

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS-LACS

ULPGL/GOMA



B.P. 368 Goma

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Génie Civil

**ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES DE
FORMULATION DU BÉTON : CAS DE LA MÉTHODE DE
VOLUMES ABSOLUS ET DE BOLOMEY**

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du

Diplôme de Bachelor en Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie Civil

Présenté par : NZANZU VUYINGO Welcome

Dirigé par : Prof. BISHWEKA CHERIF

Encadré par : Ir FRANKLIN BISIMWA

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

ÉPIGRAPHE

« Bien doser, c'est garantir la solidité. »

Auteur anonyme

DÉDICACE

À ma mère

NZANZU VUYINGO Welcome

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail est le fruit d'un cheminement jalonné de rencontres et d'accompagnements précieux. A toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous adressons ici notre reconnaissance la plus profonde. Nous adressons tout d'abord nos remerciements à Dieu Tout-Puissant, source de force, de patience et de courage, qui nous a soutenus tout au long de ces années d'études.

Nous remercions les autorités académiques de l'ULPGL/Goma, particulièrement la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées (FSTA), pour leur engagement à offrir une formation de qualité.

Nos remerciements vont également à Prof. BISHWEKA CHERIF, Directeur de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils éclairés, ainsi qu'à Ir. FRANKLIN BISIMWA, notre encadreur, pour sa patience, son expertise et son précieux accompagnement.

Nous exprimons notre reconnaissance au Dr KAHUKO DEYEM, à l'Ir ERASTE, l'Ir NGWASI Stéphane, à nos frères VISANGULIRIO Prince et MUHERUKI Julien, à notre grand-mère MONDE JUSTE, à notre frère WAMBA EPHRAIM, JOVIAL AKILI, ADAMA KALONDERO à notre maman FIMBO Clémence, notre Frère MUHESI Chrispin, maman ANNE-MARIE BAUMA, l'Ir KHALED BIN et à notre sœur ROSE ALIMASI pour leur amour, leur soutien indéfectible et leur présence rassurante tout au long de notre parcours.

Nos remerciements s'adressent également à nos camarades de promotion : David BUNGUKE, Patrick MBEHO, Naomie BAYOLI, Gloire MUNIHIRE, Joseph BAGALWA, Pascal ZIGABE, Digrand WATUKALUSU, Josué KATSUVA, Philippe LUKESHI KYALONDAWA, Gulain SHANG, MUNGOSY Josué pour leurs encouragements et la camaraderie partagée au cours de ces années, ainsi qu'aux aînés en génie civil, Pascal CHOKOLA et Jonas KULIMUSHI, pour leurs conseils précieux au laboratoire.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce mémoire, nous exprimons notre gratitude sincère.

NZANZU VUYINGO Welcome

RÉSUMÉ

Ce mémoire, intitulé « Étude comparative de méthodes de formulation du béton : cas de la méthode des Volumes Absolus et de Bolomey », a pour objectif principal de comparer deux approches de formulation du béton afin d'identifier celle qui permet d'atteindre de manière plus fiable une résistance mécanique cible de 20MPa à 28 jours, tout en tenant compte de l'efficacité économique dans le contexte de Goma. L'étude s'inscrit dans le cadre des travaux de génie civil où la qualité, la durabilité et la performance mécanique du béton constituent des exigences essentielles pour la sécurité des ouvrages. Elle repose sur une approche expérimentale combinant une revue documentaire et des essais de laboratoire réalisés à l'ULPGL/Goma. Les matériaux sont caractérisés à travers des essais normalisés tels que : analyse granulométrique, module de finesse, masse volumique, équivalent de sable, essai Los Angeles pour les granulats, ainsi que l'essai prise sur le ciment. Les bétons ont été ensuite formulés selon les deux méthodes pour un béton binaire avec un affaissement cible de 7 à 12 cm (classe S2), puis testés à l'état frais et à l'état durci. Les résultats expérimentaux montrent que : la méthode des Volumes

Absolus a permis d'obtenir une résistance moyenne à 28 jours de 16,67 MPa, avec un coût estimé à 200 dollars tandis que la méthode de Bolomey a donné une résistance moyenne de 10,39 MPa, pour un coût plus élevé de 232,27 dollars. Aucune des deux méthodes n'a permis d'atteindre strictement la résistance cible de 20 MPa, mais la méthode des Volumes Absolus s'est révélée plus performante mécaniquement et plus économique. Ainsi, l'étude conclut que, dans le contexte étudié, la méthode des Volumes Absolus constitue une approche plus fiable et plus rationnelle pour la formulation d'un béton binaire destiné aux ouvrages courants en béton armé. Elle offre un meilleur compromis entre performance mécanique et coût, tout en permettant un contrôle plus rigoureux des paramètres de formulation.

Mots clés : Béton, binaire, compression, coût, comparative.

ABSTRACT

This thesis, titled "Comparative Study of Concrete Mix Design Methods: The Case of the Absolute Volumes and Bolomey Methods," primarily aims to compare two mix design approaches to identify which more reliably achieves a target compressive strength of 20 MPa at 28 days, while considering economic efficiency within the context of Goma.

The study is situated within the field of civil engineering, where the quality, durability, and mechanical performance of concrete are essential requirements for structural safety. It is based on an experimental approach combining a literature review and laboratory tests conducted at ULPGL/Goma. The materials were characterized through standardized tests such as: sieve analysis, fineness modulus, density, sand equivalent, Los Angeles abrasion test for aggregates, and cement setting time tests.

The concretes were then formulated according to both methods for a binary concrete with a target slump of 7 to 12 cm (S2 class), and tested in both fresh and hardened states. Experimental results show that: the Absolute Volumes method achieved an average 28-day strength of 16.67 MPa at an estimated cost of \$200, while the Bolomey method yielded an average strength of 10.39 MPa at a higher cost of \$232.27.

Neither method strictly reached the target strength of 20 MPa, but the Absolute Volumes method proved to be more mechanically efficient and more economical. Thus, the study concludes that, in the context studied, the Absolute Volumes method constitutes a more reliable and rational approach for the formulation of binary concrete for standard reinforced concrete structures. It offers a better compromise between mechanical performance and cost, while allowing for more rigorous control of formulation parameters.

Keywords: Concrete, binary, compression, cost, comparative.

SIGLES ET ABBREVIATIONS

AG : Analyse Granulométrique

BHP : Béton à hautes performances

C : Dosage Ciment

D_{max} : Dimension maximale des granulats

D : le diamètre du plus gros grain

E : Dosage Eau

E_s : Equivalent de sable

F_{c28} : Résistance Caractéristique du béton à 28 jours

G : Proportion gravier

LA : Coefficient Los Angeles

M³ : Mètre cube

M_f : Module de finesse

MPa : Méga Pascal

M_s : Masse sèche de l'échantillon en g

K_s : correction supplémentaire fonction de la granularité du sable

S : Proportion Sable

ρ : Masse volumique

ULPGL : Université Libre des Pays de Grands Lacs

V_a : Volume air

V_c : Volume ciment

V_e : Volume eau

LISTE DE FIGURES

<i>Figure II-1 : Ciment CIMERWA</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-2 Sable Figure II-3 Gravier</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-4 Les différents tamis.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-5 Courbe optimale de Bolomey [15].....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-6 Position du point D sur la courbe optimale de Bolomey [15] .</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-7 Vertical de la juxtaposition des courbes [15].....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-8 vertical pour la superposition partielle des courbes [15]</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-9 vertical pour la discontinuité des courbes [15].....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure II-10 Abaques de DREUX</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure III-1 courbe granulométrique</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure III-2 : courbe de Dreux sable-gravier</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure III-3 courbe granulométrique avec déduction des pourcentages des constituants</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure III-4 Résultats des résistances à la compression</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Figure III-5 Cout de confection d'un metre cube de chaque méthode.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

LISTE DE TABLEAUX

<i>Tableau I-1 : Tableau de coefficient Los Angeles</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau I-2 Tableau de classification selon la masse volumique ...</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau II-1 : Appréciation de coefficient Los Angeles</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau II-2 Tableau des différentes valeurs de A</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau II-3 Tableau des différents coefficient K</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau II-4 Tableau de coefficient en fonction de la forme de granulat.</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau II-5 : Valeur de l'affaissement en fonction de la consistance du béton [10] .</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-1 Tableau de caractéristiques des granulats</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-2 Tableau de caractéristiques du ciment [3]</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-3 Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-4 Tableau de coefficient en fonction de la forme de granulat</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-5 Tableau des différentes masses</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-6 Tableau de masses pour 12 éprouvettes</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-7 Tableau de valeurs de A selon le beton</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau III-8 Valeur du coefficient K.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

Tableau III-9 Tableau pour la quantité pour 12 éprouvettes Erreur ! Signet non défini.
Tableau III-10 Tableau pour les quantités de deux méthodes Erreur ! Signet non défini.
Tableau III-11 Affaissements pour les différents types de béton Erreur ! Signet non défini.
Tableau III-12 les masse absolus du béton Erreur ! Signet non défini.
Tableau III-13 Tableau de calcul du cout pour Volumes Absolus . Erreur ! Signet non défini.
Tableau III-14 : Détermination du cout pour un dosage de 1m³ Erreur ! Signet non défini.

TABLE DE MATIÈRES

ÉPIGRAPHE	ii
DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
SIGLES ET ABBREVIATIONS	vii
LISTE DE FIGURES	viii
LISTE DE TABLEAUX	ix
TABLE DE MATIÈRES	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 1. GENERALITES.....	4
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 DEFINITION [6]	4

1.3	LES CONSTITUTIFS DU BETON	4
1.3.1	Granulats [2].....	5
1.3.2	Liants et Adjuvants.....	7
1.3.3	Eau de gâchage	9
1.4	LE BETON	10
1.4.1	Classification des bétons selon la masse volumique :	11
	Tableau I-2 Tableau de classification selon la masse volumique [4]	11
1.4.2	Méthodes de formulation de béton [8]	12
I.5	CONCLUSION PARTIELLE	15
Chapitre 2.	: METHODOLOGIES	16
2.1	INTRODUCTION	16
2.2	ORIGINE ET NATURE DES CONSTITUANTS	16
2.2.1	Le Ciment.....	16
2.2.2	Les granulats	16
2.2.3	L'eau de gâchage.....	17
2.3	CARACTERISATION DES CONSTITUANTS [8]	17
2.3.1	Ciment	17
2.3.2	Granulats	18
2.4	FORMULATION DU BETON	25
2.4.1	Méthode de Bolomey [3].....	25
2.4.2	Méthode des Volumes Absolus [4]	32
2.5	CARACTERISATION DES BETONS D'ETUDES	37
2.5.1	Béton frais	37
2.5.2	Béton durci	38
2.6	CONCLUSION PARTIELLE	40
Chapitre 3.	PRESENTATION INTERPRETATION ET DES RESULTATS	
	41	
3.2	CARACTERISTIQUES DES GRANULATS	41
3.2.1	Analyse granulométrique	41

3.2.2	Module de finesse.....	42
3.2.3	Degré de propreté du sable.....	42
3.2.4	MASSE VOLUMIQUE DES GRANULATS.....	43
3.3	RESULTATS DE LA FORMULATION.....	43
3.3.1	Méthode de Volumes Absolus	43
3.3.2	Méthode de Bolomey	49
3.4	RESULTATS DES AJUSTEMENTS POUR LA GACHE	54
3.5	CARACTERISTIQUE A L'ETAT DURCI.....	54
3.5.1	Masse volumique du béton.....	54
3.5.2	Résistance à la compression.....	55
3.6	ETUDE ECONOMIQUE	56
3.6.1	Méthode des volumes absolus.....	56
3.6.2	Méthode de bolomey	57
3.6.3	Comparaison du cout d'investissement pour les deux méthodes.....	57
3.7	CONCLUSION PARTIELLE	58
	CONCLUSION GÉNÉRALE	59
	BIBLIOGRAPHIE	61
	ANNEXES	63
	ANNEXE 9 : MODULE DE FINESSE	66

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La conception et la réalisation des ouvrages en béton armé tels que les bâtiments ou encore les infrastructures routières dépendent étroitement de la qualité, de la durabilité et des performances mécaniques du béton mis en œuvre. Obtenir un béton performant, fiable et économiquement optimisé constitue ainsi un enjeu majeur pour les ingénieurs. Dans ce contexte, la formulation du béton apparaît comme une étape cruciale. Elle vise à déterminer les proportions optimales de chaque constituant (ciment, granulats, eau et éventuellement adjuvants) afin d'atteindre une résistance mécanique cible, une bonne ouvrabilité et une durabilité conforme aux exigences du projet [1].

Parmi les différentes approches de formulation disponibles dans la littérature et dans la pratique, deux méthodes se distinguent particulièrement par leurs principes de calcul :

- **la méthode des Volumes Absolus**, tiré de la méthode de Dreux-Gorisse consiste à déterminer la composition du béton en considérant que la somme des volumes de tous les constituants (ciment, eau, granulats, air) est égale à **1 m³** de béton frais;
- **la méthode de Bolomey**, basée sur une relation empirique qui établit un lien direct entre la résistance du béton et le rapport Eau/Ciment (E/C), permettant ainsi une estimation rapide mais dépendant de coefficients expérimentaux.

Cependant, malgré les nombreuses études menées sur la formulation du béton à Goma, une incertitude demeure quant à la supériorité réelle des méthodes classiques par rapport à des approches rationnelles [1]. Il devient donc nécessaire de combler cette lacune scientifique en évaluant la méthode des Volumes Absolus et en la comparant avec celle de Bolomey, l'une se fonde sur une approche rationnelle basée sur les volumes réels occupés par les constituants, tandis que l'autre s'appuie sur une relation entre la résistance et le rapport Eau/Ciment.

Dans ce contexte, une question centrale se pose : quelle méthode de formulation, entre celle des Volumes Absolus et celle de Bolomey, permet de manière plus efficace et plus fiable d'atteindre voire de dépasser la performance mécanique cible pour un ouvrage en béton armé dans le contexte local ?

Pour guider cette recherche, quelques questions spécifiques se posent notamment ;

1. La méthode de Volumes Absolus offre-t-elle une meilleure précision de dosage et une performance mécanique plus élevée que la méthode de Bolomey pour les matériaux locaux utilisés dans la formulation du béton ?
2. Quelle méthode entre celle de volumes absolus et de Bolomey représente-elle un investissement plus rationnel pour un béton binaire de cible 20MPa.

Afin de répondre à la problématique posée, cette étude formule des hypothèses qui ont servi de réponses provisoires à vérifier au cours de l'analyse ; nous en avons deux dont :

1. La méthode des Volumes Absolus conduirait à une précision de dosage supérieure et à des performances mécaniques significativement meilleures à 28 jours que la méthode de Bolomey.
2. Bien que la méthode de Bolomey réduirait le coût de formulation, l'incapacité à atteindre le seuil de 20MPa pour un béton binaire transformerait l'économie de départ en une perte sèche, validant ainsi la méthode des volumes absolus comme l'option présentant le meilleur coût de fiabilité.

Le choix de ce sujet s'inscrit dans un contexte où la qualité du béton constitue un facteur déterminant pour la sécurité, la durabilité et la performance des ouvrages en béton armé, tels que les ponts, les tunnels et les bâtiments à haute résistance. Malgré l'existence de plusieurs méthodes de formulation du béton, il subsiste des divergences sur leur fiabilité, leur précision et leur adaptabilité aux matériaux locaux.

La méthode de Volumes Absolus est largement reconnue pour sa rigueur rationnelle et sa capacité à optimiser la compacité du béton. Cependant, elle peut être perçue comme complexe et dépendante de données précises sur les matériaux. À l'inverse, la méthode de Bolomey, fondée sur des relations empiriques entre la résistance et le rapport Eau/Ciment, est plus simple à mettre en œuvre mais peut présenter des écarts significatifs lorsqu'elle est appliquée à des matériaux locaux différents de ceux utilisés pour les tables expérimentales initiales.

[1].

Les travaux précédents qui traitent de ces méthodes nous présentent chaque méthode de son côté tels que le travail de Georges DREUX Ingénieur en Chef au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) [4]

C'est là que nous proposons ce travail, la motivation principale de cette étude repose sur la nécessité d'identifier la méthode la plus adaptée au contexte local en particulier à Goma afin de garantir que les formulations de béton atteignent les performances mécaniques requises de manière fiable et économique.

Ainsi, ce sujet présente un intérêt à la fois scientifique, par la contribution à la connaissance sur les méthodes de formulation, et pratique, en fournissant aux ingénieurs et techniciens des recommandations adaptées pour la production d'un béton de haute qualité.

L'objectif général de cette étude est de comparer la méthode des Volumes Absolus et la méthode de Bolomey dans la formulation du béton afin de déterminer celle qui permet d'atteindre de manière plus fiable et efficace la performance mécanique cible pour les ouvrages en béton armé, en tenant compte des matériaux locaux disponibles à Goma.

Afin d'atteindre l'objectif général de cette recherche, les objectifs spécifiques suivants ont été formulés :

1. Déterminer et appliquer les deux compositions théoriques pour obtenir un béton cible $\sigma_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et une ouvrabilité S_2 affaissement au cône de 7 à 12cm
2. Évaluer et comparer la performance mécanique (résistance moyenne) [5].
3. Formuler des recommandations pour le choix de la méthode de formulation dans le contexte d'un projet BTP.

Cette recherche adopte une approche comparative basée sur l'analyse des deux principales méthodes de formulation du béton : méthode de volumes absolus et la méthode de bolomey.

Elle s'appuie sur une revue documentaire, et des essais en laboratoire tels que l'essai de granulométrie, l'essai de résistance mécanique, l'essai de masse volumique... Hormis l'introduction et la conclusion générales, ce travail se subdivise tel que suit : Chapitre premier traite sur les généralités : Revue de la littérature sur les méthodes de formulation du béton (volumes absolus, bolomey), et notions théoriques, le deuxième chapitre traite sur la Méthodologie : description des matériaux utilisés, des procédures expérimentales, des essais réalisés et de la méthode de comparaison et le troisième chapitre traite sur présentation des résultats : Analyse comparative des résultats obtenus selon chaque méthode de formulation.

Chapitre 1. GENERALITES

1.1 INTRODUCTION

On appelle béton une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau et de granulats choisis de façon rationnelle. Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière off shore.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques.

1.2 DEFINITION [6]

Le béton est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, gravillons, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), Mêlé à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », c'est-à-dire qu'il se solidifie.

Le béton un matériau omniprésent aujourd'hui, tant dans le monde de la construction que dans d'autres domaines. A la fois économique et facilement manipulable, il répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité et sa résistance font de lui un matériau incontournable dans le domaine de la construction. Sa composition peut être variable, ce qui permet d'obtenir un béton répondant à des besoins spécifiques.

1.3 LES CONSTITUTIFS DU BETON

Le béton se compose de granulats (sables, graviers, cailloux) collés entre eux par un liant hydraulique : le ciment. Lorsque le ciment se trouve en présence d'eau, il fait prise, puis durcit progressivement.

1.3.1 Granulats [2]

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à chaque usage. Les granulats sont d'origines diverses :

- Naturelle : alluvionnaire, calcaire, éruptive.
- Artificielle : (ou provenant de sous-produits industriels) Il est donc nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire. Il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensionnes extrêmes d ou D des granulats rencontrés (norme XPP 18-540) :
 - ❖ Fillers 0/D où $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70% de passant à 0.063mm.
 - ❖ Sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ avec moins 70% de passant à 0.063mm.
 - ❖ Sables 0/D où $1 < D \leq 6.3\text{mm}$. ❖ graves 0/D où $D > 6.3\text{mm}$.
 - ❖ gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125\text{mm}$.
 - ❖ ballasts d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$. Différents types de caractéristiques de granulats :

1.3.1.1 Caractéristique intrinsèques :

Elles sont liées en général à la qualité de la roche exploitée.

a. Analyse granulométrique (NF P 18-560) :

L'analyse granulométriques promettent de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectait des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers (sédimentation).

b. Module de finesse (NFP 18-541) :

Le module de finesse (Mf) est défini comme étant le centième de la somme des refus cumulés aux tamis : 0.160-0.315-0.63-1.25-2.5-5-10-20-40-80 mm Selon les valeurs du module de finesse, le sable peut être classé de la manière suivante :

$1.8 < Mf < 2.2$ sable est peu à trop fin.

$2.2 < Mf < 2.8$ sable de meilleure qualité granulaire pour les bétons.

$2.8 < Mf < 3.3$ Le sable est un peu grossier, donnera un béton peu résistant mais moins maniabilité.

c. Masse volumique absolue :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume total de matière solide celui-ci (hors pores).

d. Masse volumique apparente :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume total de celui-ci y compris les pores (c. -à-d. avec vide)

e. Propreté de sable (Equivalent De sable NFP 18-598) :

C'est un essai consiste à séparer, dans une éprouvette, au moyen d'une « Solution lavant », les éléments grossiers qui sédimentent et les lamente fins qui restent en suspension. L'essai est effectué sur 120g de sable.

f. Essai au bleu de méthylène (NFP18-592) :

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses dans les sables et graves d'origines naturelle ou artificielle.

g. Essai LOS ANGELES (Résistance au choc NF P 18-573)

Détermine de résistance aux impacts (choc de boulets d'acier sur les granulats) basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs.

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, "coefficient Los Angeles" du matériau. Plus le coefficient Los Angeles « LA » est faible, plus le granulat est résistant à la fragmentation par chocs. Les valeurs de coefficient Los Angeles indiquent la nature du gravier et permettre d'apprécier leur qualité pour composer un béton comme présente le Tableau I-1

Tableau I-1 : Tableau de coefficient Los Angeles

Valeurs du coefficient Los Angeles	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 \leq LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 \leq LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre « mauvaise qualité »

1.3.1.2 Caractéristiques de fabrication :

Elles résultent en général des conditions de fabrication.

Entrent dans ce type de caractéristiques : Granularité, aplatissement, angularité, propreté des sables, propreté superficielle des gravillons, teneur en chlore, absorption, etc. L'indice et le rapport de concassage font partie des caractéristiques de fabrication.

1.3.2 Liants et Adjuvants

Dans cette section, sont donnés des généralités sur les liants et les adjuvants. Les liants sont des poudres fines qui facilitent l'adhésion entre divers constituants du béton. Quant aux adjuvants, ils sont là pour modifier les propriétés du béton.

A. Ciment

Le Ciment, liant hydraulique, c'est-à-dire matériau minéral finement moulu qui mélangé avec de l'eau forme une pâte qui fait et durcit. Les principales catégories de ciment :

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

1.3.2.1 Classification des ciments en fonction de leur composition :

Le ciment constitué de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15- 301 et ENV197-1.

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 15 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

CEM I : Ciment portland artificiel (CPA).

CME II : Ciment portland composé (CPJ)

CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF)

CEM IV : Ciment pouzzolaniques (CPZ)

CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Selon ses résistances à la compression : La norme NF EN 197-1, [10] classe les ciments courants d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme EN 1961, mesurée à 28 jours en six classes de résistance [7].

1.3.2.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies de la résistance normale à 28 jour ; des sous classes « R » sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Ces classes sont notées :

- Classe 32,5
- Classe 42,5
- Classe 52,5

Le ciment portland artificiel (CEMI) CPA : C'est le produit résultant de mouture de clinker, obtenu par La conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principales constituantes sont : la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux.

Le ciment portland composé (CEM II) (CPJ) : Les ciment portland composé contient au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaire, et des ajouts avec 30%. On a par convention : (clinker) + (autres constituants) + (constituants secondaires) = 100. Ciment de

Haut fourneau CEM III (CHF) : Constitué d'un mélange de clinker et de laitier granulé de haut fourneau (teneur minimale 36%).

Ciment pouzzolaniques CEM IV (CPZ) : Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolane et de cendre doit en plus satisfaire de « pouzzolanicité ».

Ciment composé CEM V (CLC) : Constitué d'un mélange de clinker, de laitier granulé et d'autres constituants secondaires.

Ciment portland à durcissement rapide : La résistance du ciment portland à durcissement rapide est dur à une quantité plus élevée de C3S ainsi qu'un broyage plus fin du clinker, ces ciments sont fin que le ciment portland ordinaire utilisés pour la construction à basses températures.

Ciment sur sulfaté : Le ciment sur sulfaté est fabrique en broyant ensemble, un mélange de 80% à 85% de laitier de haut fourneau granulé de 10 à 15% de sulfate de calcium et jusqu'à 5% de clinker de ciment portland ces ciment sont utilisés pour construire des égouts des sols contaminés. En générale ces ciments sont utilisés dans la réalisation d'ouvrage important.

Le ciment anti-bactérien : Il s'agit d'un ciment portland broyé avec un agent anti – bactérien à l'échelle micro biologique.

B. Adjuvants

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à une dose inférieure ou égale à 5% en masse de la teneur en ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange

à l'état frais et /ou à état durci. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule. Un adjuvant peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires.

Adjuvants modificateurs de rhéologie du béton :

- Plastifiants réducteurs d'eau
- Super Plastifiants hauts réducteurs d'eau Adjuvants

modificateurs de pris du béton :

- Accélérateurs de prise
- Retardateurs de prise

Autres catégories normalisées d'adjuvants :

- Hydrofuges
- Entraîneurs d'air

Autres adjuvant non définisse par la norme :

- Agents moussants
- Agents de viscosité

1.3.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton.

Cette l'eau est d'une grande importance, elle est soumise à certaines exigences et a même fait l'objet d'une norme (NF).

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

Caractéristiques physiques de l'eau de gâchage :

L'eau de gâchage des bétons doit être propre : ne pas contenir de matières en suspension au-delà de certaines valeurs permises.

Les tolérances réglementaires sont les suivantes : 2g /litre pour les bétons des types A et B et 5g /litre pour les bétons du type C, Avec :

Béton A : bétons de haute qualité à résistance élevée.

Béton B : béton à faible perméabilité.

Béton C : béton à faible résistance peu ou non armé.

1.4 LE BETON

Quelque type de béton hydraulique :

- Béton auto plaçant (BAP) :

Béton qui n'a pas besoin de vibration pour être mis en place, du fait sa grande ouvrabilité. Il est également nommé béton auto compactant, auto nivelant, (BAN).

- Béton balayé :

Béton (utilisé en sols, dallages ou chaussées) ayant subi, avant durcissement. Un traitement mécanique superficiel par brossage ou balayage.

- Béton caverneux :

Béton obtenu par la suppression ou une diminution très forte du granulat fin, c'est donc le produit d'un mélange de gros granulats et de pâte de ciment.

- Béton cellulaire :

Pâte de ciment ou mortier dont le granulat est très fin, avant durcissement, on introduit dans cette pâte une multitude de bulles d'air ou de gaz qui donnent au béton, après durcissement, sa texture cellulaire.

- Béton chloré :

Béton pouvant être soumis à des atmosphères chlorées, les chlorures pouvant être légèrement agressifs pour le ciment durci ainsi que pour les éléments métalliques que le béton comprendrait, la teneur en chlore doit être limitée.

- Béton d'argile expansée :

Béton léger dont les granulats sont constitués d'éléments d'argiles utilisé essentiellement comme béton isolant de charge.

- Béton poli :

Béton dont on enlève les irrégularités de surface suite à mauvaise mise en œuvre ou à l'utilisation de coffrages inadéquats et ceci afin de lui donner un aspect de surface lisse ▪ Béton à hautes performances (BHP) :

Abréviation pour « béton à hautes performances ». Ce béton rendu par sa formulation particulièrement compacte, donc de faible porosité présente une résistance mécanique (de 60 à 120 MPA) et une durabilité très supérieure aux béton courants.

- Béton traditionnels :

Peuvent être classés approximativement en trois classes, en fonction de leur résistance moyenne (mesurée sur cylindre à 28 jours)

- ❖ Béton de faible résistance, 10 à 20 MPa, utilisés pour de ouvrages massifs, des murs banchés, etc.
- ❖ Béton de résistance usuelle, 20 à 40 MPa, utilisés pour les structures en béton armé de bâtiment ou de travaux publics.
- ❖ Béton de résistance élevée, 40 à 55 MPa, souvent réservés aux ouvrages précontraints, ou aux éléments préfabriqués ou dont on souhaite un décoffrage rapide.

- Béton à haute résistance :

Dès avant la seconde Guerre mondiale, Eugène Freyssinet obtenait, pour une fabrication de précontraints par pré-tension, des résistances moyennes de l'ordre de 60 MPa. Dans les années 60, il était possible d'obtenir, en laboratoire, des résistances de l'ordre de 100 MPa, sans pour autant que ces résultats directement transposables au chantier.

- Béton à très haute résistance :

En laboratoire surtout, mais aussi sur chantier, des résistances encore plus hautes ont été atteintes, jusqu'à des valeurs dépassant 100 et même 120 MPa, en moyenne, sur cylindre à 28 jours.

1.4.1 Classification des bétons selon la masse volumique :

Suivant la masse volumique du béton, on distingue le béton très lourd (extra lourd), le béton lourd, le béton léger et le béton très léger. Le tableau I-2 présente la classification des bétons selon les masses volumiques.

Tableau I-2 Tableau de classification selon la masse volumique [4]

Classification	Masse volumique
Béton très lourd	$\geq 2,5 \text{ g/cm}^3$
Béton lourd	$1,8 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 2,5 \text{ g/cm}^3$
Béton léger	$0,5 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 1,8 \text{ g/cm}^3$
Béton très léger	$\leq 0,5 \text{ g/cm}^3$

Les bétons extra lourds sont formés de ciment et d'agréats spéciaux à masse volumique élevés. Ils sont utilisés souvent pour la protection contre les rayons radioactifs. Les bétons lourds sont formés des ciments et agrégats compacts ordinaires. Les bétons légers sont formés de ciment et d'agréats poreux naturels ou artificiels.

1.4.2 Méthodes de formulation de béton [8]

Il existe plusieurs méthodes de formulation du béton entre autres :

- **Méthode de FULLER – THOMPSON**

A étudie la composition du béton d'autant plus que l'état, ponts chaussées Tapez une équation ici., l'allusion de méthodes scientifiques de calculs , en 1907, FULLER en Allemagne et Thompson en Angleterre proposent une nouvelle méthode , méthode FULLER Thompson .

- **Méthode de FOURY**

La particularité de cette méthode est qu'elle est applicable à tous les granulats, quelle que soit la masse volumique. Foury a distingué des grains fins et moyens des ceux gros et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux courbes, il adopta aussi une échelle des abscisses graduée en $5\sqrt{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée $D/2$ et son ordonnée par la formule Où :

$$Y = A + 17\sqrt{D5BRD - 0.75} \quad (I. 3)$$

A : constante, traduisant la maniabilité du béton ; B : constant traduisant l'importance du serrage du béton ; D : plus grande dimension de tamis ; R : rayon moyen du moule. ▪ **Méthode de Joisel**
S'inspirant comme Foury 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.

Joisel prend comme échelle en abscisse, la $\sqrt{dm}$ au lieu de $\sqrt{d}$ 5 (Faury) ou m variant avec le serrage des matériaux. 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.

Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $D/2 / D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode. En revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une échelle à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats [Dreux et Festa, 1998].

▪ **Méthode Japonaise**

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a) **Dosage des gravillons :**

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage. A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

b) **Dosage du sable :**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

c) **Dosage du liant :**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d) **Dosage de l'eau et du super plastifiant :**

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

- **Méthode britannique (BRE 1988)**

La méthode du Département de l'Environnement, révisée en 1988 ([BRE 1988, citée par [Neville 1995]]), comporte les étapes suivantes :

- Etape 1 : détermination du rapport eau/ciment. Une première contrainte concerne la durabilité (valeur maximale du rapport e/c). Le rapport eau/ciment est ensuite déduit de la résistance à la compression requise, pour des âges compris entre 3 et 91 jours. Le type de ciment (durcissement lent ou durcissement rapide) et de granulats (concassé ou roulé) est aussi pris en compte dans une table et un abaque.
- Etape 2 : détermination de la quantité d'eau. Le principe est très similaire à celui adopté dans la méthode ACI 211 (paragraphe 4.6.1). Un raffinement supplémentaire consiste à considérer la forme des grains (anguleux ou non), qui est supposée contrôler la demande en eau, en plus de D max et de l'affaissement requis.
- Etape 3 : calcul de la quantité de ciment, en divisant la quantité d'eau par le rapport eau/ciment. A ce stade, une limite inférieure concernant la durabilité est prise en compte.
- Etape 4 : détermination de la masse totale de granulat. L'utilisateur peut lire dans un tableau la "densité du béton à l'état frais" en fonction de la quantité d'eau et de la densité des granulats. De cette densité, les masses (pour un volume unité) de ciment et d'eau sont soustraites.
- Etape 5 : détermination du rapport sable/sable + gravillon. Dans une série de tables, on trouve ce rapport en fonction de la maniabilité requise (exprimée par l'affaissement ou par le temps d'écoulement Vebe), de Dmax, du rapport eau/ciment et de la quantité de passants du sable au tamis de 0,6 mm. Quand le gravillon est livré en plusieurs coupures, les pourcentages de chaque coupure par rapport à la masse totale de gravillon sont proposés dans une autre table.

- **Méthode de Caquot**

Caquot cité dans [Dreux et Festa, 1998] 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. ▪

Méthode de Bolomey

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

- **Méthode K CHOUICHA [6]**

K. CHOUICHA : chercheur chef de laboratoire Département de génie civil, Université des sciences et technologie d'Oran, Algérie, Oran, Alegria. La méthode de K. CHOUICHA publiée un 9 Décembre 2005 cette méthode qui est basée sur les courbes granulométriques de chaque composé pour avoir une courbe du mélange basée sur un modèle dimension fractale DF. ▪ **La méthode des abaques de Dreux**

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

I.5 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre il a été question de présenter les généralités sur le béton ordinaire, ses constituants ; ses propriétés ainsi que sa formulation. Le chapitre deuxième présentera les matériels et méthodes utilisés pour la confection du béton.

Chapitre 2. : METHODOLOGIES

2.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré aux méthodologies utilisées, tant à partir de la documentation qu'en laboratoire. Il présente la nature et origine des constituants notamment celles du sable, du gravier, du ciment et de l'eau ; il aborde la caractérisation des constituants précisément celle du sable, du gravier, et du ciment ; il présente aussi la formulation du béton à l'aide de la méthode de Bolomey et la méthode des volumes absolus mais aussi la caractérisation du béton notamment à l'état frais et à l'état durci et en fin une conclusion partielle est présentée à la fin du chapitre.

2.2 ORIGINE ET NATURE DES CONSTITUANTS

Etant donné que les constituants du béton présentent des origines et natures différentes, dans cette section nous présentons respectivement l'origine et la nature de chaque constituant.

2.2.1 Le Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment CIMERWA, qui est un ciment pouzzolanique (CEM IV/42,5) produit en Rwanda avec une classe vraie de 37 MPa tel que on peut le voir en image sur la figure II-1.

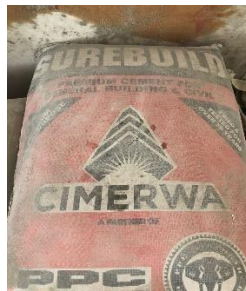


Figure II-1 : Ciment CIMERWA

2.2.2 Les granulats

Les graviers utilisés dans cette étude sont des concassés (5/16, 5 comme petite dimension et 16 grande dimension) sur la figure II-3 qui ont été achetés dans le quartier CCLK chez les concasseurs, le sable est roulé en provenance de idjwi sur la figure II-2.



Figure 2-2 Sable



Figure 2-3 Gravier

2.2.3 L'eau de gâchage

L'eau utilisée est celle fournie par la REGIDESO, et recueilli au robinet du laboratoire de l'ULPGL/Goma.

2.3 CARACTERISATION DES CONSTITUANTS [8]

La détermination des caractéristiques des différents constituants du béton a été réalisée à travers des essais normalisés. Pour le sable, ces essais incluent la masse volumique apparente, la masse volumique absolue, l'analyse granulométrique, et l'équivalent de sable. Concernant les granulats, les essais ont porté sur la masse volumique apparente, la masse volumique absolue, l'analyse granulométrique et le taux d'absorption d'eau. Enfin, pour le ciment, la consistance.

2.3.1 Ciment

Dans cette partie, nous présenterons l'essai de consistance, de prise ainsi que la masse volumique absolue du ciment.

2.3.1.1 Essai de consistance

La consistance normale du ciment est déterminée par l'essai normalisé (NF EN 196-3, Août 1995) [9]. Cet essai a pour but de repérer la consistance d'une pâte de liant Hydraulique à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde de consistance. Le principe est d'augmenter successivement l'eau dans une patte de ciment jusqu'à ce que la patte atteigne une consistance jugée normale suivant la norme.

2.3.1.2 Mode opératoire

Le mode opératoire se présente comme suit :

Préparer la pâte en commençant avec 500g de ciment à tester ; 135g d'eau dans un premier temps,

- Remplir immédiatement le moule tronconique, araser la surface,
- Abaisser la sonde jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte,
- Libérer les parties mobiles,
- La lecture de la valeur « d » indiquée par l'index :

Si $d < 5$ mm, recommencer avec 1 % d'eau en plus

Si $d > 7$ mm, recommencer avec 1 % d'eau en moins

Répéter l'essai avec des pâtes de teneurs en eau différentes jusqu'à ce qu'on trouve un enfoncement de $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

2.3.2 Granulats

La détermination de certaines caractéristiques des granulats entrant dans les bétons est effectuée à travers des essais normalisés notamment, l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable, l'essai de masse volumique apparente, l'essai de masse volumique absolue, l'essai Los Angeles et l'essai d'absorption d'eau.

2.3.2.1 Essai Los Angeles

Cet essai a pour objectif d'évaluer la résistance d'un matériau aux chocs et à la fragmentation, en déterminant le coefficient de Los Angeles [10].

La présentation qui suit expose le principe, le mode opératoire ainsi que la méthode de calcul des résultats.

i. Principe de l'essai

Le principe repose sur la mesure de la proportion de particules inférieures à 1,6 mm, générées après avoir soumis l'échantillon à des chocs répétés des boulets normalisés et aux frottements réciproques à l'intérieur de la machine Los Angeles. La granularité du matériau testé est choisie parmi six classes granulaires normalisées : (4/6,3), (6,3/10), (10/14), (10/25), (16/31,5) ou (25/50).

Tableau II-1 : Appréciation de coefficient Los Angeles [10]

Valeurs du coefficient Los Angeles	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 \leq LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 \leq LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre, mauvaise qualité

2.3.2.2 Analyse granulométrique

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique qui est normalisé NF EN 933-1 (2012). Dans cette section nous présentons le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

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

i. Principe [11]

Le principe de l'analyse granulométrique consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. A l'issue du fractionnement, les masses de différents refus et tamisât obtenus sont rapportées à la masse initiale du matériau et les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de graphique.

ii. Mode opératoire

Le mode opératoire employé pour l'analyse granulométrique est conforme à la norme NF EN 933-1 (2012). Il consiste à :

- Nettoyer Les tamis à l'aide d'une brosse métallique
- Constituer la colonne de tamis en respectant l'ordre des ouvertures des mailles en fonction du matériau (31,5mm ; 25mm ; 20mm ; 16mm ; 12,5mm ; 10mm ; 8mm ; 6,3mm ; 5mm ; 4mm ; 3,15mm ; 2,5mm ; 1,6mm ; 0,8mm ; 630µm ; 400µm ; 315µm ; 250µm ; 160µm ; 125µm ; et 80µm) comme nous le présente la figure II-4



Figure II-4 Les différents tamis

- Introduire l'échantillon de Masse M_s sur le tamis de la colonne
- Mettre en place le couvercle ;
- Fixer la colonne des tamis sur le vibrotamis ;
- Tamiser de manière discontinue ;
- Peser les refus cumulés des tamis, en commençant par celui du tamis supérieur puis Exprimer les refus cumulés par rapport à la masse initiale M_s , et déduire des pourcentages des tamisât cumulés.

Expression de résultat

On établit un tableau qui reprend dans les colonnes les refus de chaque tamis, le refus cumulé (en pourcentage) et le tamisât (en pourcentage).

À partir de ces données :

- On trace une courbe granulométrique avec les masses des différents refus rapportée à la mase initiale du matériau et exprimée en pourcentage. Nous traçons la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D en abscisse.
- Pour le sable nous évaluons le module de finesse, qui est déterminé par la relation.

$$M_f = \frac{1}{100} \sum R_c (\%) [5mm; 2.5mm; 0.63mm; 0.315mm; 0.16mm]$$

Avec $R_c(\%)$:le refus cumulé en pourcentage

Le module de finesse du sable doit être entre 2.2 et 2.8, pour la confection du béton.

2.3.2.3 Masse volumique apparente des granulats

La masse volumique apparente permet d'évaluer la compacité d'un matériau granulaire, en tenant compte des vides entre les grains, elle est déterminée par un essai normalisé NF P 18555 [12] pour les sables et NF P 18-554 [13] pour les graviers.

Le but de cet essai est d'exprimer la masse d'un mètre cube de matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

i. Mode opératoire

Le mode opératoire suivie dans la détermination de la masse volumique apparente est conforme aux prescriptions de la norme NF P 18-555 (1990) [12]. Il se présente comme suit :

- Séchage des granulats préalablement lavés à l'étuve pendant 24h à 105°C ;
- Versement de l'échantillon dans un volume avec deux mains à 10 cm environ au-dessus
- Arasage à la règle le débordement ;
- Pesage du contenu et prise de M_s la masse correspondante ;

ii. Expression de résultat

Les résultats de l'essai de masse volumique apparente s'expriment en g/cm³ et se calculent à partir de la relation.

$$\rho = \frac{M_s}{V} \quad (II - 1)$$

Avec :

- ρ : Masse volumique apparente
- M_s : Masse du matériau sec en g
- V : Volume du récipient en cm³

2.3.2.4 Masse volumique absolue des granulats

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière pleine, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est déterminée par un essai normalisé NF P 18-555 [12] pour le sable et NF P18-554 [13] pour les graviers. Elle a pour but

l'expression de la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides dans le constituant.

i. Mode opératoire

La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats secs, d'environ 300g de masse sèche notée M_s . Le mode opératoire suivi est conforme à la norme NF P 18-555 [12] pour le sable et la norme NF P18-554 pour les graviers. Le mode opératoire consiste à :

- L'introduction d'une quantité V_1 d'eau dans une éprouvette graduée,
- L'introduction des granulats secs de masse M_s dans l'éprouvette graduée contenant de l'eau,
- Élimination des bulles d'air,
- Saturation des granulats dans l'éprouvette, ➤ Prise du volume V_2 correspondant.

ii. Expression de résultat

Les résultats de l'essai de masse volumique absolue s'expriment en g/cm^3 et se calculent à partir de la relation

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \quad (II - 2)$$

Avec :

- M_s : Masse sèche de l'échantillon en g,
- V_2 : Volume d'eau avec les granulats en cm^3 ,
- V_1 : Volume d'eau dans l'éprouvette gradué en cm^3 .

À l'issue des résultats de l'essai, les granulats sont classifiés en fonction de masses volumiques

2.3.2.5 Taux d'absorption d'eau de granulats

Le taux d'absorption d'eau représente la capacité d'un granulat à absorber l'eau lorsqu'il est plongé dans un milieu humide. Cet indicateur permet d'évaluer la porosité du matériau et joue un rôle important dans le dosage de l'eau de gâchage, influençant ainsi la maniabilité et les performances mécaniques du béton, il est déterminé par un essai normalisé NF P 18-554 [13].

Le but de cet essai est de déterminer la quantité d'eau qu'absorbe le sable ou le gravier en présence de l'eau.

i. Mode opératoire

Le mode opératoire employé dans la détermination du coefficient d'absorption d'eau est conforme à la norme NF P 18-555 (1990) [12] et se présente comme suit :

- Immersion de l'échantillon de sable ou de gravier dans l'eau pendant 24 heures à 20°C à la pression atmosphérique,
- Étalage de l'échantillon sur une surface plane non absorbante,
- Élimination de l'eau de surface avec l'air sec au séchoir pour le sable et avec un tissu pour le gravier,
- 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 .

ii. Expression de résultat

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

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (II - 3)$$

Avec M_a la masse humide et M_s la masse sèche, toutes exprimées en gramme.

La porosité quant à elle, se calcule à partir de la relation

$$Porosité = A_b \times \rho_{App} \quad (II - 4)$$

2.3.2.6 Degré de propreté du sable

Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai d'équivalent de sable qui est un essai normalisé NF EN 933-8 [14].

Le but de l'essai d'équivalent de sable est de déterminer le degré de propreté d'un sable. Il désigne la proportion du sable brut par rapport aux impuretés le contenant. Le principe se résume à l'introduction d'une masse de sable dans deux éprouvettes graduées contenant une solution lavant, afin d'évaluer en pourcentage la proportion du sable brut par rapport aux impuretés le contenant.

i. Mode opératoire

L'essai d'équivalent de sable s'effectue sur un échantillon de sable sec d'une masse sèche équivalent à 120 g afin d'éviter les pertes des fines particules suivant les prescriptions de la norme NF EN 933-8 [14].

La procédure suivie est :

- Remplissage de deux éprouvettes par la solution lavant jusqu'au premier repère, suivit du versement de la quantité de sable tarée sujet de l'essai,
- Élimination des bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main suivi d'un repos de 10 minutes,
- Bouchage des éprouvettes suivit de l'agitation à l'agitateur faisant un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes),
- Lavage et remplissage des 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,
- Fermeture du robinet au deuxième trait de jauge (supérieur) et on sort le tube laveur,
- Repos des éprouvettes pendant 20 minutes en évitant toute vibration,
- Mesure à vue des hauteurs h_1 , h_2 (h_2 est entachée d'incertitude), ➤ Mesure à piston de la hauteur h_2 , pour plus précision.

ii. Expression du résultat

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

$$E_s = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \quad (II - 5)$$

Avec :

- h_1 : La hauteur du sable propre seulement (cm).
- h_2 : La hauteur totale y compris les éléments fins
- E_s : Equivalent de sable (%)

2.4 FORMULATION DU BETON

La formulation d'un béton consiste à définir de manière rationnelle les proportions optimales des différents constituants (ciment, sable, gravier et eau) afin d'obtenir les performances souhaitées. Cette section présente les méthodes de formulation adoptées dans le cadre de cette étude, à savoir la méthode de Volumes Absolus et celle de Bolomey.

2.4.1 Méthode de Bolomey [3]

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Néanmoins, elle ne s'applique qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m³. Dans le cadre de la formulation du béton, on s'appuie sur les courbes granulométriques des constituants secs (sables et graviers) pour optimiser le mélange. En combinant ces matériaux selon différentes proportions, on obtient une grande variété de courbes granulométriques correspondant à chaque mélange possible. Autrement dit, pour une infinité de combinaisons de matériaux, il existe une infinité de courbes granulométriques résultantes. Le défi consiste alors à identifier, parmi ces possibilités, la courbe qui offre les meilleures caractéristiques pour le béton visé, tant en termes de compacité que de maniabilité. Cette courbe est appelée courbe granulométrique optimale.

Cette droite sert de référence pour établir la courbe de granulométrie optimale, laquelle est représentée à la figure II-4. Elle constitue l'objectif à atteindre lors du dosage, afin d'assurer une bonne répartition des grains et une compacité maximale du squelette granulaire.

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (II - 6)$$

Avec : - P le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d

- D le diamètre du plus gros grain,

- A varie entre 8 et 16

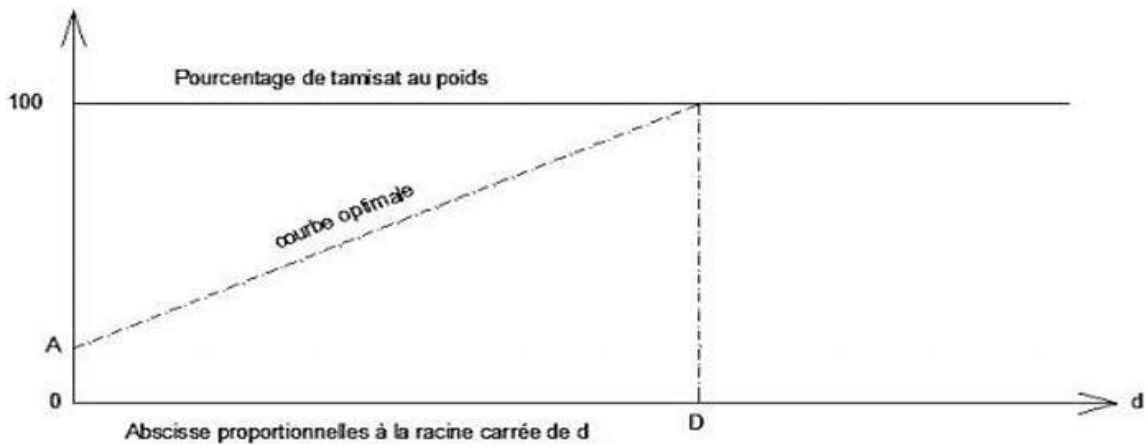


Figure II-5 Courbe optimale de Bolomey [15]

Les constantes **A** et **D** ont une signification précise dans le cadre de la définition de la courbe granulométrique optimale.

- **A** représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec. Ces fines particules jouent un rôle déterminant dans la maniabilité du béton. La valeur de **A** varie en fonction de la consistance recherchée (fluide, plastique, ferme, etc.) et de la provenance des granulats, qui influence la nature des fines.
- **D**, quant à lui, correspond à la dimension de la maille du tamis la plus grande qui permettrait de laisser passer la totalité des granulats du mélange.

La valeur de **A** est donc directement liée aux exigences de mise en œuvre du béton et aux caractéristiques des matériaux utilisés. Le **tableau II.1** et la **figure 2.4** récapitulent les différentes valeurs de **A** recommandées en fonction de la consistance du béton, du type de granulats employés, et de la position du point **D** sur la courbe optimale.

Tableau II-2 Tableau des différentes valeurs de A [1]

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6 à 8	8 à 10
Béton armé	10	12 à 14
Béton coulé	12	14 à 16

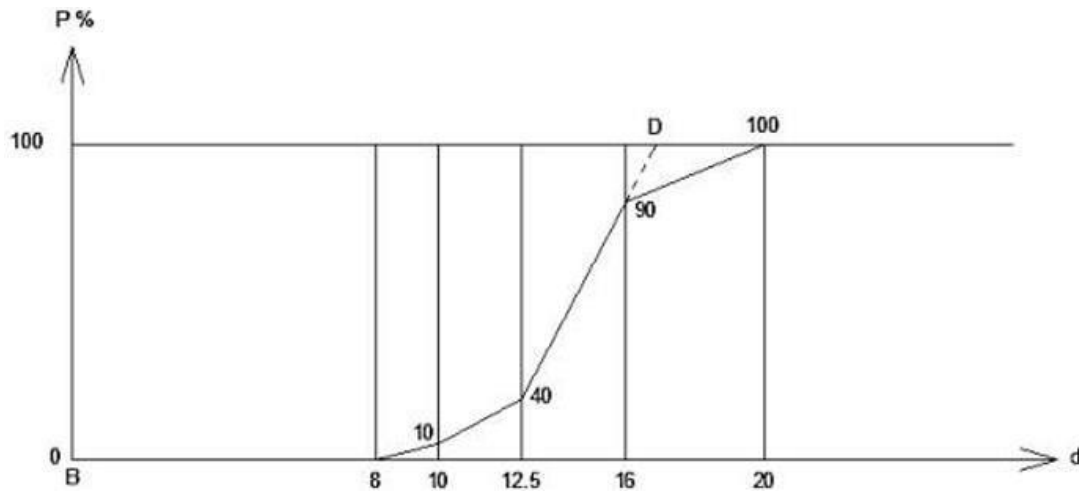


Figure II-6 Position du point D sur la courbe optimale de Bolomey [15]

La valeur de D, représentant le diamètre maximal des granulats dans le mélange, est généralement comprise entre 16 et 20 mm. Pour la déterminer, il suffit en pratique de prolonger le dernier segment de la courbe granulométrique du granulat le plus grossier jusqu'à atteindre l'axe des abscisses.

Cette méthode de construction graphique n'est applicable que lorsque le mélange présente une queue de granulométrie, c'est-à-dire une portion terminale avec une pente marquée – un cas très courant dans les compositions réelles.

Cependant, si le point obtenu par prolongement se situe au-delà du tiers supérieur de l'intervalle [16–20 mm], ou à droite de 20 mm, on retiendra par convention la valeur de D = 20 mm comme dimension maximale admissible pour le calcul. **Calcul des pourcentages des constituants**

- Cas du ciment

Le pourcentage du ciment est donné par la relation (2.20) :

$$C\% = \frac{\text{masse du ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \times 100 \quad (\text{II} - 7)$$

- Cas des granulats

Une méthode graphique, connue sous le nom de méthode de Josiel, est utilisée pour déterminer les proportions optimales de granulats dans un mélange. Cette méthode est universelle, car elle s'adapte à toutes les formes de courbes optimales et à tout type de graduation des axes sur le diagramme granulométrique.

Dans le cas le plus simple, on considère le mélange de deux fractions granulaires, par exemple (d_1/d_2) et (d_3/d_4). Trois configurations peuvent alors se présenter lors du tracé de leurs courbes granulométriques :

1. d_2 et d_3 coïncident : il y a juxtaposition parfaite des deux courbes ;
2. d_3 est situé à gauche de d_2 : on parle de superposition partielle entre les granulats ;
3. d_3 est situé à droite de d_2 : cela crée une discontinuité entre les deux fractions granulaires.

a. Cas de juxtaposition des courbes

La méthode de Josiel repose sur le tracé d'une verticale (parallèle à l'axe des ordonnées) au niveau de la zone de transition entre les deux courbes, selon le cas considéré. Dans le cas de juxtaposition des courbes (cas 1), cette verticale est tracée à la position commune $d_2 = d_3$.

Cette verticale coupe la courbe optimale en un point M. En reportant ce point M horizontalement sur l'échelle des ordonnées, on obtient un point N qui permet de lire deux segments importants :

- **Segment ON** : il correspond au pourcentage du granulat (d_1/d_2), c'est-à-dire la fraction de granulats ayant une dimension inférieure à d_2 .
- **Segment N100** : il représente le pourcentage du granulat (d_3/d_4), soit la fraction ayant une dimension supérieure à d_2 .

La juxtaposition de ces deux courbes et l'application de cette méthode sont illustrées à la **Figure II-6**.

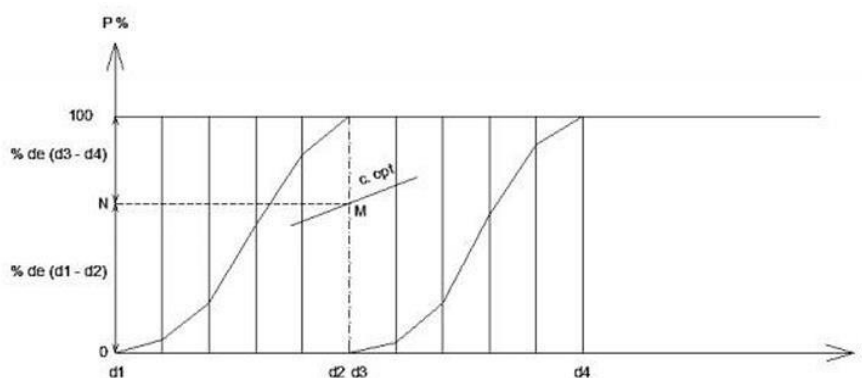


Figure II-7 Vertical de la juxtaposition des courbes [15]

b. Cas de juxtaposition partielle de deux courbes

Dans le cas d'une superposition partielle entre les deux fractions granulaires, la verticale de référence ne se trace plus à l'abscisse d_2 ou d_3 comme dans le cas de juxtaposition, mais à une valeur intermédiaire notée d_0 . Cette abscisse correspond à une dimension de tamis pour laquelle le pourcentage de tamisât (passant) du granulat le plus grossier est égal au pourcentage de refus du granulat le plus fin. Autrement dit, les longueurs des segments ab et cd sur le graphique sont égales ($ab = cd$).

Le point d'intersection entre cette verticale d_0 et la courbe optimale est noté M , et son report horizontal sur l'axe des ordonnées donne le point N , comme dans le cas précédent. Ces deux points permettent de lire respectivement :

- Le **pourcentage du granulat fin** (valeur du segment ON) ;
- Le **pourcentage du granulat grossier** (valeur du segment $N100$).

Il est essentiel de positionner avec précision la verticale d_0 , car la valeur de l'ordonnée du point M dépend directement de la dimension choisie pour cette verticale. Le procédé graphique consiste à faire glisser une règle parallèlement jusqu'à ce que les deux segments ab et cd soient rigoureusement égaux, ce qui assure un équilibre granulométrique dans le mélange.

Cette situation est illustrée à la Figure II-7.

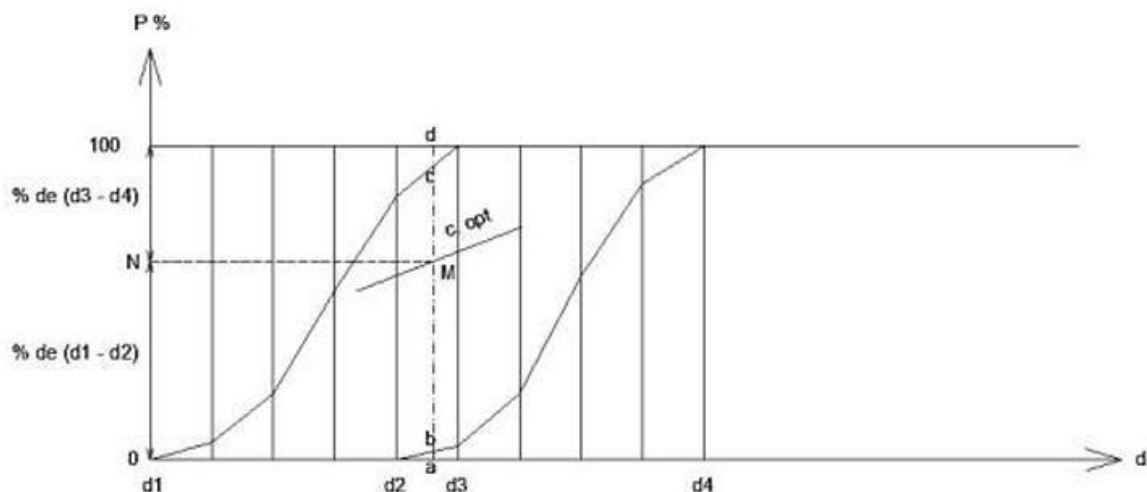


Figure II-8 vertical pour la superposition partielle des courbes [15]

c. Cas de discontinuité entre les deux courbes

Dans le cas d'une discontinuité entre les deux courbes granulométriques, c'est-à-dire lorsque le granulat le plus fin s'arrête nettement avant que le plus grossier ne commence, la verticale de référence est tracée à une abscisse intermédiaire notée d_0 , calculée selon la formule suivante : $d_0 = (d_2 + d_3)/2$, où d_2 est la dimension maximale du granulat fin, et d_3 la dimension minimale du granulat grossier.

La construction graphique reste identique aux cas précédents, Cette méthode permet de gérer les discontinuités granulométriques tout en maintenant une composition équilibrée et proche de la courbe optimale.

Ce cas de figure est représenté dans la Figure II-8.

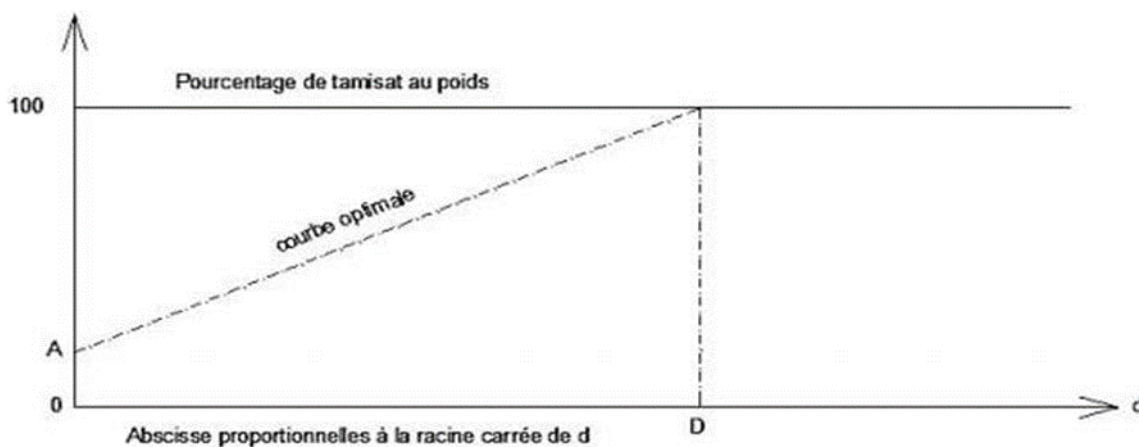


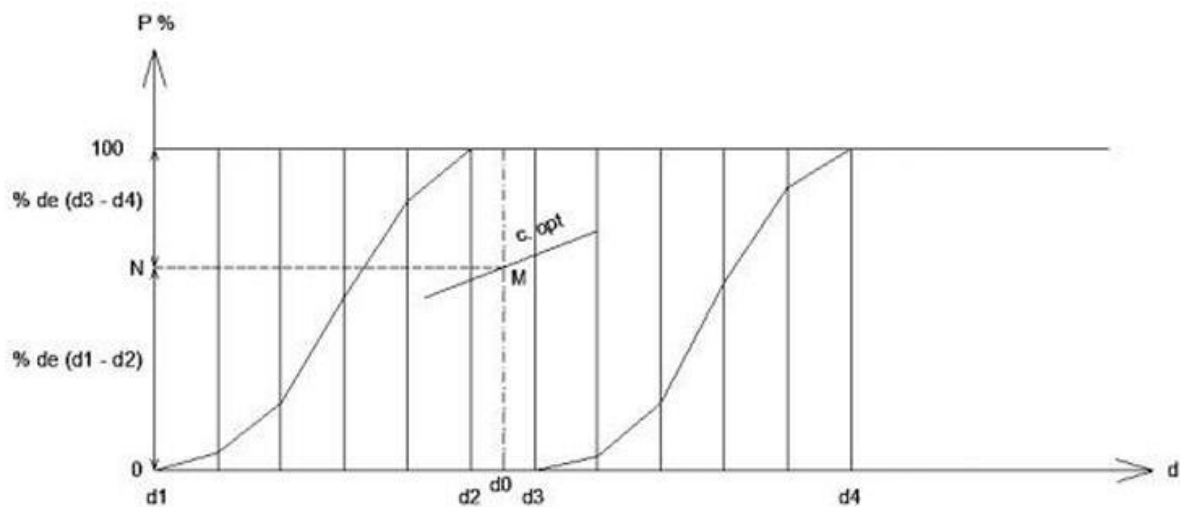
Figure II-9 vertical pour la discontinuité des courbes [15]

Détermination du dosage en eau

Pour des petits constituants ($D < 0.16$ mm) on a la relation (2.8) :

$$E1 = 0.23 * \text{poids des éléments secs } (< 0.16 \text{ mm}) \quad (\text{II} - 8)$$

Pour des gros éléments ($D > 0.16$ mm) on a la relation (2.9) :



$$E2 = \frac{K \times \text{poids des éléments secs}}{1.17 \times \sqrt{0.16 \times D}} \times 100 \quad (\text{II} - 9)$$

S'il s'agit de passoire au lieu de tamis le coefficient 1.17 serait remplacé par 1. Le coefficient K est tiré du tableau II-2

Tableau II-3 Tableau des différents coefficient K [1]

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

La quantité de l'eau doit être exprimée en pourcentage comme pour le ciment et les granulats, par rapport au total des éléments secs.

$$E (\%) = \frac{E1 + E2}{\text{masse des éléments secs}} \times 100 \quad (\text{II} - 10)$$

Le rapport eau/ciment (E/C) joue un rôle fondamental dans la formulation du béton, car il influence directement la résistance mécanique et la durabilité du matériau. En règle générale, il est recommandé de viser une valeur proche de 0,5, considérée comme un bon compromis entre résistance et ouvrabilité.

Toutefois, pour affiner le dosage en eau, on procède à un essai de gâchée. Cette opération consiste à introduire dans une bétonnière les constituants secs (ciment, sable, gravier) selon les

proportions théoriques déterminées. Après un mélange à sec, l'eau est ajoutée progressivement jusqu'à l'obtention de la consistance souhaitée (plastique, fluide, etc.).

La quantité d'eau utilisée à ce moment précis est ensuite corrigée à l'aide d'un facteur de réduction, afin de ramener la valeur à une base de 1 m³ de béton. Ce facteur tient compte des proportions initiales réduites utilisées lors de l'essai.

Si la différence absolue entre la quantité d'eau obtenue par l'essai et celle calculée théoriquement est inférieure ou égale à la moitié de cette dernière, les résultats initiaux sont considérés comme acceptables et conservés sans modification. Dans le cas contraire, les dosages sont recalculés à partir de la valeur obtenue lors de l'essai de gâchée, jugée plus représentative du comportement réel du béton.

$$E\% = \frac{\text{quantité réelle d'eau de gâchage}}{\text{masse des éléments secs}} \times 100 \quad (II - 11) \quad \text{Le calcul}$$

de la masse des constituants secs repose sur la densité apparente supposée du béton frais, qui permet d'estimer la masse totale d'un mètre cube de béton.

Les étapes du calcul sont les suivantes :

1. Détermination de la masse des éléments secs :

Masse des éléments secs = Masse totale du béton – Masse de l'eau de gâchage

2. Calcul de la masse des granulats :

Masse des granulats = Masse des éléments secs – Masse du ciment

3. Répartition des granulats :

La masse de chaque fraction granulaire (sable, gravier, etc.) est ensuite déterminée à partir du pourcentage cumulé issu de la courbe de correction, selon :

Masse d'un granulat donné = Pourcentage cumulé × Masse totale des granulats

Cette méthode de calcul a pour particularité de produire des bétons relativement riches en éléments fins, ce qui confère une bonne maniabilité et rend ces bétons adaptés à des parements bruts de coffrage, sans nécessiter de retouches de surface après décoffrage.

2.4.2 Méthode des Volumes Absolus [4]

La méthode des **Volumes Absolus** tiré de la méthode de Dreux-Goriss consiste à déterminer la composition du béton en considérant que la somme des volumes de tous les constituants

(ciment, eau, granulats, air) est égale à **1 m³** de béton frais, elle donne des dosages en volume et non pas en poids [4] .

Définition des volumes fixes

a. Volume total

La formulation est généralement établie pour **1 m³** de béton frais

$$V_{total} = 1m^3 \quad (II - 12)$$

Le principe de base s'écrit :

$$V_g + V_c + V_e + V_a = 1m^3 \quad (II - 13)$$

Où :

- V_c = volume absolu du ciment
- V_e = volume absolu de l'eau
- V_g = volume absolu des granulats
- V_a = volume d'air

D'après **Technologie du béton**, cette relation garantit l'équilibre volumique du mélange et permet d'éviter les erreurs de dosage liées aux méthodes purement pondérales

b. Volume d'air

Le volume d'air dépend du mode de mise en œuvre (vibration, serrage).

Selon le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pour un béton vibré courant, le volume d'air est compris entre 1 % et 2 %

c. Dosage d'eau

La quantité d'eau est déterminée en fonction de l'ouvrabilité recherchée (affaissement)..

Pour ce faire on utilise le diagramme sur la Figure II-9 ;

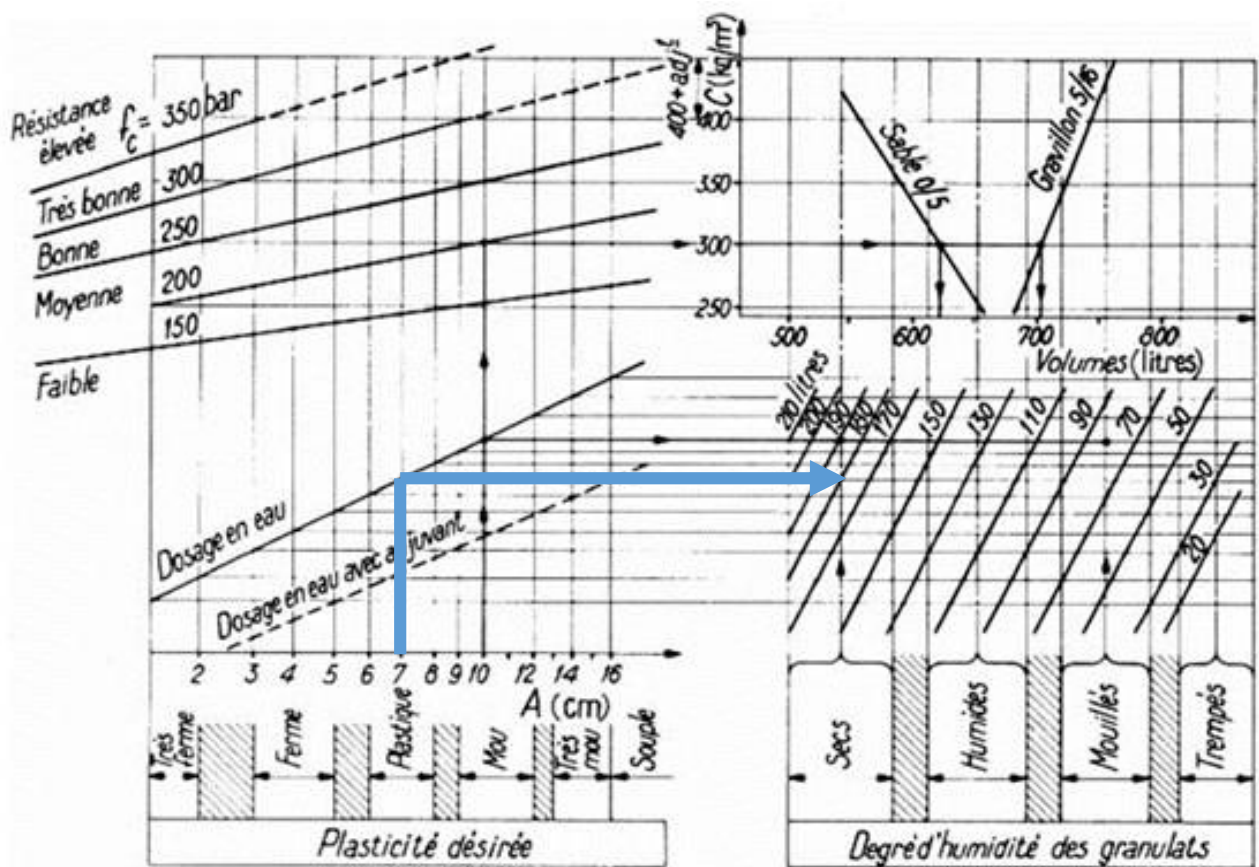


Figure II-10 Abaques de DREUX

Le point d'intersection entre la droite oblique eau et l'affaissement sur l'abaque, détermine le dosage en eau selon qu'on utilisera, et les graviers seront secs car ils seront d'abord séchés.

d. Dosage du ciment

On en déduit à partir du rapport C/E obtenu par la formule dite de Bolomey :

$$\sigma_{28} = G \times \sigma'_c (C/E - 0.5) \quad (II - 14)$$

Détermination du dosage des volumes absolus

a. Volume absolu du ciment

$$V = \frac{M_c}{\rho_{ab}} \quad (II - 15)$$

b. Volume de l'eau

$$V = \frac{Me}{\rho_{ab}} \quad (II - 16)$$

c. Volume de l'air

L'air occupe un volume de 1.5% du volume total,

D'où $V_{air} = 1000 \times 0.015 = 15l$

d. Le volume restant est pour les granulats

La somme des volumes doit être égale à 1000l ;

On a : $V_g = 1000 - (V_c + V_e + V_{air})$

Tracé de la droite de référence de Dreux pour la détermination des granulats

Comme $D_{max} \leq 20$, on prend

$$X = \frac{D_{max}}{2} \quad (II - 17)$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 \times D_{max}} + K + K_s + K_p \quad (II - 18)$$

Où :

- Y est donnée en pourcentage de passants cumulés
- K est un coefficient en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment selon le tableau II-3.
- K_s et K_p étant des coefficients correctifs définis par :
- K_s (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) : $k_s = (6M_f - 15)$ avec M_f le module de finesse du sable.
- K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable) : $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

On alors :

$$k_s = (6M_f - 15)$$

Tableau II-4 Tableau de coefficient en fonction de la forme de granulat

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+ fluide	-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

En fin à partir de Y et X on trace la courbe de Dreux pour déterminer les pourcentages des granulats qui est la figure III-2 dans le chapitre 3.

Donc :

$$\text{Volume du sable} = \frac{\%Sabe \times Vg}{100} \quad (II - 19)$$

$$\text{Volume du gravier} = \frac{\%Gravier \times Vg}{100} \quad (II - 20)$$

Pour trouver la masse de chaque constituant on prend le volume absolu du constituant on le multiplie par sa masse volumique absolu.

2.5 CARACTERISATION DES BETONS D'ETUDES

La détermination de certaines caractéristiques du béton s'effectue à l'aide d'essais normalisés. À l'état frais, le béton est caractérisé principalement par l'essai d'ouvrabilité réalisé lors de sa confection et sa densité. À l'état durci, son évaluation repose sur la résistance à la compression.

2.5.1 Béton frais

Les essais principaux réalisés sur le béton frais concernent sa maniabilité également appelée ouvrabilité et la densité.

2.5.1.1 L'essai de l'ouvrabilité du béton

Cet essai permet d'évaluer la maniabilité du béton contenant des granulats dont la dimension maximale est inférieure à 25 mm. Il consiste à observer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus l'affaissement est important, plus le béton est considéré comme fluide. L'essai est réalisé conformément à la norme **NF P 18-451** [16], couramment désignée sous le nom **d'essai au cône d'Abrams. Mode opératoire**

La marche à suivre de l'essai se déroule selon les étapes suivantes :

- La plaque d'appui est préalablement humidifiée, et le moule (cône d'Abrams) est légèrement huilé ;
- Le béton est introduit dans le moule en trois couches de hauteur égale. Chaque couche est compactée par 25 coups de tige de piquage, la tige devant pénétrer légèrement dans la couche sous-jacente ;
- Une fois le moule rempli, la surface est arasée en faisant rouler la tige de piquage sur le bord supérieur du moule ;
- Le moule est ensuite retiré verticalement, sans torsion, en 5 à 10 secondes ;
- Libéré de toute contrainte, le béton s'affaisse sous son propre poids ;
- La consistance du béton est alors caractérisée par la valeur de l'affaissement A, mesurée à l'aide d'un portique ou d'une règle verticale, entre la hauteur initiale du cône et le sommet du béton affaissé. Cette mesure doit être réalisée dans la minute suivant le démoulage et arrondie au centimètre près, ou à 10 mm près selon la précision requise.

Expression de résultats

La norme NF P 18 – 305 définit les mêmes classes d'affaissement, on note F, P, TP et Fl (Ferme,

Plastique, Très Plastique et Fluide), selon les mesures effectuées avec l'échelle gradué du portique.

Le tableau II-5 donne les classes de consistance selon l'affaissement mesuré.

Tableau II-5 : Valeur de l'affaissement en fonction de la consistance du béton [10]

Consistance	Affaissement (cm)	Tolérances
Ferme(F)	0 à 4	$\pm 1cm$
Plastique(P)	5 à 9	$\pm 2cm$
Très plastique (TP)	10 à 15	$\pm 3cm$
Fluide (Fl)	≥ 16	

2.5.2 Béton durci

Dans cette section, est présenté l'essai réalisé sur le béton à l'état durci qui est la résistance à la compression.

2.5.2.1 Densité du béton durci

La densité d'un béton durci est définie comme le rapport entre sa masse volumique et celle de l'eau. Cet essai a pour objectif de déterminer la masse volumique effective d'un échantillon de béton et revêt une grande importance, car il permet d'évaluer certaines de ses propriétés physiques et mécaniques essentielles.

Mode opératoire et expression de résultats

Le principe de cet essai consiste à mesurer la masse et le volume d'un échantillon de béton durci, afin d'en déduire directement sa densité.

L'échantillon utilisé doit avoir terminé sa phase de durcissement, ce qui correspond généralement à une période de 28 jours après le coulage. Une fois préparé, il est simplement pesé afin d'obtenir sa masse m , puis son volume est évalué. La densité est ensuite calculée à l'aide de la relation suivante (2.18) :

$$d = \frac{m}{\rho_w \times V} \quad (\text{II-21})$$

Avec :

- d : la densité du béton durci ;
- M : la masse de l'échantillon de béton durci en (kg) ;
- V : le volume en (m³) ;
- ρ_w : la masse volumique de l'eau (environ 1000kg/m³).

2.5.2.2 Essai de compression

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 18-406 (1981) [16] et a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire à l'aide des éprouvettes. Pour cet essai, les éprouvettes sont chargées jusqu'à la rupture dans une presse hydraulique. La charge maximale atteinte avant la rupture permet de calculer la résistance à la compression.

i. Mode opératoire

Le mode opératoire s'est déduit de la norme NF P 18-406 (1981) [16] Il se présente comme suit :

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

iii. Expression de résultat

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des Éprouvettes cylindriques. La pression utilisée est électrique à doubles manomètres et grands plateaux. Voici la relation (2.21).

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (\text{II} - 22)$$

Avec :

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

2.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a présenté l'ensemble des démarches expérimentales et techniques adoptées pour atteindre les objectifs de l'étude. Après avoir défini les matériaux utilisés, les différentes étapes de formulation ont été détaillées en s'appuyant principalement sur les méthodes de Bolomey et des Volumes Absolus.

La méthodologie expérimentale a également couvert les essais réalisés sur les matériaux de base (analyses granulométriques, propreté, masses volumiques), ainsi que les tests sur béton frais et durci, notamment les mesures de la résistance à la compression à différents âges.

Chapitre 3. PRESENTATION INTERPRETATION ET DES RESULTATS

3.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude, dont l'objectif principal est de comparer la résistance à la compression des bétons binaires formulés à l'aide des méthodes de Bolomey et de Volumes Absolus.

Dans un premier temps, il est procédé à un rappel succinct des caractéristiques des constituants, incluant l'analyse granulométrique, le degré de propreté ainsi que les masses volumiques. Ensuite, sont exposés les résultats des formulations, suivis des performances mesurées sur les bétons confectionnés, en particulier la résistance à la compression à différents âges.

3.2 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

Dans cette section, nous présentons les résultats relatifs à la caractérisation des granulats, notamment l'analyse granulométrique, le module de finesse, le degré de propreté du sable, la masse volumique (absolue et apparente), ainsi que le taux d'absorption.

3.2.1 Analyse granulométrique

La Figure III.1 illustre les courbes granulométriques du sable roulé et de gravier concassé. L'axe des abscisses indique les ouvertures des tamis (en mm), tandis que l'axe des ordonnées représente les pourcentages cumulés de matériaux passants.

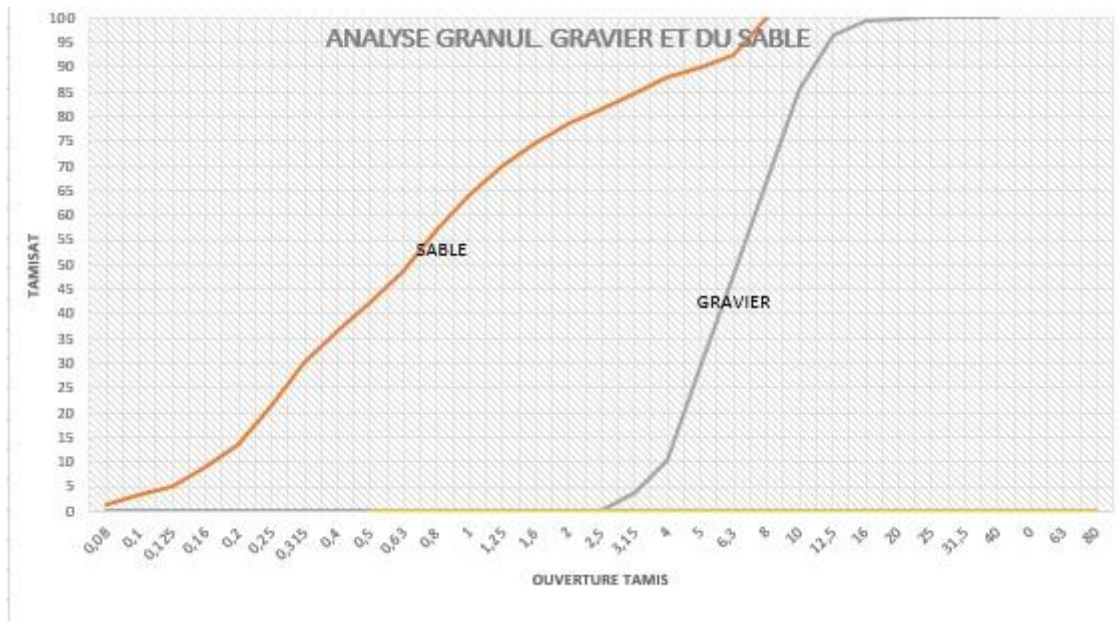


Figure III-1 courbe granulométrique

La figure III-1 présente la courbe granulométrique du sable représentée en orange, montre une bonne répartition des grains selon leurs tailles. La partie inférieure de la courbe correspond aux grains fins, tandis que la partie supérieure représente les grains plus grossiers. Le passage progressif entre ces deux zones indique une distribution continue des dimensions des particules, ce qui est favorable à une bonne compacité du matériau et le gravier concassé 5/16 mm assure un bon équilibre entre résistance et maniabilité.

3.2.2 Module de finesse

Le module de finesse obtenu était de 2,7. Valeur comprise entre 2,2 et 2,8 ; ce qui indique que le sable est approprié pour la confection du béton.

3.2.3 Degré de propreté du sable

Le degré de propreté du sable utilisé dans cette étude est de 89,7% cela implique que ce sable est idéal pour les bétons de haute qualité. La fiche de calcul de l'équivalent de sable est présentée en annexe.

3.2.4 MASSE VOLUMIQUE DES GRANULATS

Les valeurs des masses volumiques absolues et apparentes des granulats sont présentées en annexe se situent dans l'intervalle requis par la méthode de Bolomey, à savoir entre 2,5 g/cm³ et 2,7 g/cm³. Ces granulats sont donc adaptés à une utilisation dans le cadre de cette méthode

3.3 RESULTATS DE LA FORMULATION

Cette section présente successivement les résultats de la formulation selon la méthode de Volumes Absolus, puis selon celle de Bolomey toutes les deux en utilisant la même quantité de ciment.

3.3.1 Méthode de Volumes Absolus

□ CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

Les granulats utilisés ont des caractéristiques définies dans le tableau III-1 suivant ;

Tableau III-1 Tableau de caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Sable	Gravier
Forme (Roulé – Concassé)	Roulé	Concassé
Qualité (Excellente – Bonne – Passable)	Bonne	Bonne
Module de finesse : Mf	2.7	-
Masse volumique absolue : ρ_s	2670 Kg/m ³	2600 Kg/m ³

□ CARACTÉRISTIQUES DU CIMENT

Le ciment utilisé dans notre étude est le ciment CIMERWA des caractéristiques présentes dans le tableau III-2

Tableau III-2 Tableau de caractéristiques du ciment [3]

Caractéristiques	Valeur
Dénomination	Cimerwa 42.5N
Classe vraie ($\sigma'c$)	37Mpa
Masse volumique absolue (ρ_c)	2971Kg/m ³

- Affaissement : 7cm
- $\sigma'_{28} : 20 \times 1.15 = 23 \text{ MPa}$
- $D_{max} : 16\text{mm}$ ➤ Vibration: Normale Avec :

- σ'_{28} : résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa
- $\sigma'c$: classe vraie du ciment à 28 jours en MPa
- G : coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

✓ Détermination du rapport C/E

Formule de Bolomey : $\sigma'_{28} = G \cdot \sigma'c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$

Le coefficient granulaire « G » est fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats. Le *Tableau 2-3* reprend les coefficients granulaires G en fonction de la qualité et de la taille des granulats.

Tableau III-3 Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G

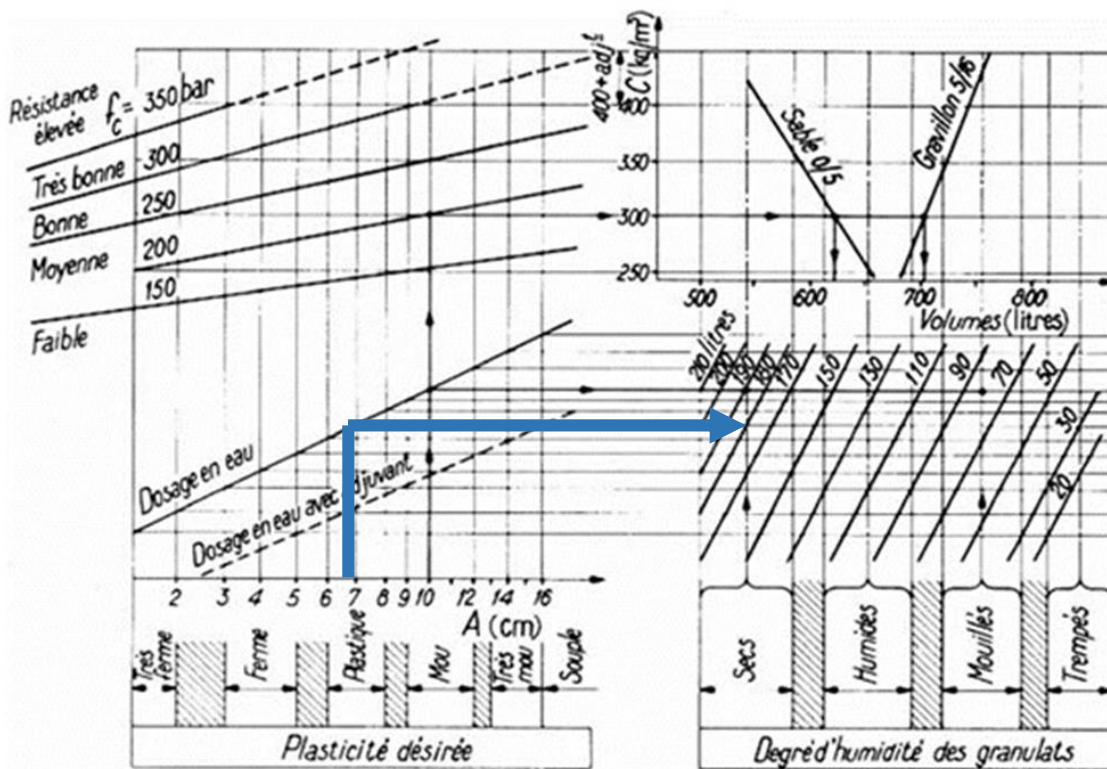
Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	Fins $D_{max} < 16 \text{ mm}$	$20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50 \text{ mm}$
Excellente	0,55	0,6	0,65
Bonne, courante	0,45	0,5	0,55
Passable	0,35	0,4	0,45

$G = 0.45$

En déduisant la valeur de C/E dans la formule de BOLOMEY on a :

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28}}{G \cdot \sigma_C} + 0.5 = \frac{23}{0.45 \times 37} + 0.5 = 1.881; C/E=1.881$$

✓ **Détermination du dosage en eau**



Le point d'intersection de C/E et l'affaissement de 7cm sur l'abaque de Dreux, détermine le dosage en eau selon qu'on utilisera le gravier sec : **E= 170 Kg/ m³**

✓ **Détermination du dosage ciment**

On a C/E=1.881, C=1.881×170= 319.77Kg/ m³

C= 319. 77Kg/ m³

✓ **Détermination du dosage des Volumes absolus**

1. Volume absolu du ciment

$$\rho_{ab} = 2.971 \text{ Kg/l, alors } V = \frac{m}{\rho_{ab}} = \frac{319.77}{2.971} = 107.63l$$

2. Volume de l'eau

$$\rho_{ab} = 1 \text{ Kg/l, alors } V = \frac{m}{\rho_{ab}} = \frac{170}{1} = 170 l$$

3. Volume de l'air

L'air occupe un volume de 1.5% du volume total,

D'où $V_{\text{air}} = 1000 \times 0.015 = 15 \text{ l}$

4. Le volume restant est pour les granulats

La somme des volumes doit être égale à 1000 l ;

On a : $V_g = 1000 - (V_c + V_e + V_{\text{air}})$

$$= 1000 - (107.63 + 170 + 15) = 707.37 \text{ l}$$

Sable + Gravier = 707.37 l

✓ Tracé de la droite de référence de Dreux

Comme $D_{\text{max}} \leq 20$, on prend $X = \frac{D_{\text{max}}}{2}$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 \times D_{\text{max}}} + K + K_s + K_p$$

Où :

- Y est donnée en pourcentage de passants cumulés
- K est un coefficient en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.
- Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :
 - Ks (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) : $k_s = (6M_f - 15)$ avec M_f le module de finesse du sable.
 - Kp (correction supplémentaire si le béton est pompable) : $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

On a alors :

- $k_s = (6M_f - 15)$ avec $M_f = 2.7$

$$ks = (6 \times 2.7) - 15 = -0.8$$

- $kp=0$
- $k=+2$

Tableau III-4 Tableau de coefficient en fonction de la forme de granulat

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+ fluide	-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

Alors $Y = 50 - \sqrt{1.25 \times 16} + 1.2 = 46.7$

$$X = \frac{16}{2} = 8$$

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

À partir des coordonnées de la courbe de référence, nous pouvons facilement déduire les pourcentages des constituants du béton. Le Tableau III-2 ci-après présente les différentes proportions obtenues.

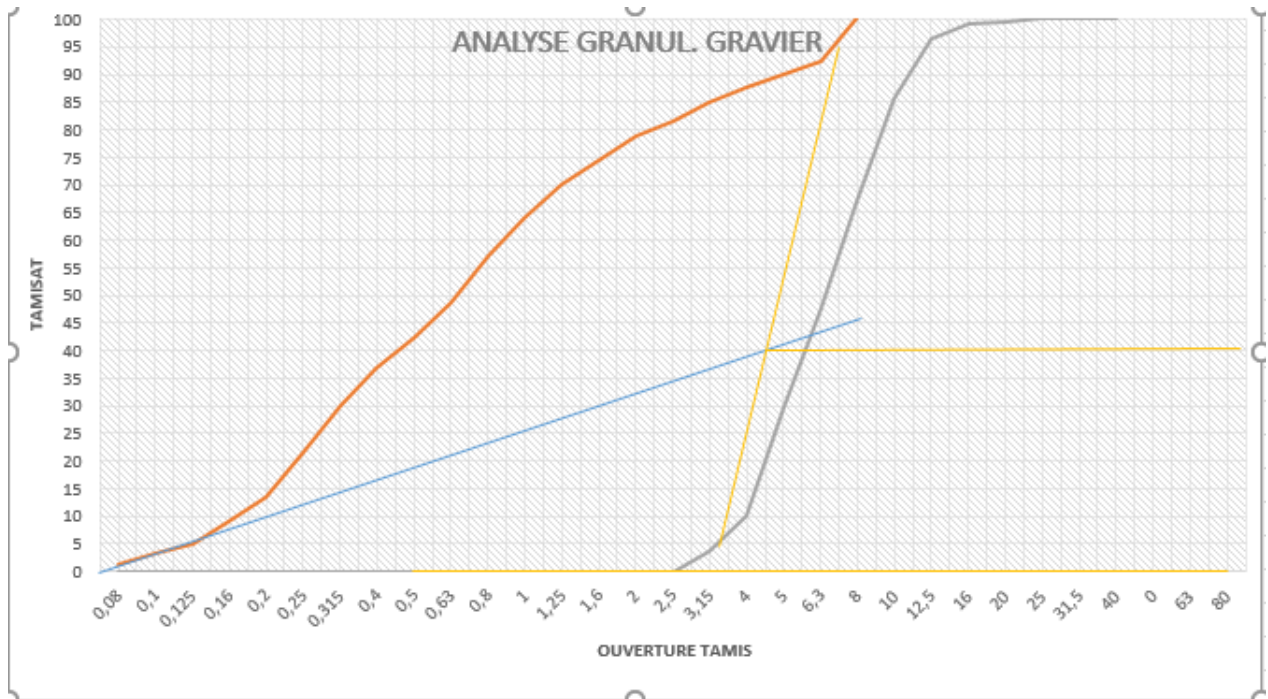


Figure III-2 : courbe de Dreux sable-gravier

%SABLE = 40%

%GRAVIER = 100-40 = 60%

$$\text{Volume sable} = \frac{40 \times 707.37}{100} = 282.9l$$

$$\text{Volume gravier} = \frac{60 \times 707.37}{100} = 424.4l$$

□ DEDUCTION DES DIFFERENTES MASSES

Nous convertissons les differents volumes en masse pour la confection dans le tableau III-5 suivant :

Tableau III-5 Tableau des différentes masses

Matériaux	Volume absolu	Calcul de masse (m)	Résultat (kg)
Ciment	107.63 l	107.63×2.971	319.76
Eau	170 l	170×1	170
Sable	282.9l	282.9×2.64	746.8
Gravier	424.4	424.4×2.66	1128.904
Air	15 l		
TOTAL			2365.46

□ QUANTITES POUR 12 EPROUVETTES

Nombre d'éprouvettes : Mouler et compacter au minimum 12 éprouvettes cylindriques pour cette gâchée pour les essais à 7, 14 et 28 jours (3 éprouvettes par âge de rupture + 3 éprouvettes de réserve).

Tableau III-6 Tableau de masses pour 12 éprouvettes

Matériaux	Masse(kg)	Volume moule	Masse pour une éprouvette(kg)	Masse pour 12 éprouvettes(kg)
Ciment	319.76	0.00643072	2.056	24.67
Eau	170	0.00643072	1.093	13.12
Sable	746.8	0.00643072	4.801	57.61
Gravier	1128.904	0.00643072	7.259	87.10

3.3.2 Méthode de Bolomey

Hypothèses :

- Béton lourd : masse volumique des éléments secs 2366.96 Kg dans 1m³
- Béton armé, vibré
- Dosage en ciment : 319.77 Kg/ m³

FORMULE DE BOLOMEY : $P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$

Avec : - P le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d

- D le diamètre du plus gros grain,

- A varie entre 8 et 16

Différentes Valeurs de A

Tableau III-7 Tableau de valeurs de A selon le béton

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton dame	6 à 8	8 à 10
Béton armé	10	12 à 14
Béton coulé	12	14 à 16

Vu que notre béton est dans la deuxième catégorie on prend $A=12$ pour dessiner la courbe de référence dans la figure III-3.

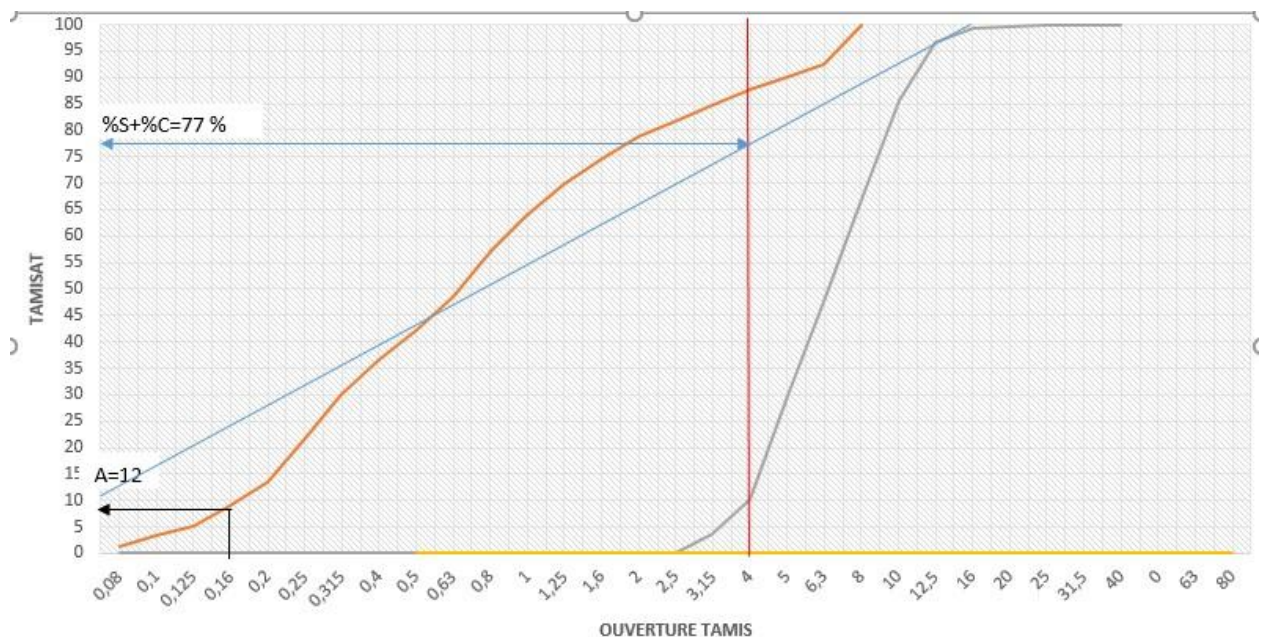


Figure III-3 courbe granulométrique avec déduction des pourcentages des constituants

Dans le cas d'une superposition partielle entre les deux fractions granulaires comme notre cas, la verticale de référence ne se trace plus à l'abscisse d_2 ou d_3 comme dans le cas de juxtaposition, mais à une valeur intermédiaire notée d_0 . Cette abscisse correspond à une dimension de tamis pour laquelle le pourcentage de tamisât (passant) du granulats le plus grossier est égal au pourcentage de refus du granulats le plus fin. Autrement dit, les longueurs des segments ab et cd sur le graphique sont égales ($ab = cd$).

Il est essentiel de positionner avec précision la verticale d_0 , car la valeur de l'ordonnée du point M dépend directement de la dimension choisie pour cette verticale. Le procédé graphique consiste à faire glisser une règle parallèlement jusqu'à ce que les deux segments ab

et cd soient rigoureusement égaux, ce qui assure un équilibre granulométrique dans le mélange.

Dans notre cas : %SABLE + %CIMENT = 77%

✓ **Pourcentage du gravier**

$$\begin{aligned}\%G &= 100\% - (\%SABLE + \%CIMENT) \\ &= 100\% - 77\% \\ &= 23\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Quantité de gravier} &= 23\% \times 2366.96 \text{ Kg} \\ &= 544.40 \text{ Kg dans un m}^3\end{aligned}$$

✓ **Pourcentage de ciment**

Pour le dosage nous nous sommes fixé comme hypothèse d'utiliser la même quantité de ciment du ciment nous sommes parti avec le dosage trouvé par la méthode de Volumes Absolus qui a comme procédure :

Le point d'intersection de C/E et l'affaissement de 7cm sur l'abaque de Dreux, détermine le dosage en eau selon qu'on utilisera le gravier sec : **E= 170 Kg/ m³, d'où le dosage du ciment est ;**

$$\begin{aligned}\text{On a } C/E &= 1.881, C = 1.881 \times 170 = 319.77 \text{ Kg/ m}^3 \\ C &= \mathbf{319.77 \text{ Kg/ m}^3}\end{aligned}$$

$$\%C = \frac{319.77}{2366.96} \times 100 = 13.3\%$$

✓ **Pourcentage du sable**

$$\begin{aligned}\%S &= 77\% - 13.3\% \\ &= 63.7\%\end{aligned}$$

$$\text{Quantité du sable : } 63.7\% \times 2366.96 \text{ Kg} = 1507.75 \text{ Kg dans un m}^3$$

✓ **Détermination de la quantité d'eau**

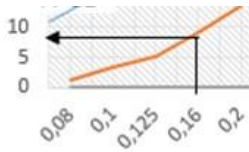
1. La quantité de l'eau doit être exprimée en pourcentage comme pour le ciment et les granulats, par rapport au total des éléments secs.

$$E (\%) = \frac{E1 + E2}{\text{masse des éléments secs}} \times 100 \quad (2.23)$$

Pour des petits constituants ($D < 0.16 \text{ mm}$) on a la relation

$$E1 = 0.23 * \text{poids des éléments secs (d < 0.16 mm)} \quad (d < 0.16 \text{ mm})$$

Cfr la courbe granulometrique = 9%



A ce 9% on ajoute la quantité du ciment qui est de 319.77 kg

$$\rightarrow \text{poids des éléments secs} = 9\% \times 2366.96 + 319.77 = 532.79 \text{ kg}$$

$$\rightarrow E1 = 0.23 \times 532.79 = 122.54 \text{ Kg}$$

Pour des gros éléments ($D > 0.16 \text{ mm}$) on a la relation

$$E2 = \frac{K \times \text{poids des éléments secs} > 0.16}{1,17 \times \sqrt[3]{0,16 \times 16}} \times 100$$

$$\rightarrow \text{poids des éléments secs} > 0.16 = 2366.96 - 532.79 = \mathbf{1834.17 \text{ Kg}}$$

Tableau III-8 Valeur du coefficient K

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

Nous prenons $K = 0.1$

$$E2 = \frac{0,1 \times 1834.17}{1,17 \times \sqrt[3]{0,16 \times 16}} = 114.63Kg$$

$$\rightarrow E = E1 + E2$$

$$= 122.54 + 114.63$$

$$= 237.17 Kg$$

□ QUANTITES POUR 12 EPROUVETTES

Gâchée pour les essais à 7, 14 et 28 jours (3 éprouvettes par âge de rupture + 3 éprouvettes de réserve). Nombre d'éprouvettes : Mouler et compacter au minimum 12 éprouvettes cylindriques pour cette méthode.

Tableau III-9 Tableau pour la quantité pour 12 éprouvettes

Matériaux	Masse(kg)	Volume moule	Masse pour une éprouvette(kg)	Masse pour 12 éprouvettes(kg)
Ciment	319.77	0.00643072	2.2982	24.67
Eau	237.17	0.00643072	1.525	18.3
Sable	1507.75	0.00643072	9.695	116.34
Gravier	544.40	0.00643072	3.500	42

□ QUANTITES TOTALES POUR LES DEUX FORMULATIONS

Tableau III-10 Tableau pour les quantités de deux méthodes

Matériaux	Masse(kg) pour la méthode de volumes absolus	Masse(kg) pour la méthode de bolomey	Masse totale(kg)
Ciment	24.67	24.67	49.34
Eau	13.2	18.3	31.5
Sable	57.06	116.34	173.4
Gravier	87.10	42	129.1
TOTAL	182.03	201.31	383.34

Nous constatons que la méthode de Bolomey est celle qui donne une grande quantité de particules fines par rapport à la méthode de Volumes Absolus.

3.4 RESULTATS DES AJUSTEMENTS POUR LA GACHE

Cette partie, présente les différentes exigences conditionnées par les matériaux utilisés pendant la confection. Sachant que dans les formulations de Bolomey, nous avons trouvés un rapport C/E de 1,88 impliquant une quantité d'eau de 237.17 l/m³ pour atteindre un affaissement (consistance) de 7 cm ; mais aussi pour les formulations de Volumes Absolus nous avons trouvés une quantité d'eau théorique de 170 l/m³ pour atteindre un affaissement de 7cm

La gâché a exigé quelques ajustements en quantité d'eau pour atteindre la maniabilité désirée. Le tableau III-11 illustre les affaissements obtenus et les quantités d'eau ajoutées pour une gâché de 6 éprouvettes cylindriques de 16×32cm pour chacun de nos bétons d'études.

Tableau III-11 Affaissements pour les différents types de béton

Type de formulation	Type de béton	Eau théorique (l)	Eau ajouté (%)	Affaissement trouvé(cm)
Volumes Absolus	Béton binaire	13.2	26.45	6.8
Bolomey	Béton binaire	18.3	21.85	5.6

3.5 CARACTERISTIQUE A L'ETAT DURCI

Cette section présente les résultats de la masse volumique du béton à l'état durci ainsi que les résistances à la compression mesurées sur des éprouvettes cylindriques de 16 × 32 cm après 3,7 et 28 jours de cure par immersion.

3.5.1 Masse volumique du béton

Le tableau III-12 ci-dessous regroupe les valeurs de la masse volumique du béton à l'état durci mesurées pour l'ensemble des formulations.

Tableau III-12 les masses volumiques absolues du béton

Age	Masse volumique/Volumes Absolus	Masse volumique/Bolomey
7 jours	2.239 g/cm ³	2.1 g/cm ³
14 jours	2.33 g/cm ³	2.18 g/cm ³
28 jours	2.37 g/cm ³	2.21 g/cm ³

Toutes les deux methods nous offrent des betons lourds car leurs masses volumiques absolues est entre & 1,8 et 2,5

3.5.2 Résistance à la compression

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus à l'issue des essais réalisés sur les différents types de béton et selon différentes formulations sur la figure III-4.

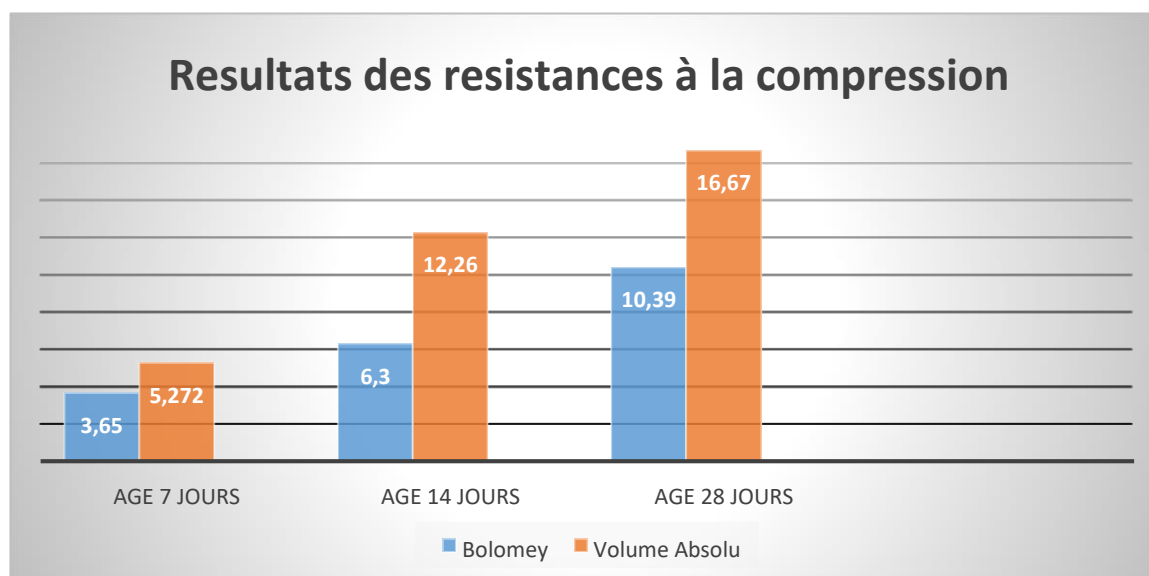


Figure III-4 Résultats des résistances à la compression

La figure III-4 présente les résultats des résistances à la compression de nos différents types de bétons d'étude, à 7 jours, 14jrs et 28 jours, nous remarquons que le [11] résultat de la méthode des volumes absolus a une résistance à la compression plus élevée que celui du béton formulés par Bolomey.

3.6 ETUDE ECONOMIQUE

L'analyse économique se portera uniquement sur le coût de chaque méthode pour un volume de 1m³ du béton.

3.6.1 Méthode des volumes absolus

✓ Détermination du coût pour un dosage de 1m³

La détermination du coût d'investissement pour 1m³ pour la cette méthode est faite dans le tableau III-13

Tableau III-13 Tableau de calcul du coût pour Volumes Absolus

Désignation	Unité	Quantité	P.U (USD)	P.T (USD)
Ciment	kg	319.76	0.5	159.88
Sable	M ₃	0.2829	20	5.658
Gravier Concasse 5/16	M ³	0.4244	15	6.36
Eau	M ³	0.170	16	2.72
Total Matériaux	-	-	-	173.73
Coût main d'œuvre 15%	-	-	-	26.18

Total cout d'investissement	-	-	-	200
--	---	---	---	------------

Nous remarquons par le tableau III-13 que le cout d'investissement d'un mètre cube vaut 200 dollars selon les prix au marché actuel.

3.6.2 Méthode de bolomey

Tableau III-14 : Détermination du cout pour un dosage de 1m³

Désignation	Unité	Quantité	P.U (USD)	P.T (USD)
Ciment	kg	319.76	0.5	159.88
Sable	M ₃	1.507	20	30.14
Gravier Concasse 5/16	M ³	0.5444	15	8.166
Eau	M ³	0.237	16	3.792
Total Matériaux	-	-	-	201.978
Cout main d'œuvre 15%	-	-	-	30.29
Total cout d'investissement	-	-	-	232.27

Nous remarquons par le tableau III-14 que le cout d'investissement d'un mètre cube vaut 232.27 dollars selon les prix au marché actuel.

3.6.3 Comparaison du cout d'investissement pour les deux méthodes

Après une étude économique minutieuse de ces deux méthodes nous observons que la méthode de Bolomey est la plus couteuse avec 232.27\$ le mètre cube, et la méthode des volumes Absolus

est la moins couteuse avec un cout d'investissement de 200 \$ comme nous présente la figure III-5

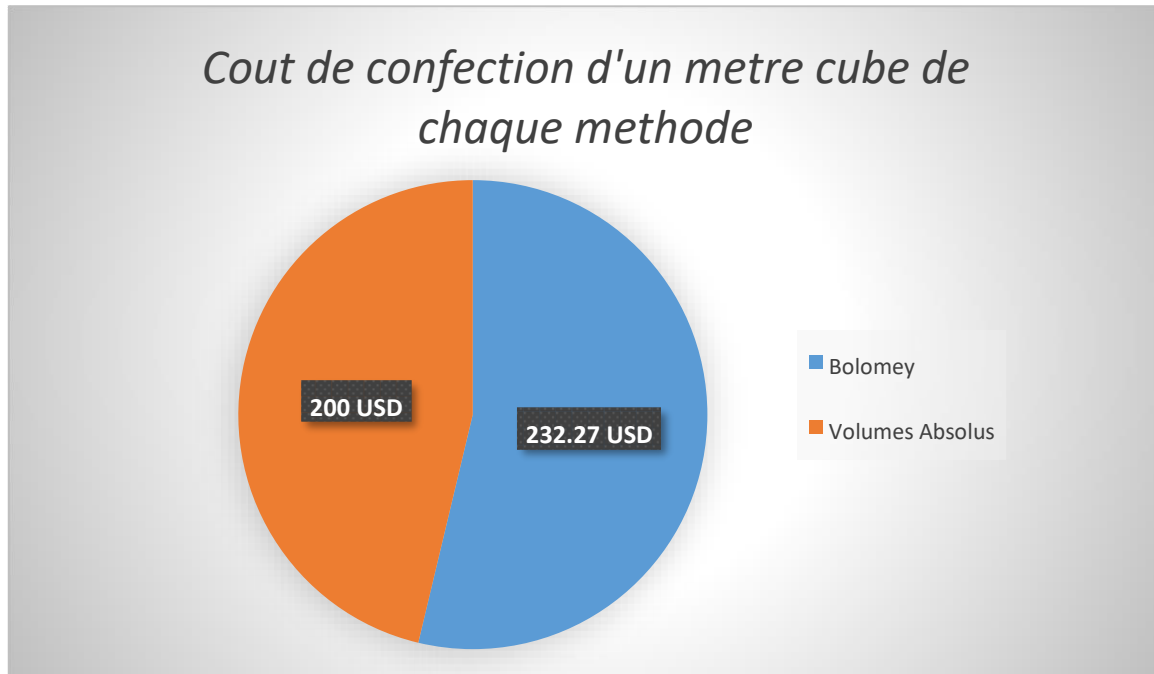


Figure III-5 Cout de confection d'un metre cube de chaque méthode

La méthode des volumes absolus est clairement la meilleure vu sa capacité à atteindre la résistance cible en gardant un moindre cout d'investissement que la méthode de Bolomey

3.7 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre, il a été question de présenter et d'interpréter les résultats obtenus lors des expérimentations au laboratoire, de la caractérisation des matériaux utilisés, l'obtention des proportions optimales du sable, du gravier, du ciment et de l'eau jusqu'à la formulation du béton destinée à la confection des éprouvettes destinées à l'essais de compression.

Enfin l'étude économique nous a permis de faire une comparaison entre le cout d'exécution de la méthode des Volumes Absolus et de la méthode de Bolomey.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de cette étude comparative portant sur la formulation d'un béton binaire, défini comme un béton composé d'un ciment et d'un système granulaire constitué de deux fractions principales (sable et gravier), et visant une résistance cible de 20 MPa, les résultats expérimentaux et l'analyse économique ont permis de dégager des conclusions significatives quant au comportement mécanique et au coût de production de ce type de béton.

Le béton binaire étudié dans ce travail constitue une formulation simplifiée mais couramment utilisée dans les chantiers de construction. Il repose sur un équilibre précis entre le ciment, l'eau et les deux fractions granulaires, ce qui rend la méthode de formulation déterminante pour atteindre les performances mécaniques souhaitées.

Sur le plan de la résistance à la compression à 28 jours, les essais réalisés sur le béton binaire ont montré que :

- La méthode des Volumes Absolus a donné une résistance moyenne de 16,67 MPa ;
- La méthode de Bolomey a donné une résistance moyenne plus faible de 10,39 MPa.

Aucune des deux formulations du béton binaire n'a atteint la résistance cible de 20 MPa. Toutefois, la méthode des Volumes Absolus a présenté une performance mécanique nettement supérieure à celle de la méthode de Bolomey. L'écart important observé avec la méthode de Bolomey traduit une sensibilité plus élevée de cette approche aux paramètres de dosage, ce qui influence directement la résistance finale du béton binaire.

Sur le plan économique, l'analyse des coûts de production d'un mètre cube de béton binaire a révélé que :

- Le coût du béton binaire formulé par la méthode des Volumes Absolus est de 200 USD/m³ ;
- Le coût du béton binaire formulé par la méthode de Bolomey est plus élevé, soit 232,27 USD/m³.

Il ressort donc que la méthode de Bolomey présente un double désavantage dans le cadre de cette étude : une résistance mécanique plus faible (10,39 MPa) et un coût plus élevé (232,27 USD/m³). En comparaison, la méthode des Volumes Absolus permet d'obtenir un béton binaire plus résistant tout en réduisant le coût de production de 32,27 USD par mètre cube.

En définitive, cette recherche démontre que, pour la formulation d'un béton binaire, le choix de la méthode de dosage influence directement la performance mécanique et la rentabilité économique. Bien que la résistance cible de 20 MPa n'ait pas été atteinte, la méthode des Volumes Absolus apparaît comme la plus appropriée dans le cadre de cette étude. Il est recommandé aux futures recherches d'approfondir l'optimisation des paramètres granulaires. Une analyse plus fine de ces variables permettrait d'accroître les performances mécaniques et d'assurer une conformité totale avec les exigences de résistance des ouvrages structuraux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. N. Ghania, «matériaux de construction,» guelma, 2008.
- [2] G. A. Kader, «ETUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTES METHODES DE FORMULATION DU BETON,» Université d'el oued, el oued, 2022.
- [3] M. NOELLA, «EVALUATION DES PROPRIETES DES BETON BINAIRE ET TERNAIRE :APPLICATION AVEC BOLOMEY ET DREUX GORISSE à l'ULPGL Goma,» Goma, 2023.
- [4] G. DREUX, Composition des betons, france.
- [5] M. LY, «ETUDE COMPARATIVE DES BETONS FAITS A PARTIR DES MATERIAUX LES PLUS UTILISES AUX SENEGAL,» SENEGAL, 2011.
- [6] M. M. Ghislain, «ETUDE DES PROPRIETES DES BETONS ORDINAIRES,» ULPGL, Goma, 2024.
- [7] G. DREUX, «composition du beton,» Centre Expérimental de Recherches, FRANCE.
- [8] H. H. M. -. X. JOURDAIN, «Formulation d'un béton ordinaire,» ecole normale superieure paris saclay, paris, 2018.
- [9] 1. N. e. E. 196 – 3, Méthodes d'essai des ciments, partie 3 Détermination du temps de prise et de la stabilité, AFNOR Tome 3,, 1995.
- [10] G. Dreux & J. Festa, Nouveau guide du béton et ses constituants., Eyrolles, 8ème édition,1998.
- [11] M. GRACE, « Cours de physique et technologie du béton, GOMA: ULPGL,,» Goma, 2023-2024.
- [12] ,. NF P 18 - 555, Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau du sable, Paris: Editions Afnor, 1990..
- [13] NF P 18 554, Granulats Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, 1990.

- [14] x. AFNOR.NF EN 933-8, Essais pour la détermination des caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8, 2012.
- [15] A. W. MUHINDO, *Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et des différents ciments de la ville de Goma*, Goma: FSTA/ ULPGL, 2017.
- [16] NF P 18-406, Essai de compression des éprouvettes en béton durci, Paris : Afnor,, 1981..

ANNEXES

**ETUDE COMPARATIVE DE MÉTHODE DE FORMULATION DU BÉTON : CAS DE LA MÉTHODE
DES VOLUMES ABSOLUS ET DE BOLOMEY**

ANNEXE 1 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE POUR GRAVIER CONCASSE 5/16 ET SABLE ROULE 0/5

OUVERTURE TAMIS (mm)	REFUS PARTIEL	REFUS CUMILES	RF CUM	Tamisat Sable (%)	T.G. 5/16(%)
0,08	58	2958	98,6	1,4	0
0,1	54	2900	96,66666667	3,333333333	0
0,125	116	2846	94,86666667	5,133333333	0
0,16	137	2730	91	9	0
0,2	243	2593	86,43333333	13,56666667	0
0,25	251	2350	78,33333333	21,66666667	0
0,315	199	2099	69,96666667	30,03333333	0
0,4	172	1900	63,33333333	36,66666667	0
0,5	187	1728	57,6	42,4	0
0,63	254	1541	51,36666667	48,63333333	0
0,8	209	1287	42,9	57,1	0
1	177	1078	35,93333333	64,06666667	0
1,25	136	901	30,03333333	69,96666667	0
1,6	128	765	25,5	74,5	0
2	86	637	21,23333333	78,76666667	0
2,5	96	551	18,36666667	81,63333333	0
3,15	88	455	15,16666667	84,83333333	3,7
4	72	367	12,23333333	87,76666667	10,1
5	71	295	9,833333333	90,16666667	29,7
6,3	224	224	7,466666667	92,53333333	47,5
8				100	67,03
10					85,56
12,5					96,5
16					99,23
20		2,705666667			99,56
25					100
31,5					100
40					100
0					100
63					100
80					100

ANNEXE 2 : MASSE VOLUMIQUE APPARENTE GRAVIER

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DU GRAVIER 5/16			
volume du moule(cm3)	944,92		
masse moule(g)	4355		
masse moule+echant(g)	5398	5435	5427
masse echantillon(g)	1043	1080	1072
masse volumique app	1,10379715	1,1429539	1,13448758
masse vol app moyenne	1,128		

ANNEXE 3 : MASSE VOLUMIQUE ABSOLU GRAVIER

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE 5/16			
masse de l'echantillon(g)	220	216	210
volume initial (ml)	350	340	300
volume final (ml)	438	420	380
masse volumique abso	2,5	2,7	2,625
masse vol abso moyenne	2,609		

ANNEXE 4 : EQUIVALENT SABLE

EQUIVALENT DE SABLE /Norme EN 933-8				
LIBELLE	EPROUVETTE 1		EPROUVETTE 2	
	H1	H2	H1	H2
Lect regle	9,6	10,5	9,1	9,7
lecyt piston	8,61	10,5	8,9	9,7
ES regle	91,43		93,81	
ES piston	82		91,75	
ES Moy (%)	89,7			

ANNEXE 5 : MASSE VOLUMIQUE APPARENTE SABLE

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE SABLE			
volume du moule(cm3)	955,55		
masse moule(g)	4354		
masse moule+echant(g)	5227	5221	5238
masse echantillon(g)	1400	1530	1389
masse volumique app	1,4651248	1,6011721	1,4536131
masse vol app moyenne	1,507		

ANNEXE 6 : MASSE VOLUMIQUE ABSOLU SABLE

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU SABLE			
masse de l'echantillon(g)	240	301	300
volume initial (ml)	470	538	480
volume final (ml)	540	670	610
masse volumique abso	3,42857143	2,28030303	2,30769231
masse vol abso moyenne	2,673		

ANNEXE 7 : ESSAIS LOS ANGELES

ESSAI LOS ANGELES	
masse echantillon (P)	5000
masse refus 1,6	3472
masse passant 1,6 (p)	1528
CLA(%)	30,56

ANNEXE 8 : TAUX D'ABSORPTION

TAUX D'ABSORPTION D'EAU/24h		
poids sec (g)	500	
poids hum(g)	512	
poids eau(g)	12	
ABS%	2,4	

ANNEXE 9 : MODULE DE FINESSE

MODULE DE FINESSE SABLE							
TAMIS	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5	
% refus cum	91	69,96	51,36	30,03	18,33	12,23	
MF	2,7291						

ANNEXE 10 : TABLEAU DE RESISTANCE A COMPRESSION A 7 JOURS

Type de béton	Eprouvettes	Masse (Kg)	Force appliquée (KN)	Résistance R_{cj} à 7 jours (MPa)	
				R_{cj} éprouvette	R_{cj} moyenne
Béton binaire de Volumes Absolus	Eprouvette 1	14,455	108,485	5,396	5,272
	Eprouvette 2	14,272	96,788	4,81	
	Eprouvette 3	14,530	112,8	5,61	
Béton binaire de Bolomey	Eprouvette 1	14,2	59,1	2,98	3,65
	Eprouvette 2	13,95	76,36	3,79	
	Eprouvette 3	13,96	84,75	4,2	

ANNEXE 11 : TABLEAU DE RESISTANCE A COMPRESSION A 14 JOURS

Type de béton	Eprouvettes	Masse (Kg)	Force appliquée (KN)	Résistance R_{cj} à 14 jours (MPa)	
				R_{cj} éprouvette	R_{cj} moyenne
Béton binaire de Volumes Absolus	Eprouvette 1	15,02	215,94	11,7	12,26
	Eprouvette 2	15,07	249,536	12,38	
	Eprouvette 3	14,87	255,7	12,71	
Béton binaire Bolomey	Eprouvette 1	14,28	142,67	7,1	6,3
	Eprouvette 2	13,89	105,465	5,24	
	Eprouvette 3	13,94	132	6,56	

ANNEXE 11 : TABLEAU DE RESISTANCE A COMPRESSION A 28 JOURS

Type de béton	Eprouvettes	Masse (Kg)	Force appliquée (KN)	Résistance R_{cj} 28 jours (MPa)	
				R_{cj} éprouvette	R_{cj} moyenne
Béton binaire de Volumes Absolus	Eprouvette 1	15,32	332,94	16,7	16,67
	Eprouvette 2	15,47	350,536	17,10	
	Eprouvette 3	14,94	315,7	16,21	
Béton binaire Bolomey	Eprouvette 1	14,5	201,67	11,18	10,39
	Eprouvette 2	14,02	195,38	9,72	
	Eprouvette 3	14,21	206,32	10,27	

DES VOLUMES ABSOLUS ET DE BOLOMEY
**ETUDE COMPARATIVE DE MÉTHODE DE FORMULATION DU BÉTON : CAS DE LA MÉTHODE
DES VOLUMES ABSOLUS ET DE BOLOMEY**
