rappeler qu'il s'agit ici du ciment, de l'eau, du sable, des graviers tout venants et des graviers concassés.

II.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé pour nos expérimentations est le ciment **PRIME CEMENT (CEM II/A-P 42,5N)** de couleur grise, produit au **RWANDA**, de classe commerciale **42,5Mpa** et d'une masse volumique égale à **2,969g/cm³**. La figure II.1 donne des renseignements visuels sur le ciment en question.



Figure II-1 Ciment PRIME CEMENT 42,5N

II.2.2 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est potable et cette dernière est fournie par la Régie de distribution d'eau (**REGIDESO**). Recueilli directement au niveau du robinet, cette eau ne contient pas d'impuretés (matières organiques ou chimiques) pouvant nuire à la qualité du béton.

II.2.3 Les granulats

Parlant des granulats, nous allons distinguer le sable ainsi que les graviers. Dans la rubrique des graviers nous aurons les graviers tout venants ainsi que les concassés.

Le sable utilisé est le sable lavé provenant du Rwanda. Parlant des graviers tout venants, il s'agit des graviers issus de la dernière éruption volcanique de 2021 qui a frappé la ville de Goma. Ces derniers ont été ramassés sur le site du cimetière de MAKAO et faut noter qu'il s'agit ici d'un ramassage des graviers à la surface.

Concernant les graviers concassés, nous avons utilisés les graviers produits par l'entreprise **CARRIGO Sarl** et ils sont de classe 15/25. La figure II.2 donne des renseignements visuels sur les granulats utilisés.

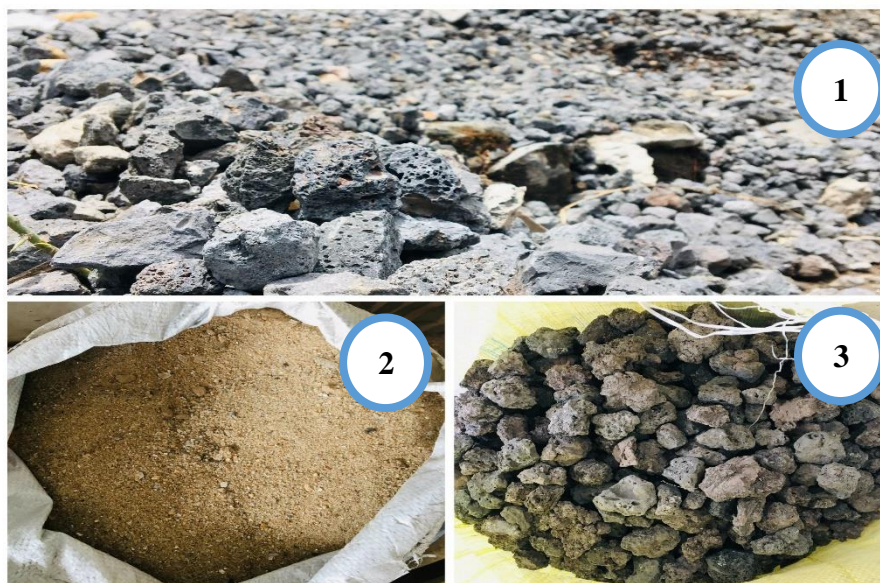


Figure II-2 Granulats utilisés: (1)Graviers concassés, (2)Sable du Rwanda et (3)Graviers tout-venants

II.3 LES ESSAIS SUR LES MATERIAUX

Ici nous allons décrire l'ensemble des essais que nous aurons à effectuer au niveau du laboratoire, il s'agit ici de l'analyse granulométrique, du degré de propreté, l'essai Los Angeles,

le coefficient de forme ainsi que la détermination de la masse volumique (apparente et absolue) des granulats.

Il sied de signaler avant tout qu'en amont de toutes ces essais, nous avons d'abord l'opération d'échantillonnage qui est une étape indispensable pour la suite des opérations.

II.3.1 Échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites des matériaux, celles-ci devant permettre de mesurer les paramètres caractéristiques de l'ensemble de matériau sur lequel on effectue le prélèvement. L'échantillon prélevé doit être représentatif de l'ensemble.

II.3.2 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer la distribution dimensionnelle des grains qui constituent un granulat. Pour cela, l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement.

Les manipulations et les conditions de manipulations pour cet essai sont décrites par la norme **NF P 18-560**.

Le refus désigne la quantité des grains retenue par un tamis. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures).

Le tamisât ou passant désigne la quantité des grains qui traverse le tamis.

Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon de granulat. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités soit numériquement soit graphiquement. Cela permet d'observer la proportion de refus cumulé ou de tamisât jusqu'à un diamètre de grain par rapport au granulat.

L'échantillon à faire passer à l'essai est préalablement placé à l'étuve à 105°C. Le mode opératoire pour la réalisation de cet essai est le suivant :

- ❖ Choisir les tamis à utilisés dans la gamme des tamis disponible ;

- ❖ Placer les tamis (de bas en haut suivant l'ordre croissant des dimensions des diamètres des mailles) sur la tamiseuse tout en insérant le récipient du fond servant à recueillir les passants du dernier tamis ;
- ❖ Mettre l'échantillon dans le tamis supérieur ;
- ❖ Couvrir et serer le couvercle avant d'allumer la tamiseuse ;
- ❖ Allumer la tamiseuse (le tamisage se fait pendant 10minutes) ;
- ❖ Après tamisage, passer au pesage des refus partiels au niveau de chaque tamis et ceci à l'aide d'une balance de précision ;
- ❖ Pour finir, dresser un tableau des résultats (refus sur chaque tamis et refus cumulés en pourcentage) et construire la courbe granulométrique correspondante ;

La courbe granulométrique porte en abscisses les différentes dimensions des mailles des tamis et en ordonnées les tamisât exprimés en termes de pourcentage [2].

II.3.2.1 Caractéristiques liées à la granulométrie

Les caractéristiques liées à la granulométrie sont des paramètres permettant de caractériser les granulats en fonction de leur granulométrie. Il s'agit notamment du module de finesse, du coefficient d'uniformité et du coefficient de courbure.

A. Module de finesse

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 et 5mm. Elle est déterminée à l'aide de la relation II.1.

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\} \quad (II.1)$$

Le module de finesse est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ **2,2 à 2,8**. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité. Le module de finesse compris entre (**2,2 < MF < 2,8**) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités. Le module de finesse (**1,8 < MF < 2,2**) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance. Le module de finesse (**2,8 < MF < 3,2**) correspond à des sables à

utiliser dans la recherche de résistances élevées, avec comme conséquence une moindre ouvrabilité et des risques de ségrégation [2].

Dans le cas où la valeur du module de finesse ne répond pas aux exigences, une correction de cette dernière est envisageable. Cette correction est exprimée par les relations II.2.

$$S1 = \frac{MF-MF2}{MF1-MF2} \quad \text{et} \quad S2 = \frac{MF1-MF}{MF1-MF2} \quad (II.2)$$

Avec :

- ❖ **S1** : proportion du sable grossier ;
- ❖ **S2** : proportion du sable fin ;
- ❖ **MF** : module de finesse recherché ;
- ❖ **MF1** : module de finesse du sable grossier ;
- ❖ **MF2** : module de finesse du sable fin.

B. Coefficient d'uniformité (Cu)

La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité appelé aussi coefficient de HAZEN [2]. Il est déterminé à l'aide de la formule II.3.

$$Cu = \frac{D60}{D10} \quad (II.3)$$

Avec :

- ❖ **D60** le diamètre effectif correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖ **D10** le diamètre effectif correspondant à 10% de tamisât.

La granulométrie est dite serrée (ou uniforme) lorsque Cu est inférieur ou égal à 2 et elle dite étalée (ou variée) dans le cas où Cu est supérieur à 2.

C. Coefficient de courbure (Cz)

Ce coefficient permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres D10 et D60. Il est déterminé à l'aide de la formule II.4.

$$Cz = \frac{D30^2}{D10 * D60} \quad (II.4)$$

Avec :

- ❖ **D60** le diamètre effectif correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖ **D30** le diamètre effectif correspondant à 30% de tamisât ;
- ❖ **D10** le diamètre effectif correspondant à 10% de tamisât.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure se situe entre 1 et 3 et que le coefficient d'uniformité est supérieur à 4 pour le gravier et à 6 pour le sable, la courbe granulométrique descend d'une manière assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Dans un tel cas, on dit que *la granulométrie est bien graduée*.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure dépasse 3, la courbe granulométrique commence à prendre la forme d'un creux orienté vers le bas ; plus la valeur augmente, plus le creux s'accroît. Si cette valeur est inférieure à 1, le creux de la courbe s'oriente plutôt vers le haut. Un coefficient de courbure trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D10 et D60 et on dit que *la granulométrie est mal graduée*.

II.3.3 Essai d'équivalent sable

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer le degré de propreté d'un sable. Les impuretés dans le sable sont de trois formes. Ils peuvent être des matières organiques, de l'argile et les matériaux fins (issus du concassage ou du broyage des roches). La présence des impuretés à la surface des sables interfère avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence sable-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les graviers, plus facilement lavables.

Le principe de l'essai d'équivalent de sable se résume à l'introduction d'une masse de sable dans deux éprouvettes graduées contenant une solution lavante, afin d'évaluer en pourcentage la proportion du sable brut par rapport aux impuretés le contenant.

L'essai d'équivalent de sable s'effectue sur un échantillon de sable humide d'une masse sèche équivalente à 120g afin d'éviter les pertes des fines particules suivant les prescriptions de la norme **NF EN 933-8 (1999)** [2].

La procédure consiste à :

- ❖ Remplir les deux éprouvettes par la solution lavante jusqu'au premier trait repère, suivit du versement de la quantité de sable tarée sujet de l'essai ;
- ❖ Eliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main suivi d'un repos de 10 minutes ;

- ❖ Boucher les éprouvettes et passer à l'agitation au moyen de l'agitateur (machine à secouer) ;
- ❖ Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface ;
- ❖ Fermer le robinet au deuxième trait de jauge (supérieur) et sortir le tube laveur ;
- ❖ Reposer les éprouvettes pendant 20 minutes en évitant toute vibration ;
- ❖ Mesurer à vue les hauteurs H1 et H2 (cette lecture est entachée d'incertitudes)
- ❖ Mesurer au piston la hauteur H1, pour plus précision.

Les résultats de l'équivalent de sable s'expriment en pourcentage. Ils se calculent à partir de la relation II.5.

$$ES = \frac{H1}{H2} * 100 \quad (II.5)$$

Avec :

- ❖ H1 : Hauteur du dépôt de sable visible ;
- ❖ H2 : Hauteur totale (sable + flocculats) ;
- ❖ ES : Equivalent de sable.

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont interprétés sur base du tableau II.1.

Tableau II-1 Valeurs préconisées pour l'équivalent de Sable [2].

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour le béton de qualité.
65% ≤ ES ≤ 75%	65% ≤ ES ≤ 75%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES ≤ 85%	70% ≤ ES ≤ 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant pour les bétons de haute qualité.
ES > 85%	ES > 80%	Sables très propres. L'absence presque totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

II.3.4 Essai Los Angeles

L'essai Los Angeles 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.

Notons que cet essai a été effectué suivant la norme **NF P 18-573**.

La procédure pour la mise en œuvre de cet essai est la suivante [16] :

- ❖ Choisir les tamis pour évaluer la classe des granulats ;
- ❖ Évaluer la masse de l'échantillon (masse sèche) à utiliser, selon la classe choisie ;
- ❖ Trouver le nombre de boules équivalent à la classe choisie (Tableau II.2) ;
- ❖ Déposer l'échantillon ainsi que les boules dans la machine Los Angeles ;
- ❖ Fermer la machine et calibrer le nombre de tours que celle-ci fera ;
- ❖ Lancer l'opération et attendre que la machine s'arrête ;
- ❖ Une fois l'essai terminé, ouvrir la machine et récupérer les fragments de graviers ;
- ❖ Passer les fragments au tamis de 1,6mm et évaluer la masse de tamisât ;
- ❖ Passer aux calculs et déterminer le coefficient Los Angeles.

Le coefficient de Los Angeles est calculé à l'aide de la relation II.6.

$$CLA = \frac{\text{Masse de tamisât}}{\text{Masse totale de l'échantillon}} \times 100 \quad (II.6)$$

Tableau II-2 Nombre des boulets en fonction de la classe granulaire [17]

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 – 6,3		7	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

Le tableau II.3 donne l'estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient Los Angeles.

Tableau II-3 Estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient LA [18]

Coefficient LA (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
> 50	Très tendre

II.3.5 Coefficient de forme des graviers

Le but poursuivi par cet essai est la détermination de l'indice de forme afin d'apprécier la forme des graviers. Cet essai s'effectue suivant la norme NF EN 933-4. Son mode opératoire consiste à :

- ❖ Prélever un échantillon de 100 gravier (les 100 graviers sont choisis arbitrairement) ;
- ❖ Préparer le pied à coulisse ;
- ❖ Évaluer la plus grande épaisseur ainsi que la plus grande longueur de chacun de 100 graviers et noter les résultats dans un tableau ;

- ❖ Faire la somme des épaisseurs ainsi que celle des longueurs et passer au calcul de l'indice de forme à l'aide de la formule II.7.

$$\text{Indice de forme } (I_g) = \frac{\sum \text{Épaisseurs}}{\sum \text{Longueurs}} \quad (\text{II.7})$$

L'interprétation de l'indice de forme se fait en se basant aux données du tableau II.4.

Tableau II-4 Interprétation de l'indice de forme des graviers [16]

Dmax	≤ 20 mm	>20mm
Concassé ordinaire	0,275 ≤ I _g <0,400	0,350 ≤ I _g <0,425
Ré concassé	0,400 ≤ I _g <0,450	0,425 ≤ I _g <0,485
Ré concassé cubique	0,450 ≤ I _g	0,485 ≤ I _g

II.3.6 Masse volumique absolue

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

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 pour les graviers et NF P 18-555 pour le sable. Le mode opératoire pour cet essai est le suivant :

- ❖ Remplir une éprouvette graduée avec un volume V1 d'eau ;
- ❖ Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air ;
- ❖ Lire le nouveau volume V2.

La masse volumique absolue ρ sera ainsi déterminée à partir de la relation II.8.

$$\rho = \frac{M}{V2 - V1} \quad (\text{II.8})$$

II.3.7 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente c'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant.

L'essai de la masse volumique apparente s'est effectué selon les normes NF P 18-544 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. Il consiste au remplissage d'un récipient vide de volume

(V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule II.9.

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (II.9)$$

Avec ρ_{app} la masse volumique apparente, V le volume du récipient et M la masse sèche du matériau.

II.3.8 Taux d'absorption

L'absorption d'eau (Ab %) des sables est par définition le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Plus les sables sont plus denses, moins ils sont poreux étant donné qu'ils ont des surfaces plus lisses. L'absorption d'eau, importante et variable des sables a toujours été considérée comme une grosse difficulté au chantier dans la quantification d'eau nécessaire pour gâcher un béton étant donné qu'elle joue sur la plasticité des bétons. Le taux d'absorption des graviers est déterminé par un essai normalisé (NF P 18 - 555, Décembre 1990).

L'essai consiste à exprimer le rapport d'augmentation de la masse de l'échantillon de gravier en pourcentage après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Le mode opératoire employé dans la détermination du coefficient d'absorption d'eau conforme à la norme NF P 18- 555 (1990) se présente comme suit :

- ❖ Immersion de l'échantillon pendant 24 heures à 20°C à la pression atmosphérique ;
- ❖ Etalage de l'échantillon sur une surface plane non absorbante ;
- ❖ Élimination de l'eau de surface avec un tissu ;
- ❖ Pesage de la masse M_a ;
- ❖ Séchage de la masse M_a pendant 24 heures à 105°C±5 pour obtenir la masse M_s .

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des graviers s'expriment en pourcentage et se calculent à partir de la relation II.10.

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (II.10)$$

Avec :

M_a en (g) : la masse humide ;

Ms en (g) : la masse sèche.

II.4 FORMULATION DU BETON

Formuler ou étudier la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage. Dans cette section nous présentons la méthode de formulation utilisée dans cette étude qui est notamment la méthode de Dreux-Gorisse.

II.4.1 Méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique de composition de béton qui a pour seul but de permettre de prévoir les dosages de chacun des constituants du béton pour obtenir un béton conforme ou de bonne qualité. Elle approche de façon significative les paramètres influant sur la résistance, l'ouvrabilité et le volume.

En effet, la méthode de Dreux Gorisse a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est aussi très simple d'utilisation par le fait qu'elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Elle permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulats et ciment) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

La méthode de Dreux Gorisse passe par plusieurs étapes successives dans le but d'obtenir la formulation théorique du béton sur base de la nature de l'ouvrage, l'ouvrabilité et la résistance souhaitée. Ces étapes sont les suivantes :

- ❖ Le tracé des courbes granulaires (détermination du diamètre maximal) ;
- ❖ Détermination du rapport E/C (à partir de la formule de Bolomey) ;
- ❖ Traçage de la courbe granulaire de référence du béton ;
- ❖ Détermination des proportions des granulats ;
- ❖ Détermination des facteurs de compacité du béton et de la composition théorique ;
- ❖ Réalisation d'une gâchée expérimentale et ajustement éventuel de la composition théorique.

II.4.1.1 Données de base

La dimension maximale des granulats, la résistance souhaitée et la consistance désirée sont les données de base dans la formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse.

a) Dimension maximale des granulats

La dimension maximale des granulats est importante dans la composition du béton. En effet, un béton tire du granulat une bonne part de la résistance et plus particulièrement du gros granulat. Outre la Résistance, le dosage en ciment est d'autant moins élevé que les grains sont plus gros. L'emploi des granulats de qualité et de dimension D suffisante doit rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre.

b) La résistance souhaitée

La résistance souhaitée est en général définie par la résistance en compression sur éprouvette cylindrique à 28 jours. C'est elle qui conduit directement vers le choix du dosage approximatif en ciment. Les résistances nominales à 28 jours sont majorées de 15% compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique. La résistance en compression désirée est déterminée à l'aide de la relation II.11.

$$f_c = 1,15 * f_{c28} \quad (II.11)$$

f_c : Résistance en compression désirée à 28 jours et f_{c28} Résistance visée en compression à 28 jours.

c) La consistance désirée

Elle est fonction de l'élément à bétonner (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrailé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams.

II.4.1.2 Détermination du dosage en ciment et en eau

La détermination du dosage en eau et en ciment passe par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne en compression désirée et nécessite l'utilisation de la relation II.12 dite de Bolomey.

$$f_c = G * FCE * \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (II.12)$$

Avec :

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

Le coefficient granulaire « G » est fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats.

Le tableau II.5 donne les différentes valeurs du coefficient granulaire.

Tableau II-5 Valeurs du coefficient granulaire G [8]

Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	Fins $D_{max} < 16$ mm	Moyens $20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

A partir de la valeur C/E calculée, la figure II.3 permet en fonction de l'affaissement au cône désiré (ouvrabilité désiré), d'obtenir le dosage en ciment nécessaire. Le rapport C/E étant déterminé en amont, la connaissance de C permet de déterminer E .

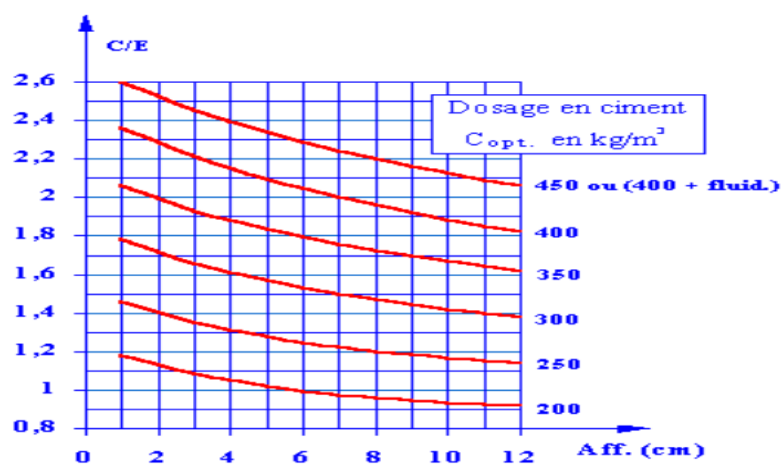


Figure II-3 Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement recherchée.

Il suffit de positionner sur l'abaque (Figure II.3) les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C_{opt} . Au-delà de 400 kg de ciment par m^3 de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant (Fluid.).

Le dosage effectif de ciment C à retenir doit être supérieur ou égal à C_{opt} , et aux valeurs minimales C_{min} données par les formules II.13 à 15 pour les bétons non normalisés (formule II.13 lorsque le béton est en milieu non exposé, formule II.14 pour un milieu exposé sans agressivité particulière et formule II. 15 pour un milieu agressif).

$$C_{min} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{250 + 10FCE}{\sqrt[5]{1,25D_{max}}} \quad (II.13)$$

$$C_{min} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \text{Max} \left[\frac{250 + 10FCE}{\sqrt[5]{1,25D_{max}}} ; \frac{550}{\sqrt[5]{1,25D_{max}}} \right] \quad (II.14)$$

$$C_{min} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \text{Max} \left[\frac{250 + 10FCE}{\sqrt[5]{1,25D_{max}}} ; \frac{770}{\sqrt[5]{1,25D_{max}}} \right] \quad (II.15)$$

Avec D_{max} (Dimension du plus gros granulat) en mm et FCE (Classe de résistance du ciment) en Mpa.

Une fois obtenu, le dosage en eau est éventuellement ajusté en fonction du plus gros granulat D. Le tableau II.6 présente les corrections à apporter en fonction de la dimension du gros granulat. En effet, plus le granulat est plus gros, plus il a une surface spécifique moindre et nécessite moins d'eau par rapport aux granulats de moindre diamètre.

Tableau II-6 Correction sur le dosage en eau en fonction de D_{max} [8]

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

Par ailleurs, dans la détermination de la quantité en eau pratique in situ, il est impérieux de prendre en considération la quantité en eau qu'apportent les granulats s'ils ne sont pas secs.

Le tableau II.7 Renseigne sur la teneur en eau approximative des granulats courants.

Tableau II-7 Teneur en eau des granulats courants en litre pour 1m³ de matériau (en volume apparent) [8]

Degré apparent d'humidité	Eau d'apport en l/m ³			
	Sable 0/5	Gravillon 5/12,5	Gravier 5/20	Gravier 20/40
Apparence :				
Sèche	0 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Humide	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Très humide	40 à 60	40 à 60	30 à 50	20 à 40
Saturée, égouttée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

On voit l'importance que peut prendre l'eau d'apport des granulats et ses énormes variations.

En effet, il ne s'agit pas d'une simple correction plus ou moins négligeable. Si l'on emploie des granulats sortant du laveur ou ayant longtemps séjourné sous la pluie, cet apport peut atteindre une cinquantaine de litres pour 400 litres de sable et presque autant pour 800 litres de gravier soit près de la moitié de l'eau totale. Alors que si l'on emploie le dessus d'un tas de granulats stockés depuis longtemps sous le soleil en saison sèche, l'eau d'apport devient négligeable.

II.4.1.3 Détermination du dosage en granulats

La détermination du dosage en granulats d'un béton passe par le tracé de la courbe de référence, la détermination des proportions en volume des granulats, la détermination du coefficient de compacité du béton afin d'aboutir à la composition théorique du béton. Le tracé des courbes granulaires s'effectue sur un graphique normalisé AFNOR comprenant en abscisse une graduation logarithmique des tamis et en ordonné les tamisât en pourcentage. La courbe de référence se trace sur le graphique des courbes granulaires. Cette courbe de référence est dénommée **OAB**.

- ❖ Le point **O** correspond à l'origine des axes ;
- ❖ Le point **B** correspond en abscisse à la dimension D du plus gros granulats et en ordonné au 100% des tamisât ;
- ❖ Le point **A** quant à lui appelé point de brisure de la courbe et a pour coordonnées :

➤ Abscisse $XA = \frac{D_{max}}{2}$ si $D_{max} \leq 20\text{mm}$;

- Abscisse X_A située au milieu du segment gravier limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D_{max} , si $D_{max} > 20mm$;
- L'ordonnée Y_A s'obtient à partir de la relation II.16 qui prend en compte l'influence de la forme des granulats, le dosage en ciment, la vibration, la finesse du sable et la mise en œuvre du béton.

$$Y_A = 50 - \sqrt{1,25D} + K + K' \quad (II.16)$$

Avec ;

- K le terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la puissance de vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) ;
- K' correction supplémentaire dépendant du module de finesse du sable obtenu par la relation II.17 :

$$K' = 6MF - 15 \quad (II.17)$$

Le coefficient correcteur K est fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats. Ses différentes valeurs sont présentées dans le Tableau II.8.

Tableau II-8 Valeur du coefficient correcteur K [8]

Vibration		Faible		Normal		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (Kg/m ³)	400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

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

La détermination des proportions en volume se fait sur le graphique des courbes granulaires. Les lignes de partages se tracent entre chacun de granulats en joignant le point **95%** de la courbe granulaire du premier au point de **5%** du suivant. Le pourcentage en volume absolu des granulats correspond au point de croisement de la droite de partage et la courbe de référence **OAB**.

II.4.1.4 Coefficient de compacité

Le coefficient de compacité γ du béton représente le rapport du volume des matières solides (granulat + ciment) au volume total du béton vibré. Il se détermine par lecture directe du Tableau II.9 qui est fonction de la consistance du béton, du serrage ainsi que de la dimension du plus gros granulat D.

Tableau II-9 Valeurs du coefficient de compacité [8]

Consistance	Serrage/ vibration	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,845	0,845
	Normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,840	0,850
	Puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,855	0,855

NOTA : Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- ❖ Sable roulé et gravier concassé : $\gamma-0,01$
- ❖ Sable et gravier concassés : $\gamma-0,03$
- ❖ Granulats légers : $\gamma-0,03$
- ❖ En fonction du dosage en ciment : $\gamma + \frac{C-350}{5000}$

La composition théorique s'établit en fonction du dosage en ciment, en granulat et du coefficient de compacité. Le volume absolu des granulats est donné par la relation II.18.

$$V = \gamma - \frac{C}{\rho c} \quad (II.18)$$

Avec : γ le coefficient de compacité ;

C le dosage en ciment ;

ρc la masse volumique du ciment.

Les compositions massiques des graviers et du sable s'obtiennent respectivement par les relations II.19.

$$\begin{cases} VS = \%S \times V \\ VG = \%G \times V \end{cases} \quad (II.19)$$

Avec V_s et V_G , respectivement les volumes absolus du sable et des gravillons ; $\%S$ et $\%G$, les pourcentages du sable et des gravillons obtenus sur les compositions optimales des bétons et V , le volume absolu des granulats.

Connaissant les masses volumiques spécifiques ρ_s et ρ_G , respectivement masse spécifique du sable et du gravier, on déduit les masses m_S et m_G , respectivement masse du sable et du gravier, à partir des relations II.20.

$$\begin{cases} m_S = VS \times \rho_s \\ m_G = VG \times \rho_G \end{cases} \quad (II.20)$$

II.5 CARACTÉRISATION DU BÉTON

Pour ce qui est de la caractérisation du béton, il s'agit ici d'apprécier les différents comportements que présente notre béton. Pour cela, nous avons évalué ses caractéristiques à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

Les principales caractéristiques du béton sont l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité. L'ouvrabilité (consistance) est la principale caractéristique du béton frais. La résistance est la caractéristique principale des propriétés mécaniques des bétons durcis. La durabilité quant à elle caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans ses conditions d'environnement, avec des frais de maintenance et

d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée) [2]. La caractérisation du béton à l'état frais sera effectuée à l'aide de l'essai d'ouvrabilité et celle à l'état durci, à l'aide de l'essai de compression ainsi que de la détermination de la masse volumique de ce dernier.

II.5.1 Caractérisation à l'état frais

II.5.1.1.1 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 et la granulométrie et le dosage en eau.

L'ouvrabilité s'évalue à l'aide d'un « cône d'Abrams ». L'essai s'appelle « essais d'affaissement au cône d'Abrams ». L'essai s'effectue dans un moule tronconique

D'après la norme NFP 18-451 [19], on met le béton frais dans le moule en trois couches en les piquetant à raison de 25 coups par couche. Le mode opératoire de cet essai se présente comme suit :

- ❖ Mouiller l'intérieur du moule et la plaque d'appui à l'aide d'une éponge ;
- ❖ Placer le moule avec la rehausse sur la plaque ;
- ❖ A l'aide d'une truelle remplir le moule de béton frais, en trois couches d'égale hauteur ;
- ❖ Compacter chaque couche par 25 coups à l'aide de la tige de piquage ;
- ❖ Retirer la rehausse, araser le dessus du moule et nettoyer le support autour du moule ;
- ❖ Araser le moule à l'aide d'une règle. - Le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution entre 5 et 10sec ;
- ❖ Retirer le moule verticalement avec précaution ;
- ❖ Mesurer l'affaissement (ou Slump) du cône par rapport au point le plus haut du béton juste après le démoulage ;
- ❖ La durée totale de l'essai du début du remplissage à la mesure de l'affaissement est de 2min 30sec.

Après démoulage et stabilisation, on mesure l'affaissement et l'interprétation des résultats se fait à partir du Tableau II.10.

Tableau II-10 Classe de consistance des bétons [2]

Affaissement en cm	Plasticité	Mise en œuvre	Domaine d'utilisation
0 à 4 ±1cm	Ferme	Puissante	Béton de propreté, fondation non armée, voirie
5 à 9 ±2cm	Plastique	Normale	Semelle coffrée, mur de soutènement, plancher, dalles, poteaux, voile.
10 à 15 ±3cm	Très plastique	Faible	Fondation coulée en fouille, voiles de faible épaisseur.
Supérieure à 15 ±3cm	Fluide	Léger piquage	Pieux, parois moulés

Lorsque l'affaissement est trop élevé et se trouve en dehors de la zone de tolérance, il y a risque de ségrégation (c'est-à-dire que les gros éléments de gravier risquent de descendre pour s'agglomérer vers le bas).

II.5.2 Caractérisation à l'état durci

II.5.2.1 Essai de compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 12390-7 [20]. La presse que nous avons utilisée est électrique à doubles manomètres et grands plateaux. Les résultats ont été obtenus par la relation II.21.

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (II.21)$$

Avec :

- ❖ **R_{cj}** la résistance à la compression à j jours en Mpa ou en N /mm² ;
- ❖ **F** la force qui agit sur l'éprouvette en Newton(N) ;
- ❖ **A** la section de l'éprouvette en mm².

II.6 CONCLUSION PARTIELLE

Dans le présent chapitre, il a été question de présenter les matériaux ainsi que la méthodologie employée pour aboutir aux différents résultats de l'étude. Tout au long de ce dernier, on a eu à donner un aperçu sur la nature et l'origine des constituants utilisés pour confectionner notre béton, il s'en est suivie une présentation des essais effectués au laboratoire pour la caractérisation des matériaux et chute sur la présentation de la méthode de formulation utilisée, qui est celle de **DREUX-GORISSE**, ainsi que la présentation des quelques essais sur la caractérisation du béton.

Le chapitre suivant va beaucoup plus s'articuler sur la présentation des différents résultats obtenus ainsi que l'interprétation de ces derniers.

Chapitre III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

III.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des différents résultats obtenus au cours des essais réalisés au laboratoire. Tout au long de ce chapitre, seront présentés les résultats sur la caractérisation des matériaux, notamment le sable, le ciment et les graviers. Ensuite, seront exposés les résultats de la formulation de nos différents bétons et les résultats des essais sur les bétons confectionnés. Enfin, ce chapitre se conclura par une brève évaluation du coût de revient pour 1m³ de chacun des bétons faits avec les différents graviers de notre étude. Quant à ce dernier, l'objectif est ici de procéder à une évaluation économique pour chacun de nos graviers.

III.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

En ce qui concerne la caractérisation des matériaux, nous avons eu à effectuer l'analyse granulométrique, l'essai d'équivalent de sable, le coefficient de forme, les masses volumiques (absolue et apparente), le taux d'absorption d'eau, ainsi que l'essai Los Angeles.

III.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée conformément à la norme NF P 18-560 [21]. Le but poursuivi était de déterminer la composition granulométrique des granulats ainsi que la courbe granulométrique correspondant à chacun d'eux. Les différentes courbes granulométriques des granulats sont représentées aux figures III.1, III.2 et III.3.

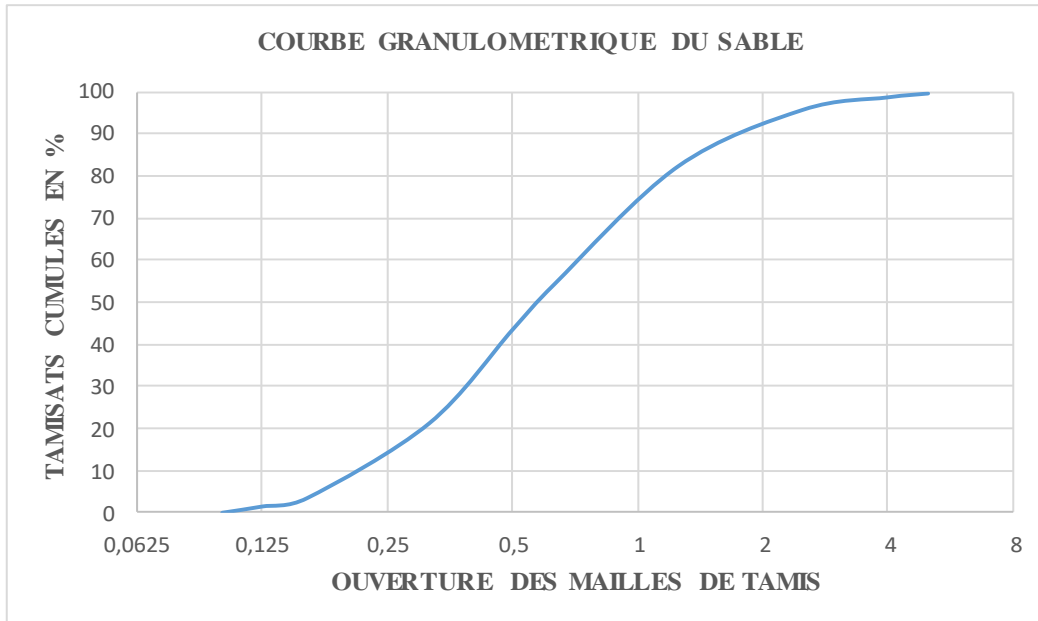


Figure III-1 Courbe granulométrique du sable

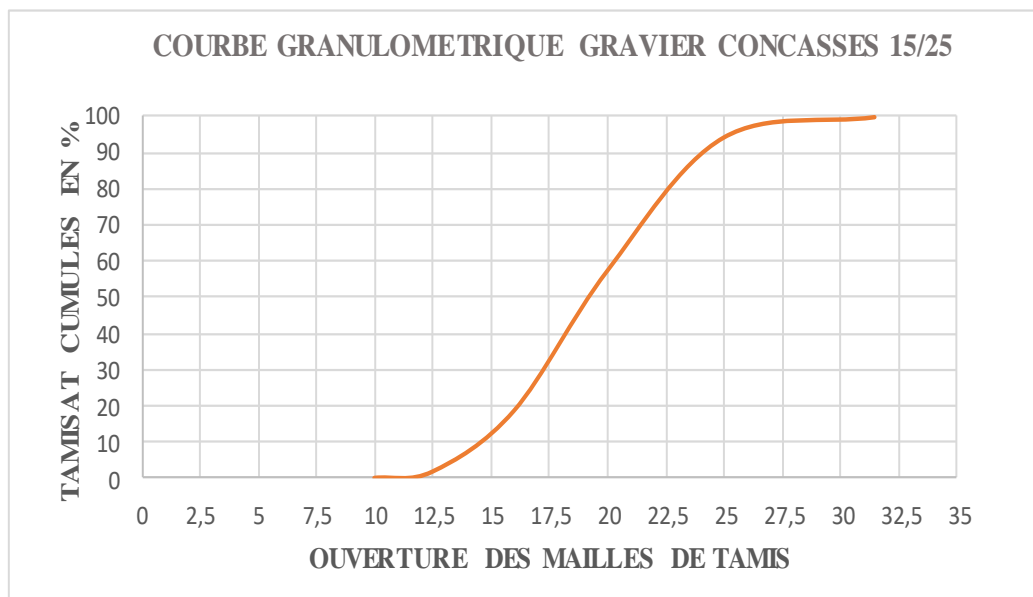


Figure III-2 Courbe granulométrique des graviers concassés

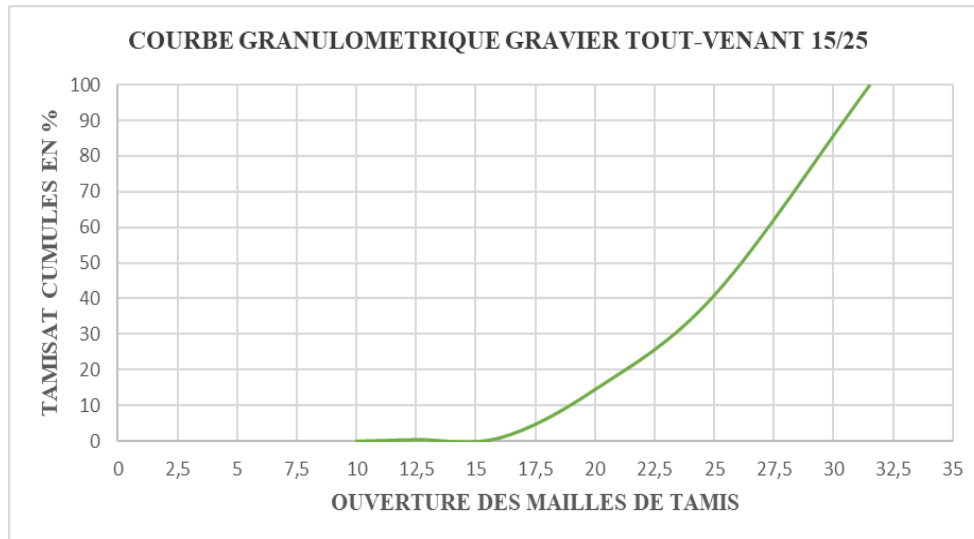


Figure III-3 Courbes granulométrique des graviers tout-venants

III.2.2 Coefficient d'uniformité C_u et de courbure C_z

Le tableau III.1. présente les différentes valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure pour le sable ainsi que pour nos deux graviers.

Tableau III-1 Coefficient d'uniformité et de courbure

Désignation	Coefficient d'uniformité C_u	Coefficient de courbure C_z
Sable	3,49537	0,918377
Graviers concassés	1,42957	1,022719
Graviers tout-venants	1,45201	1,011457

À la lumière du tableau III.1, nous constatons que le coefficient d'uniformité pour les graviers est inférieur à 2 ce qui signifie que la granulométrie est serrée ou uniforme. Pour le sable, nous constatons que le coefficient d'uniformité est supérieur à 2 ce qui signifie que la granulométrie du sable est étalée ou varié.

Pour ce qui est du coefficient de courbure, nous constatons que la valeur de C_z pour les graviers est comprise entre 1 et 3 d'où nous disons que la granulométrie est bien graduée. Pour le sable, la valeur de C_z est inférieure à 1 d'où la granulométrie du sable est mal graduée.

III.2.3 Module de finesse

Le sable du Rwanda utilisé a un module de finesse égale à **2,4312**. On constate que cette valeur est comprise entre 2,2 et 2,8, ce qui indique que ce sable convient pour la formulation du béton.

III.2.4 Equivalent de sable

L'équivalent de sable a été déterminé à partir de la norme NF EN 933-8 et a pour valeur **91,222%**. Il advient que ce sable est propre et convient à la formulation du béton.

III.2.5 Masse volumique

Le tableau III.2 présente les différentes masses volumiques absolues et apparentes, notamment pour le ciment, sable et pour nos deux graviers.

Tableau III-2 Masse volumique absolue et apparentes du ciment, sable et des graviers

Désignation	Ciment	Sable	Graviers concassés	Graviers tout-venants
Masse volumique absolue en g/cm ³	2,969	2,5211	2,6932	2,4633
Masse volumique apparente en g/cm ³	-	1,3216	1,1926	1,0778

Comme nous pouvons bien le remarquer au niveau du tableau III.2, la masse volumique du ciment utilisé qui est de 2,969g/cm³ avoisine la masse volumique de référence de 3,1g/cm³ [22] Pour ce qui est des granulats, nous constatons que leurs masses volumiques sont comprises dans l'intervalle de 2 à 3 ce qui les places parmi les granulats courants.

III.2.6 Essai Los Angeles

La figure III.4 présente sous forme d'histogramme les différentes valeurs des coefficients Los Angeles de nos graviers d'étude.

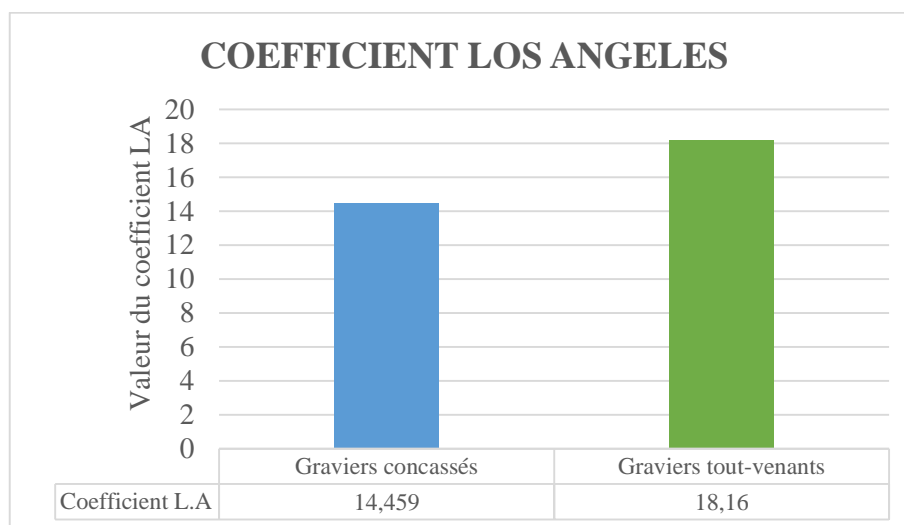


Figure III-4 Coefficient Los Angeles

L'histogramme de la figure III.4 montre que le coefficient de Los Angeles pour nos deux échantillons de gravier se trouve dans l'intervalle de 15 à 25. Ces valeurs sont inférieures à 45 qui est la valeur requise pour les granulats pour béton. La valeur pour les graviers tout-venants étant supérieure à celle des graviers concassés, cela implique que la résistance à la fragmentation des tout-venants est inférieure à celle des graviers concassés.

III.2.7 Coefficient de forme

Les différentes valeurs de l'indice de forme obtenu pour les graviers sont présentées au niveau du tableau III.3.

Tableau III-3 Indice de forme des graviers

Désignation	Indice de forme
Graviers concassés	0,492
Graviers tout-venants	0,533

La lecture du tableau III.3 montre que nos deux graviers ont un indice de forme supérieur à 0,485 pour $D_{max} > 20\text{mm}$ ce qui nous pousse à dire que nous sommes en présence des graviers ré concassés cubiques.

III.2.8 Taux d'absorption d'eau

Les différentes valeurs du taux d'absorption d'eau des graviers sont reprises dans le tableau III.4.

Tableau III-4 Teneur en eau et porosité des granulats

Désignation	Taux d'absorption d'eau en %
Graviers concassés	2,3
Graviers tout-venants	2,52

La lecture du tableau III.4 montre que les graviers tout-venants ont un taux d'absorption supérieur à celui des graviers concassés, soit une différence de 9,57% du taux d'absorption des concassés. Cette différence nous renseigne déjà que les graviers tout-venants renferment plus des vides que les graviers concassés.

III.3 RÉSULTATS DE LA FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Dans cette partie, seront présentés les résultats de la formulation des bétons. Nous avons utilisé la méthode de Dreux-Gorisse qui a permis d'obtenir le dosage en divers éléments pour un mètre

cube de béton. Il sied de signaler ici que la formulation a été effectuée à trois niveau : une formulation à 20Mpa, une deuxième à 25Mpa et en fin une dernière à 30Mpa.

III.3.1 Données de base

Le tableau III.5 présente les données qui ont conduit les différentes formulations effectuées.

Tableau III-5 Données de base pour la formulation

FORMULATION A 20Mpa	
Désignation	Valeurs
Classe vrai du ciment	30Mpa
Affaissement désiré	6cm
Résistance visée à 28jours	20Mpa
Dimension du plus gros granulat	25 mm
FORMULATION A 25Mpa	
Classe vrai du ciment	30Mpa
Affaissement désiré	6cm
Résistance visée à 28jours	25Mpa
Dimension du plus gros granulat	25 mm
FORMULATION A 30Mpa	
Classe vrai du ciment	30Mpa
Affaissement désiré	5cm
Résistance visée à 28jours	30Mpa
Dimension du plus gros granulat	25 mm

III.3.2 Calcul des dosages

Dans cette partie, il sera question de présenté les résultats des dosages en éléments constitutifs du béton notamment le dosage en ciment, le dosage en eau, et enfin le dosage en granulats.

III.3.2.1 Dosage en eau et en ciment

Le dosage en eau et en ciment, pour un mètre cube de béton, a été obtenu à l'aide de la formule II.12 dite de Bolomey et des courbes de la figure II.1. L'histogramme de la figure III. 5 présente les différentes valeurs trouvées pour chaque type de graviers et selon le niveau de la formulation.

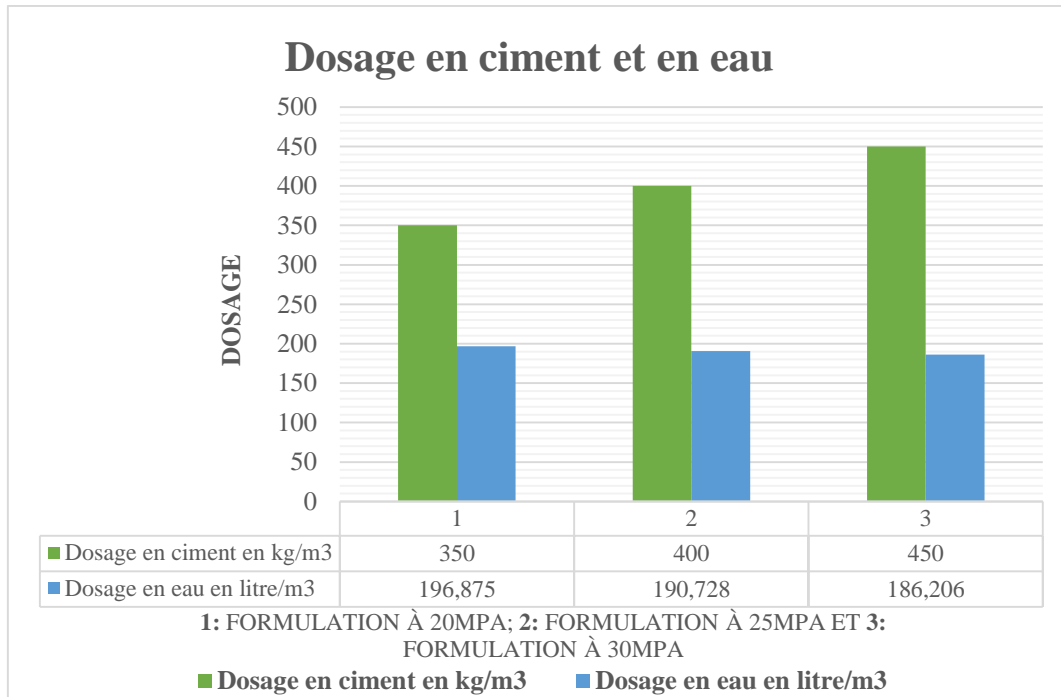


Figure III-5 Dosage en eau et en ciment

III.3.2.2 Dosage en granulats

Le dosage en granulats (sable et gravier) a été déterminé à l'aide de la courbe de référence OAB qui nous a permis de déterminer les proportions du sable et du gravier. Le tableau III.6 présente les différentes coordonnées de la courbe de référence.

Tableau III-6 Coordonnées des courbes de référence OAB

Formulation à 20Mpa : Béton avec graviers concassés et avec graviers tout-venants			
Désignation	O	A	B
X (mm)	0	11,25	25
Y (%)	0	45,99	100
Formulation à 25Mpa : Béton avec graviers concassés et avec graviers tout-venants			
Désignation	O	A	B
X (mm)	0	11,25	25
Y (%)	0	43,99	100
Formulation à 30Mpa : Béton avec graviers concassés et avec graviers tout-venants			
Désignation	O	A	B
X (mm)	0	11,25	25
Y (%)	0	41,99	100

Ayant déjà les coordonnées de la courbe de référence, nous pouvons facilement déduire les compositions pondérales des granulats ainsi que le dosage massique des constituants du béton. Le tableau III.7 présente les différents dosages massiques des constituants.

Tableau III-7 Dosage massique des constituants du béton

Formulation à 20Mpa		
Béton avec graviers concassés		
Désignation	% de granulats	Dosage en Kg/m³
Sable	41	722,648
Gravier	59	1110,895
Béton avec graviers tout-venants		
Sable	42,25	744,68
Gravier	57,75	994,544
Formulation à 25Mpa		
Béton avec graviers concassés		
Sable	39,5	689,398
Gravier	60,5	1127,991
Béton avec graviers tout-venants		
Sable	41	715,577
Gravier	59	1006,129
Formulation à 30Mpa		
Béton avec graviers concassés		
Sable	38	656,664
Gravier	62	1144,536
Béton avec graviers tout-venants		
Sable	39	673,945
Gravier	61	1029,95

III.4 CARACTERISTIQUES DU BETON

III.4.1 Caractéristiques à l'état frais

Pour ce qui est des caractéristiques à l'état frais, nous allons présenter les résultats de l'affaissement au cône d'Abrams ainsi la masse volumique à l'état frais du béton.

III.4.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

L'affaissement au cône d'Abrams a permis d'évaluer l'ouvrabilité des bétons confectionnés. L'histogramme de la figure III.6 présente les différentes valeurs d'affaissement trouvés pour nos différents bétons.

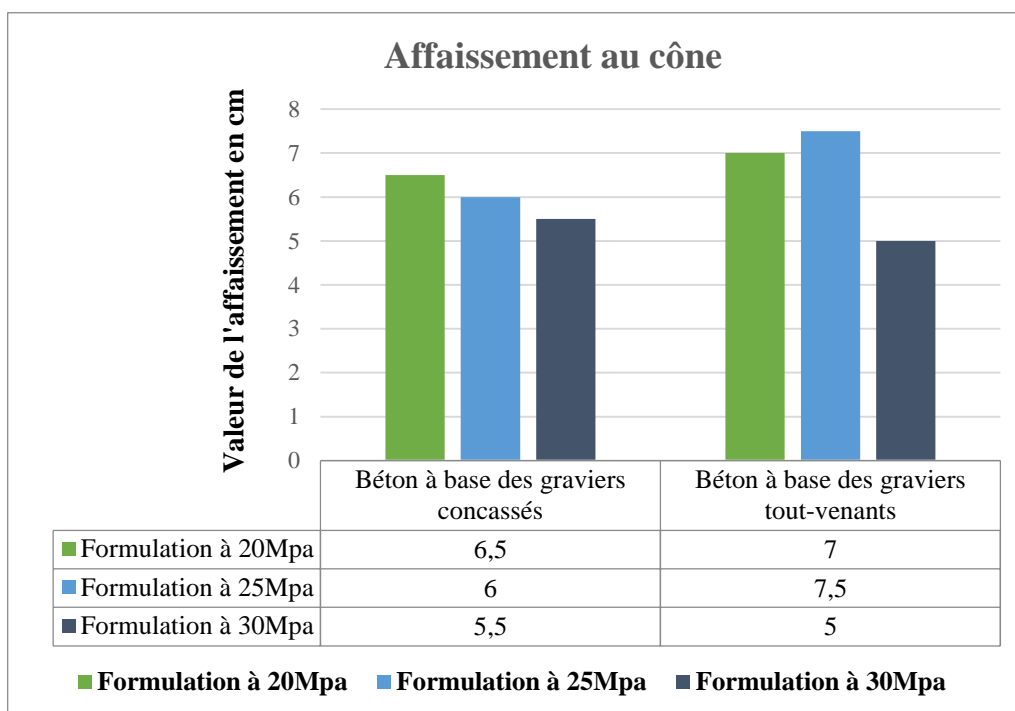


Figure III-6 Valeur de l'affaissement cône d'Abrams

La lecture de l'histogramme de la figure III.6 renseigne que l'ensemble des bétons confectionner ont un affaissement compris dans l'intervalle de 5 à 9 cm. Ces valeurs nous poussent à dire que nous sommes en présence des bétons plastiques pouvant servir pour les semelles coffrées, mur de soutènement, plancher, dalles, poteaux et voiles.

Il est important de souligner ici que ces valeurs d'affaissement ont été obtenues en ajoutant respectivement 30% de la quantité d'eau calculée pour la formulation à 20Mpa, 35% pour celle à 25Mpa et enfin 40% pour la formulation à 30Mpa.

III.4.1.2 Masse volumique du béton

L'histogramme de la figure III.7 présente les différentes masses volumiques de nos bétons à l'état frais.

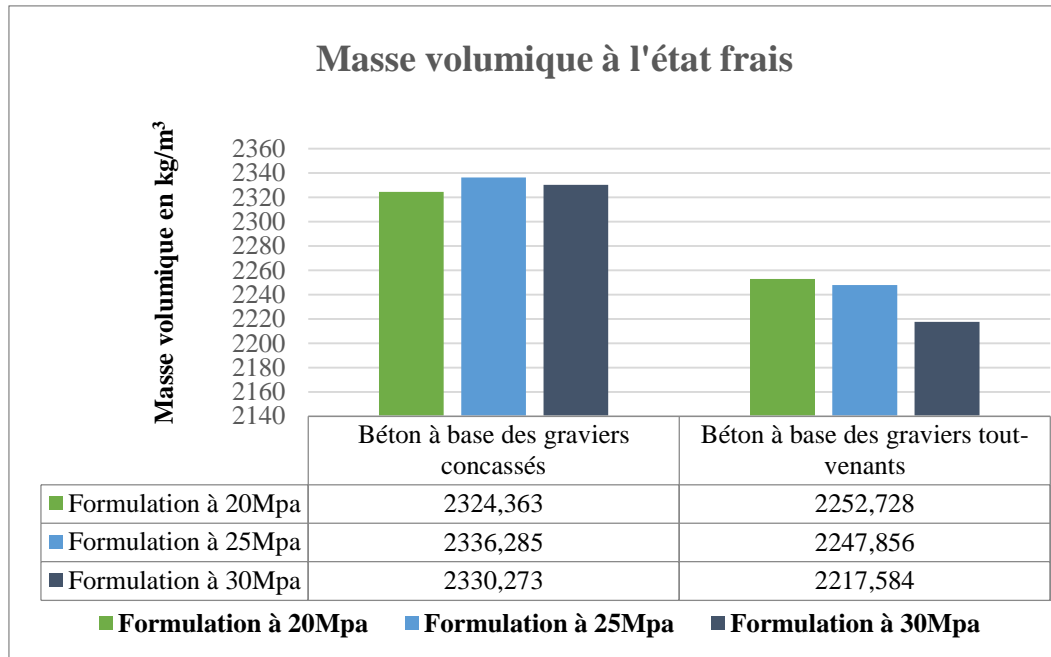


Figure III-7 Masse volumique des bétons à l'état frais

La figure III.7 renseigne que tous les bétons confectionnés ont une masse volumique comprise entre 2000 et 2600kg/m³. Tenant compte des valeurs obtenues, nous pouvons dire que nos bétons sont classés parmi les bétons courants ou à masse volumique normale.

III.4.2 Caractéristiques à l'état durci

Au niveau de cette section, nous présentons les résultats sur l'essai de la détermination de la masse volumique du béton à l'état durci ainsi que les différentes résistances en compression obtenues sur les éprouvettes 16*32cm après immersion pendant 28jours.

III.4.2.1 Masse volumique du béton

L'histogramme de la figure III.8 présente les différentes masses volumiques de nos bétons d'étude à l'état durci.

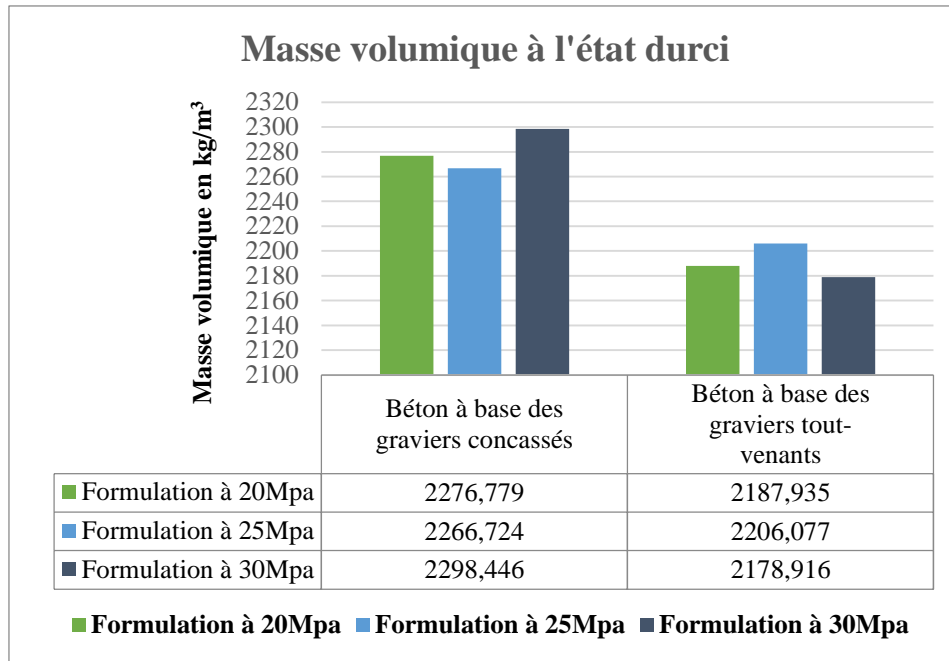


Figure III-8 Masse volumique des bétons à l'état durci

La figure III.8 renseigne que tous les bétons confectionnés ont une masse volumique comprise entre 2000 et 2600kg/m³. Tenant compte des valeurs obtenues, nous pouvons dire que nos bétons sont classés parmi les bétons courants ou à masse volumique normale.

III.4.2.2 Résistance en compression

La figure III.9 présente les différentes valeurs de la résistance mécanique à la compression pour les différents bétons confectionnés.

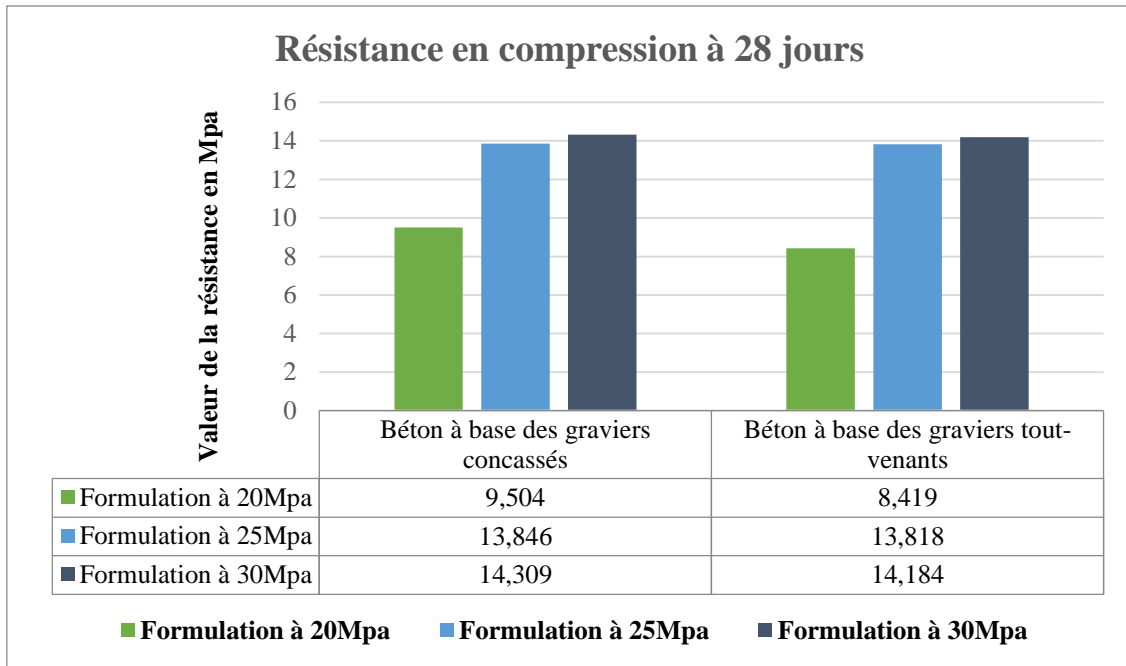


Figure III-9 Résistance à la compression à 28jours

La lecture de la figure III.9 révèle que le béton à base de graviers tout-venant présente une résistance inférieure à celle du béton à base de graviers concassés, avec une différence de 1,085Mpa soit 12,9%, pour un dosage de ciment de 350kg/m³ (formulation à 20Mpa). De plus, on remarque que lorsque le dosage en ciment augmente (formulation à 25 et à 30Mpa), soit un dosage de 400 et 450 kg/m³, l'écart entre la résistance en compression des bétons à base des graviers concassés et celle des bétons à base de graviers tout-venants diminue soit 0,2% d'écart pour le dosage de 400kg/m³ et 0,88% pour le dosage à 450 kg/m³. Cependant, la résistance de ce dernier reste inférieure à celle des bétons à base des graviers concassés. Les différentes résistances obtenues montrent que l'ensemble de nos bétons appartiennent dans l'intervalle des classes C8/10 et C16/20, selon la norme NF EN 206-1, de bétons ordinaires. Ces résistances renseignent que ces bétons peuvent être utilisés dans la stabilisation des fondations, cas des bétons C8/10, le revêtement des sols (pavage) dans un environnement non agressif et pour la réalisation des éléments structurels ou non, moins sollicités et donc pouvant être faiblement armés.

III.5 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

Dans cette section, nous présentons une évaluation du coût de production d'un mètre cube de béton fait à base de chacun des graviers de notre étude. Cette évaluation prend en compte la composition volumétrique ou massique de chacun des constituants, en se basant sur les

quantités obtenues lors de la formulation. Le coût de transport des différents matériaux n'est pas pris en compte dans cette évaluation. La figure III.10 présente les prix respectifs pour chaque mètre cube de béton.

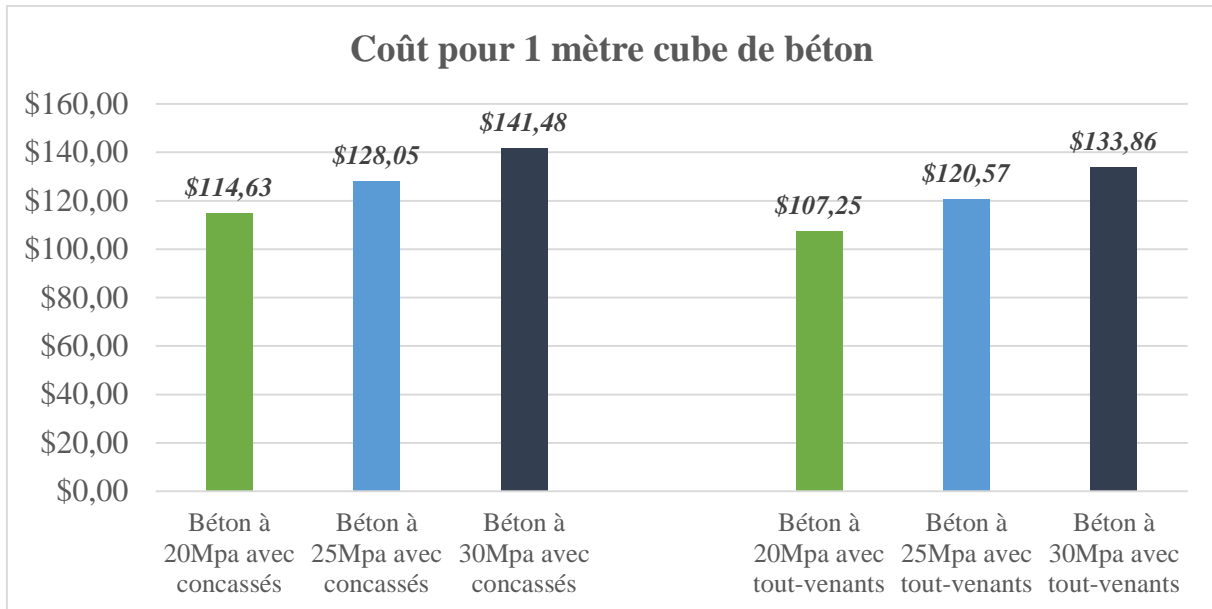


Figure III-10 Evaluation économique

La lecture de la figure III.10 montre que le prix de revient pour 1m^3 de béton fait à base des graviers concassés est plus élevé que celui du béton confectionné avec les graviers tout-venants, avec une différence de $7,38\$/\text{m}^3$ à 20Mpa, $7,48\$/\text{m}^3$ à 25Mpa et $7,62\$/\text{m}^3$ à 30Mpa. Ces écarts correspondent à une augmentation respective du prix d'environ 6,88%, 6,2% et 5,69% suivant les différentes échelles de formulations.

III.6 CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a porté sur la présentation et l'interprétation des résultats obtenus lors des expérimentations au laboratoire. Tout au long de ce dernier, il a été question de présenter les résultats sur la caractérisation des matériaux utilisés, les résultats de la formulation du béton ainsi que les propriétés des bétons d'étude à l'état frais et à l'état durci. Ce chapitre se conclut par une brève évaluation du prix de revient pour 1 mètre cube de chacun de nos bétons d'étude.

CONCLUSION GENERALE

Le béton est un matériau composite dont les propriétés dépendent de la nature, de la qualité et des proportions de ses composants. Le présent travail a porté sur une étude mécanique et économique d'un béton fait à base des graviers concassés et celui fait à base des graviers tout-venants. Tout au long de cette étude, il a été d'abord question de réaliser des essais de caractérisation des constituants de base du béton, notamment le ciment, le sable et les graviers.

Après la caractérisation des constituants du béton, la formulation du béton a été effectuée selon la méthode de Dreux-Gorisse. Il sied de rappeler ici que la formulation a été à trois niveaux : une formulation à 20Mpa, une deuxième à 25Mpa et une dernière à 30Mpa.

La troisième phase de cette étude a consisté à caractériser les bétons d'étude. Cette caractérisation est passée par la détermination des propriétés des bétons d'étude à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

Cette étude s'est conclue par une évaluation du coût de production d'un mètre cube de chacun des bétons d'étude.

L'analyse des résultats des essais de compression, révèle que tous les bétons formulés ont atteint des résistances inférieures aux résistances ciblées. Cela pourrait être dû à un surdosage en eau lors de la confection, à une durée de malaxage prolongée en raison de l'utilisation de malaxeurs manuels, à la vibration manuelle, et à la classe de ciment réelle qui n'a pas atteint 42,5 MPa. L'absence d'une classe granulaire, en particulier la classe 5/15 dans le squelette granulaire, aurait également une incidence sur la compacité du béton et donc sur sa résistance.

Cette étude s'est uniquement basé sur les graviers tout-venants produit par l'éruption volcanique de 2021 à Goma, le sable roulé provenant du Rwanda et le ciment PRIME CEMENT. Nous encourageons les futurs chercheurs à élargir cette étude à d'autres types de matériaux utilisés sur terrain à Goma, notamment les graviers issus des éruptions antérieures, les différents types de ciments présents sur le marché ainsi que le sable issue d'autres sources et ainsi évaluer l'impact environnemental qu'aurait l'utilisation de chacun de ces graviers.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Dr. SAIDI, «Matériaux de construction 2,» p. 11, 2021-2022.
- [2] Msc. A. ALINABIWE, «Physique et Technologie du Béton,» *Support du cours de L2 GC 2021*, pp. 2-10, 2021.
- [3] M. W. M. Abdias, «Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma,» *Travail de mémoire*, 2016 - 2017.
- [4] A. C. AKEZA, «Etude de l'optimisation des propriétés des bétons issus des granulats recyclés,» 2020.
- [5] REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS, «Spécial béton» , Juillet 2023.
- [6] P. Lucien, «Le béton,» *centre de recherche sur la culture technique*, 1907.
- [7] B. KHADIDJA et B. AICHA, «Variation du dosage d'un superplastifiant sur la résistance en compression du béton,» 2020.
- [8] F. Jean et D. Georges, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Huitième édition éd., EYROLLES, 1998.
- [9] A. Pierre-Claude, G. Frédéric, J. Guy et M. Yolette, *Technologie des granulats*, 4ème édition éd., MODULO, 2018.
- [10] F. GHOMARI, «Cours de Matériaux de Construction,» Faculté de Technologie, Université ABOUBEKR BELKAID.
- [11] F. Guillaume, chez *La technologie du béton*.
- [12] CIMBETON, «Bétons et Ouvrages D'art Tome 1,» chez *Les ponts courants en béton*.
- [13] S-Laldji, «cours Béton ETS,» Hiver 2015.

- [14] A. BOUTIBA, «Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci,» Boumerdes, Algérie.
- [15] G. Ginger et I. ECLAIREE, «Classification des pathologies du béton,» 16 Novembre 2017.
- [16] G. N. 1. L2GC, «Rapport laboratoire des matériaux,» Goma, 2022.
- [17] G. F. M et A. Mme BENDI-OUIS, «Science des matériaux de construction,» Université ABOUBEKR BELKAID, 2007-2008.
- [18] M. F. KAKASHI, «Etude comparative des méthodes de formulation du béton: cas des méthodes de Dreux, de Scramtaiev et de Baron Olivier,» ULPGL/ Goma, 2022.
- [19] NFP18-451, «Béton - Détermination de l'ouvrabilité - Essai au cone d'Abrams,» AFNOR, France, 1995.
- [20] NFEN12390-7, «Essais de compression des éprouvettes en béton durci -partie 7: Essai à la compression axiale des éprouvettes cylindriques,» AFNOR, France, 2019.
- [21] NFP18-560, «Granulats - Aalyse granulométrique,» AFNOR, France, 2017.
- [22] B. P. Cirhuza, A. Muhindo wa Muhindo, B. J. Akonkwa, G. Bashige, K. Koko, K. Gabriel, B. Prince et N. François, «Etude du comportement de la résistance en compression du béton suite à la variation unimodale quantitative de ses composants primaires,» International Journal of Innovation and Applied Studies, 2023.

ANNEXES

ANNEXE 1 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

ANALYSE GRANULOMETRIQUE				
1. SABLE				
Prise d'essai: 2000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
5	6,3	6,3	0,315	99,685
4	18,5	24,8	1,24	98,76
2,5	59,1	83,9	4,195	95,805
1,25	269,4	353,3	17,665	82,335
0,63	560,3	913,6	45,68	54,32
0,5	215,5	1129,1	56,455	43,545
0,315	445,6	1574,7	78,735	21,265
0,16	355,9	1930,6	96,53	3,47
0,125	39,4	1970	98,5	1,5
0,1	30	2000	100	0
MF=(1/100)*SOMME Refus cum % au tamis de (5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,16)				
Module de finesse			2,4312	
2.GRAVIER CONCASSE 15/25				
Prise d'essai: 5000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
31,5	0	0	0	100
25	286	286	5,72	94,28
20	1850	2136	42,72	57,28
16	1934	4070	81,4	18,6
12,5	842	4912	98,24	1,76
10	88	5000	100	0
3.GRAVIER TOUT VENANT 15/25				
Prise d'essai: 5000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
31,5	0	0	0	100
25	2944	2944	58,88	41,12
20	1326	4270	85,4	14,6
16	682	4952	99,04	0,96
12,5	26	4978	99,56	0,44
10	22	5000	100	0

ANNEXE 2 : MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES GRANULATS

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE		
1. SABLE		
RECIPIENT 1	Masse du récipient 1(g)	297,1
	Masse (g)	33,7
	Volume (cm3)	203,130368
RECIPIENT 2	Masse du récipient 2(g)	302,6
	Masse (g)	32
	Volume (cm3)	204,0372
RECIPIENT 3	Masse du récipient 3(g)	305,1
	Masse (g)	33,6
	Volume (cm3)	202,322609
Masse volumique moyenne en g/cm3		1,322
2. GRAVIERS CONCASSES 15/25		
RECIPIENT 1	Masse du récipient 1(g)	274,9
	Masse (g)	33,7
	Volume (cm3)	203,130368
RECIPIENT 2	Masse du récipient 2(g)	283,9
	Masse (g)	32
	Volume (cm3)	204,0372
RECIPIENT 3	Masse du récipient 3(g)	267,5
	Masse (g)	33,6
	Volume (cm3)	202,322609
Masse volumique moyenne en g/cm3		1,193
3. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25		
RECIPIENT 1	Masse du récipient 1(g)	253,4
	Masse (g)	33,7
	Volume (cm3)	203,130368
RECIPIENT 2	Masse du récipient 2(g)	245,8
	Masse (g)	32
	Volume (cm3)	204,0372
RECIPIENT 3	Masse du récipient 3(g)	257
	Masse (g)	33,6
	Volume (cm3)	202,322609
Masse volumique moyenne en g/cm3		1,078

ANNEXE 3 : MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES GRANULATS

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE		
1. SABLE		
ESSAI 1	Masse sèche(g)	300
	V1(ml)	350
	V2(ml)	470
ESSAI 2	Masse sèche(g)	300
	V1(ml)	200
	V2(ml)	318
ESSAI 3	Masse sèche(g)	300
	V1(ml)	240
	V2(ml)	359
Masse Volumique absolue en g/cm3		2,521
2. GRAVIERS CONCASSES		
ESSAI 1	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	600
	V2(ml)	788
ESSAI 2	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	500
	V2(ml)	684
ESSAI 3	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	450
	V2(ml)	635
Masse Volumique absolue en g/cm3		2,693
3. GRAVIERS TOUT VENANTS		
ESSAI 1	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	800
	V2(ml)	1000
ESSAI 2	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	430
	V2(ml)	634
ESSAI 3	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	500
	V2(ml)	705
Masse Volumique absolue en g/cm3		2,463

**ANNEXE4 : COEFFICIENT D'UNIFORMITE ET DE COURBURE DES
GRANULATS**

COEFFICIENT D'UNIFORMITE			
1. GRAVIERS CONCASSES 15/25			
D60	20,3	CU	1,4295775
D10	14,2		
2. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25			
D60	27,08	CU	1,4520107
D10	18,65		
3. SABLE			
D60	0,755	CU	3,4953704
D10	0,216		
COEFFICIENT DE COURBURE			
1. GRAVIERS CONCASSES 15/25			
D60	20,3	CZ	1,0227187
D30	17,17		
D10	14,2		
2. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25			
D60	27,8	CZ	1,0114568
D30	22,9		
D10	18,65		
3. SABLE			
D60	0,755	CZ	0,9183775
D30	0,387		
D10	0,216		

ANNEXE 5 : ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE

EQUIVALENT DE SABLE			
Prise d'essai: 120g			
Eprouvette numéro 01			
LECTURE A LA REGLE (cm)	H1	11,8	ES
	H2	11,1	
LECTURE AU PISTON (cm)	H1	11,8	ES
	H2	10,55	
Eprouvette numéro 02			
LECTURE A LA REGLE (cm)	H1	11,3	ES
	H2	10,4	
LECTURE AU PISTON (cm)	H1	11,3	ES
	H2	10,1	
Moyene lecture à la règle		93,051597	
Moyene lecture au piston		89,393655	
Moyenne des moyennes		91,222626	

ANNEXE 6 : MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU CIMENT

Masse volumique du Ciment	
Masse pycnomètre sans échantillon de ciment (en g) M1	167,94
Volume initiale du pétrole V1 (en ml)	0
Masse pycnomètre avec échantillon de ciment (en g) M2	223,47
Volume final du pétrole V2 (en ml)	18,7
Masse volumique du ciment (en g/cm3)	2,9695187

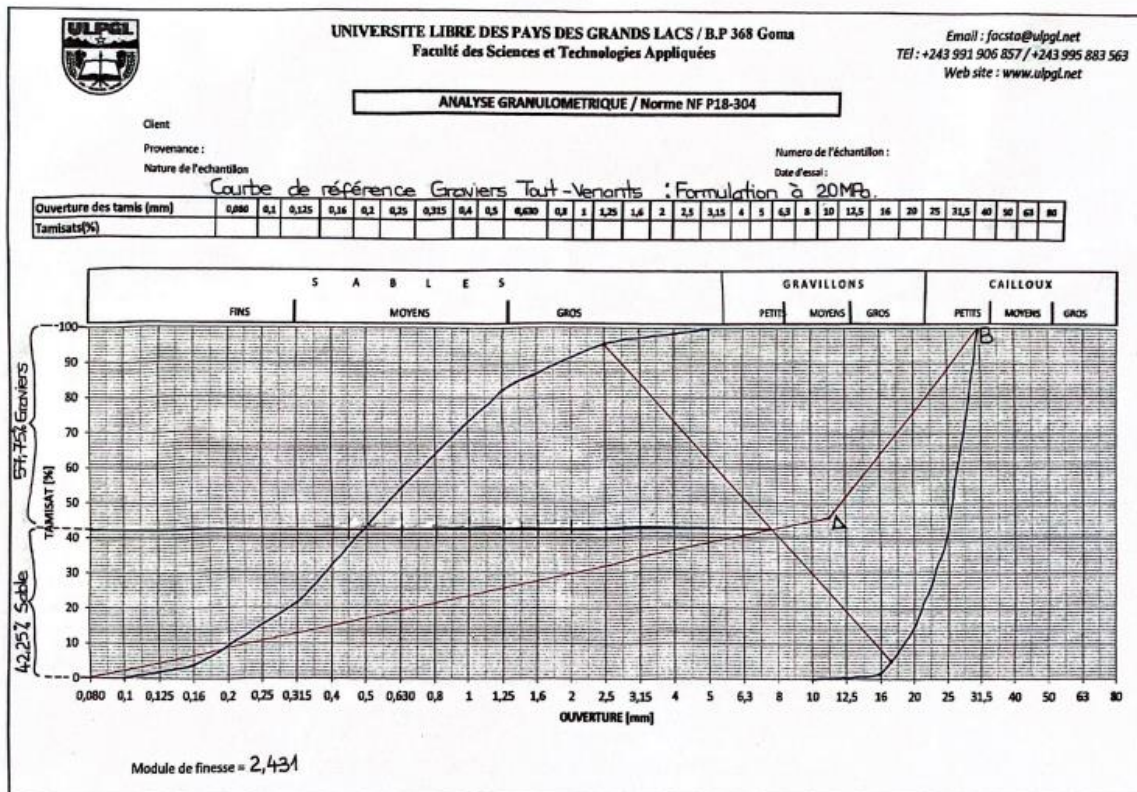
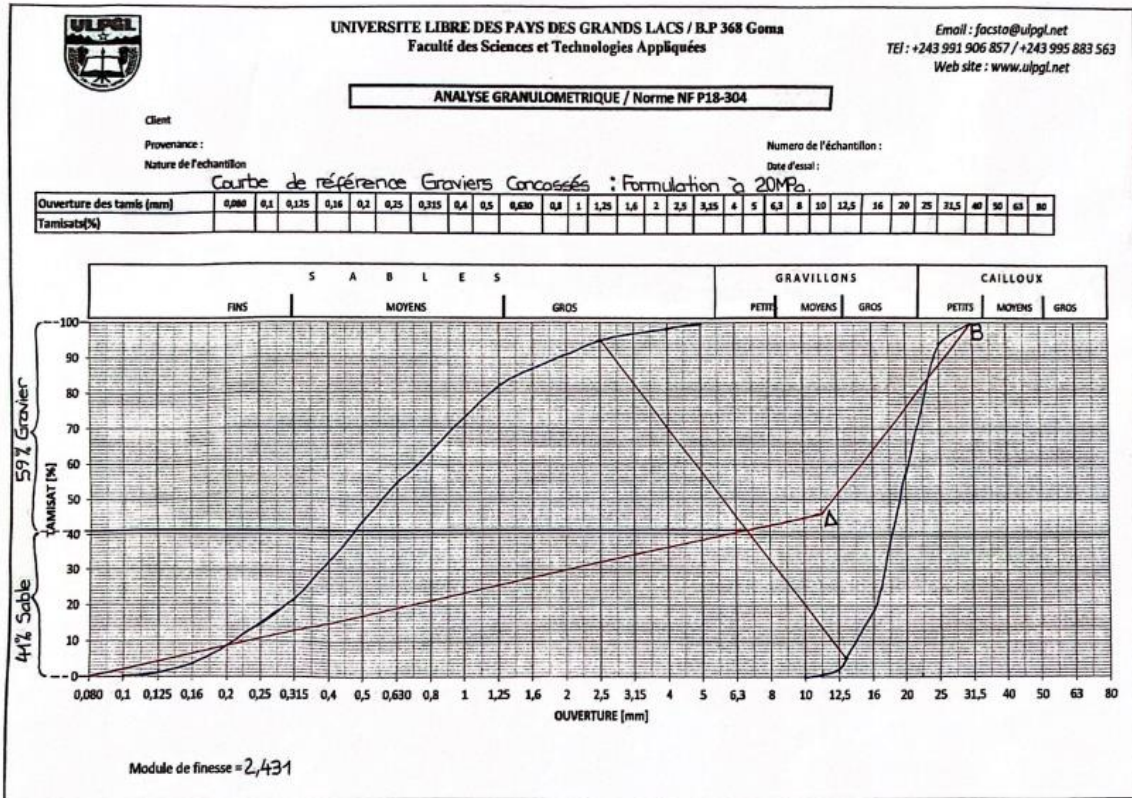
ANNEXE 7 : ESSAI LOS ANGELES POUR LES GRAVIERS

ESSAI LOS ANGELES	
1. GRAVIERS CONCASSES 15/25	
Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	12
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	722,95
Coefficient LA trouvé	14,459
1. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25	
Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	12
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	908
Coefficient LA trouvé	18,16

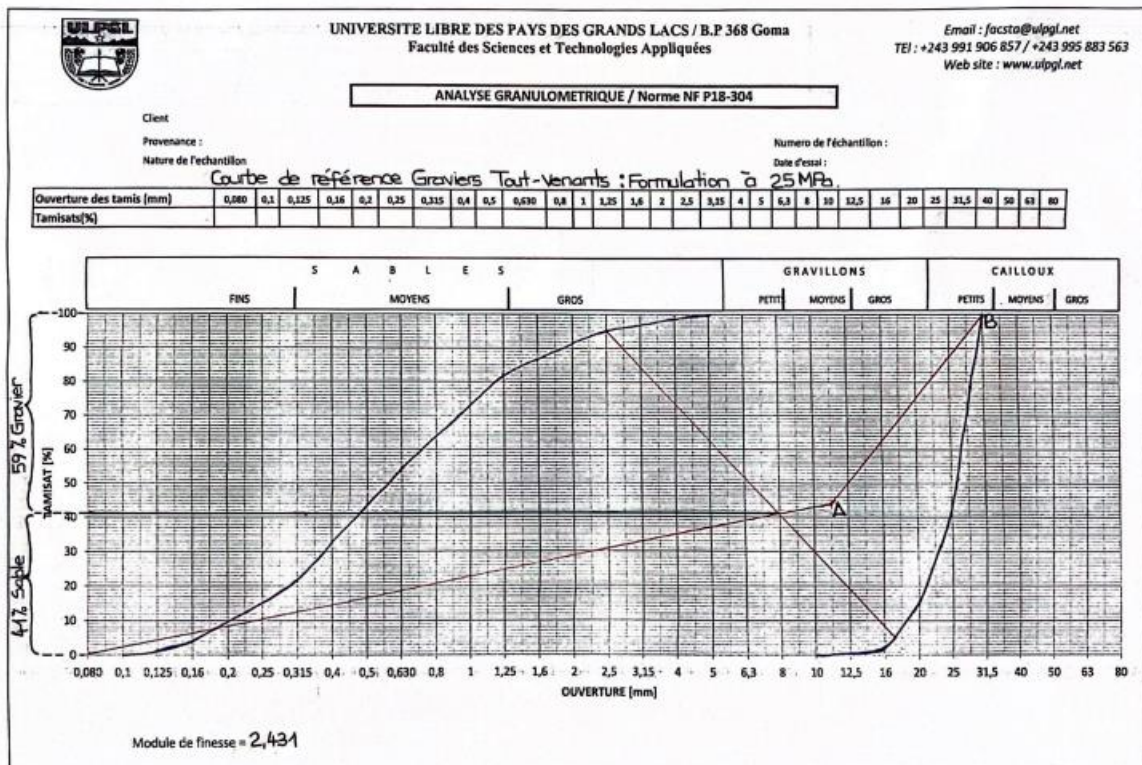
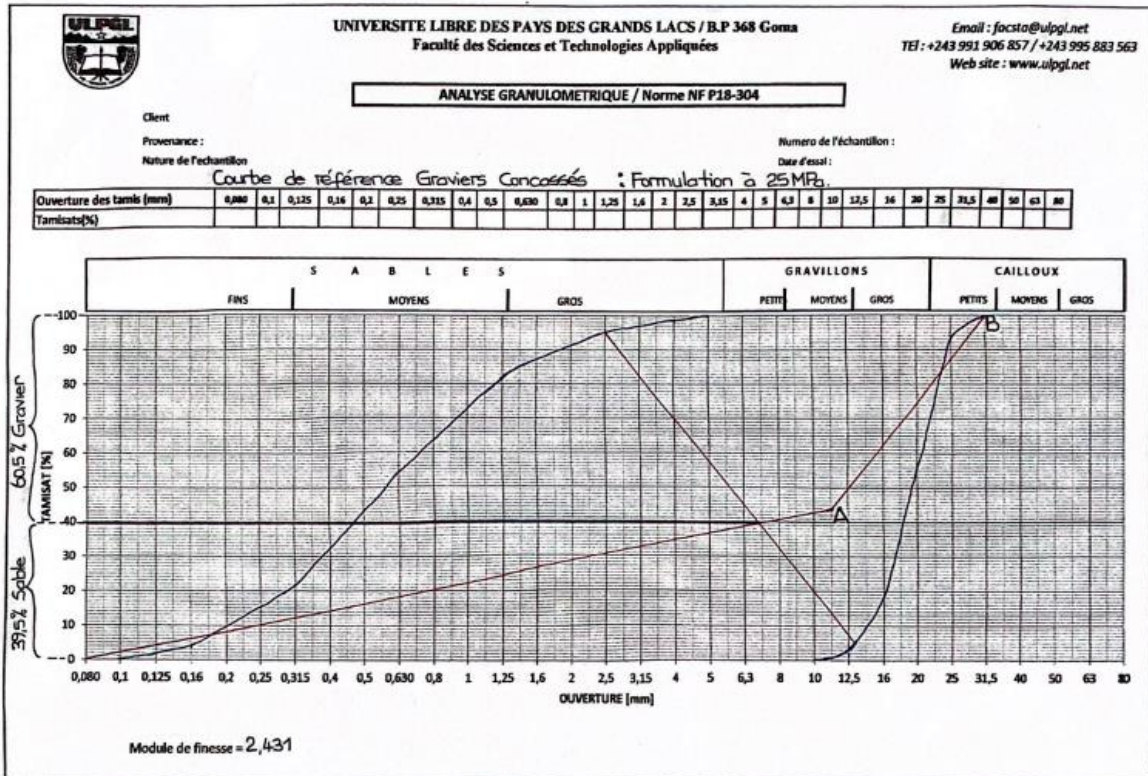
ANNEXE 8 : RESULTATS DE L'ESSAI DE COMPRESSION

FORMULATION A 20Mpa				
Béton à base des graviers concassés				
Désignation	Masse (Kg)	Force appliquée (KN)	Résistance à 28jours (Mpa)	Résistance Moyenne (Mpa)
Eprouvette 1	14,092	188,063	9,354	9,505
Eprouvette 2	14,108	189,789	9,439	
Eprouvette 3	14,01	195,446	9,721	
Béton à base des graviers tout-venants				
Eprouvette 1	14,706	144,966	7,21	8,420
Eprouvette 2	14,604	177,756	8,841	
Eprouvette 3	14,614	185,139	9,208	
FORMULATION A 25Mpa				
Béton à base des graviers concassés				
Eprouvette 1	14,786	275,036	13,679	13,846
Eprouvette 2	14,534	282,912	14,071	
Eprouvette 3	14,41	277,232	13,788	
Béton à base des graviers tout-venants				
Eprouvette 1	14,172	257,375	12,801	13,819
Eprouvette 2	14,222	306,635	15,251	
Eprouvette 3	14,166	269,499	13,404	
FORMULATION A 30Mpa				
Béton à base des graviers concassés				
Eprouvette 1	14,812	282,721	14,061	14,310
Eprouvette 2	14,784	283,914	14,121	
Eprouvette 3	14,746	296,516	14,747	
Béton à base des graviers tout-venants				
Eprouvette 1	14,138	332,745	16,549	14,185
Eprouvette 2	13,954	243,484	12,11	
Eprouvette 3	13,944	279,379	13,895	

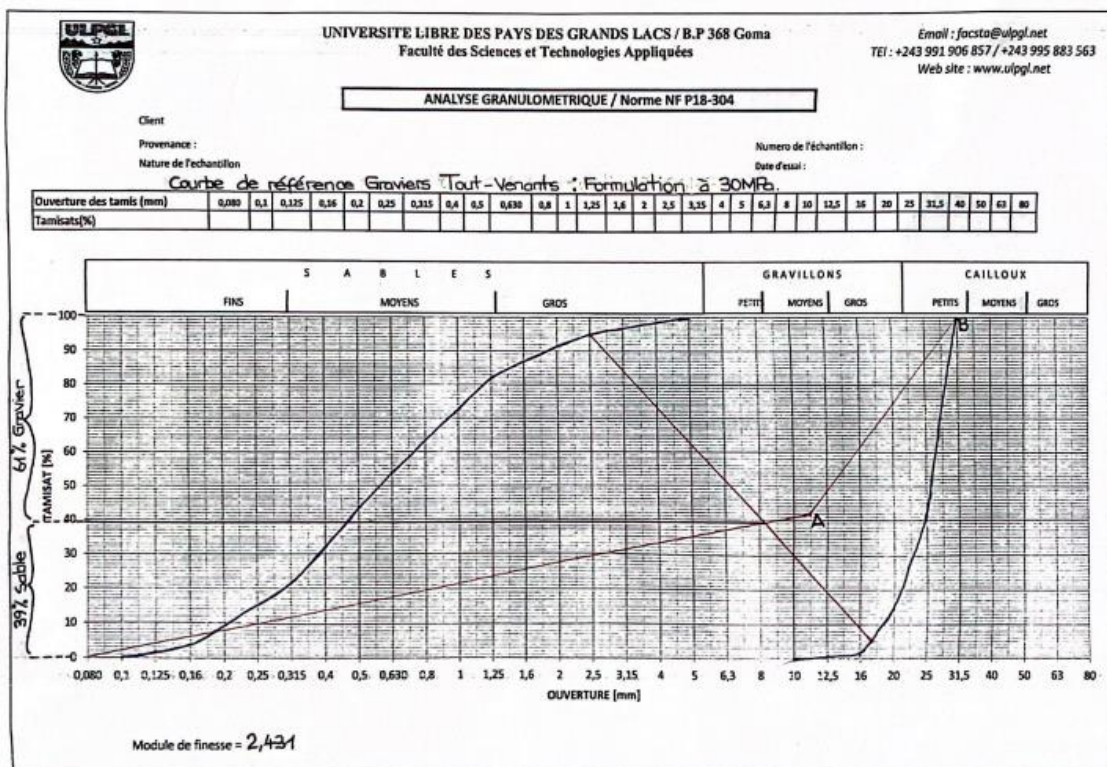
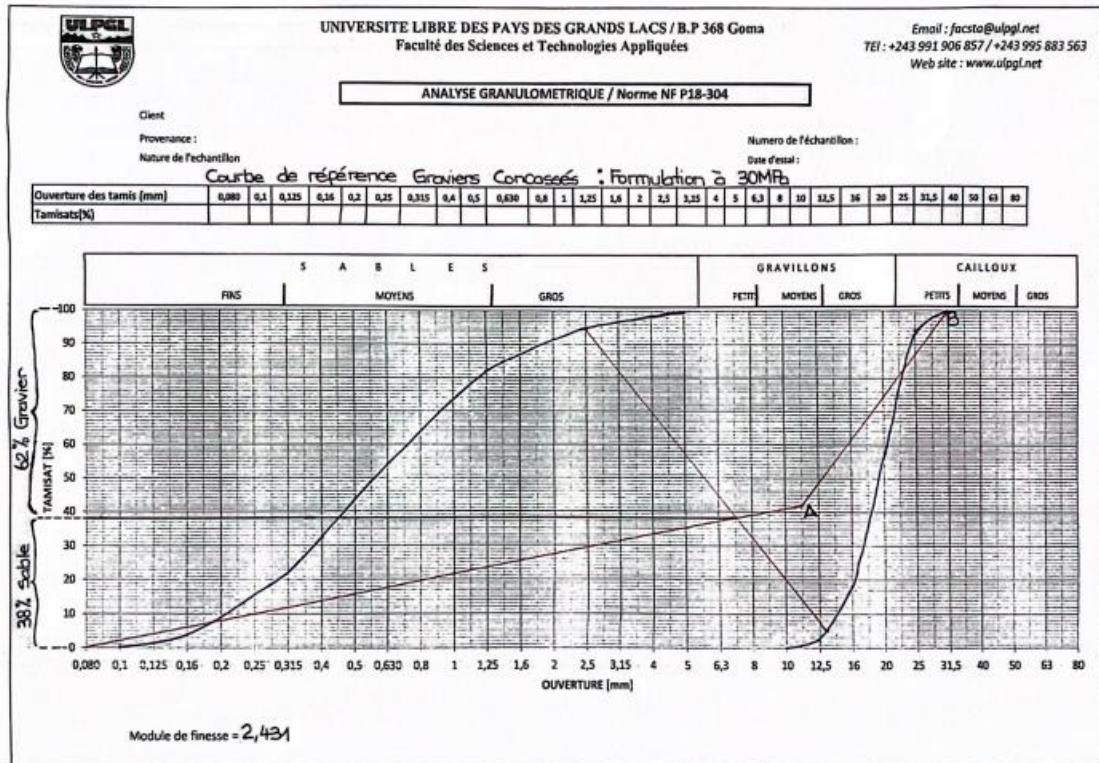
ANNEXE 9 : LES DIFFERENTES COURBES DE REFERENCE (COURBE OAB)



ÉTUDE MÉCANIQUE ET ÉCONOMIQUE DU BÉTON AUX GRAVIERS CONCASSÉS ET DU BÉTON AUX GRAVIERS TOUT-VENANTS



ÉTUDE MÉCANIQUE ET ÉCONOMIQUE DU BÉTON AUX GRAVIERS CONCASSÉS ET DU BÉTON AUX GRAVIERS TOUT-VENANTS



ANNEXE 10 : COEFFICIENT DE FORME DES GRAVIERS

Coefficient de forme: Gravier Concassés					
Prise d'essai: 100 Gravier					
Numéro	Longueur (mm*10)	Epaisseur (mm*10)	Numéro	Longueur (mm*10)	Epaisseur (mm*10)
1	431	171	51	470	315
2	460	212	52	307	161
3	405	173	53	457	158
4	500	220	54	528	290
5	675	213	55	477	213
6	409	230	56	456	233
7	395	169	57	383	182
8	386	168	58	418	272
9	360	204	59	393	170
10	451	120	60	334	192
11	447	221	61	427	169
12	359	197	62	360	170
13	447	161	63	330	154
14	530	243	64	467	230
15	358	176	65	354	216
16	540	170	66	451	168
17	490	252	67	531	167
18	367	163	68	323	143
19	394	215	69	301	162
20	326	223	70	354	217
21	340	164	71	310	176
22	442	202	72	329	130
23	420	196	73	297	185
24	410	243	74	340	202
25	502	279	75	331	201
26	360	193	76	468	310
27	291	167	77	465	154
28	383	144	78	376	168
29	476	242	79	344	183
30	426	197	80	319	204
31	433	260	81	353	214
32	404	205	82	461	230
33	584	223	83	376	218
34	410	211	84	34	135
35	381	179	85	496	150
36	385	123	86	454	263
37	395	184	87	440	250
38	360	210	88	446	203
39	526	293	89	417	163
40	345	219	90	408	206
41	394	209	91	331	181
42	566	231	92	310	162
43	366	271	93	353	223
44	397	100	94	464	241
45	457	270	95	521	212
46	404	233	96	440	215
47	496	254	97	347	230
48	320	181	98	472	220
49	370	131	99	375	237
50	466	170	100	353	121
S.TOTAL	21239	10085	S.TOTAL	19551	9969
TOTAL GEN. LONGUEURS (mm)				4079	
TOTAL GEN. EPAISSEURS (mm)				2005,4	
Coefficient de forme: Gravier Concassés				0,492	

*ÉTUDE MÉCANIQUE ET ÉCONOMIQUE DU BÉTON AUX GRAVIERS CONCASSÉS ET DU
BÉTON AUX GRAVIERS TOUT-VENANTS*

Coefficient de forme: Grapiers Tout-venants					
Prise d'essai: 100 Grapiers					
Numéro	Longueur (mm*10)	Epaisseur (mm*10)	Numéro	Longueur (mm*10)	Epaisseur (mm*10)
1	438	205	51	496	22
2	354	204	52	491	268
3	414	216	53	358	256
4	422	193	54	395	251
5	336	192	55	343	196
6	403	200	56	346	180
7	408	206	57	470	130
8	427	240	58	362	183
9	432	213	59	462	285
10	390	180	60	406	245
11	395	228	61	407	244
12	466	243	62	428	287
13	465	192	63	302	175
14	379	223	64	343	149
15	466	120	65	434	230
16	351	190	66	400	194
17	387	200	67	522	199
18	366	251	68	384	260
19	434	196	69	334	207
20	566	198	70	424	240
21	372	167	71	420	287
22	403	176	72	415	285
23	430	160	73	344	210
24	345	208	74	390	241
25	471	245	75	369	245
26	387	216	76	345	246
27	442	193	77	408	222
28	361	188	78	446	248
29	366	211	79	386	251
30	490	220	80	317	200
31	379	260	81	379	223
32	413	232	82	320	176
33	351	217	83	351	238
34	425	214	84	344	180
35	345	201	85	375	243
36	364	200	86	350	214
37	527	233	87	377	219
38	396	234	88	404	239
39	423	201	89	304	210
40	438	214	90	306	227
41	424	228	91	424	219
42	497	213	92	383	213
43	402	22	93	320	207
44	340	211	94	397	246
45	379	197	95	445	276
46	480	261	96	530	182
47	383	228	97	407	217
48	310	232	98	346	168
49	446	235	99	451	280
50	527	262	100	310	187
S.TOTAL	20615	10369	S.TOTAL	19470	11000
TOTAL GEN. LONGUEURS (mm)				4008,5	
TOTAL GEN. EPAISSEURS (mm)				2136,9	
Coefficient de forme: Grapiers Tout-venants				0,533	