

UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**FACULTÉ DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUÉES**

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION DU SQUELETTE
GRANULAIRE SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON :
Application à un béton ordinaire**

Par : **BENGI-BABUYA BWIRIRE Ines**

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme d'ingénieur Civil en Génie Civil.

Option : Structures et ouvrages d'art

Directeur : Prof. Dr. Ing. BARAKA MUSHAGE Olivier

Encadreur : Ing. BAHATI KHASHI Yvan

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024

Épigraphe

« Un bon mélange des granulats est comme un bon orchestre : chaque élément doit jouer sa partition pour créer une symphonie »

Michel Aïtcin

Dédicace

À nos chers parents Maurice BWIRIRE et Francesca FÉRUZI, dont l'amour et le soutien indéfectibles ont été les fondations de notre parcours.

BENGI-BABUYA BWIRIRE Ines

Remerciements

Notre gratitude en premier lieu, s'adresse à Dieu, Maître des temps et des circonstances, pour ce travail et tous les bienfaits qu'il nous accorde gratuitement.

Nos remerciements s'adressent deuxièmement au Professeur BARAKA MUSHAGE Olivier, qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a pris le temps de diriger ce travail. De plus, nous lui sommes reconnaissant pour son cours d'initiation à la recherche Scientifique, qui a joué un rôle crucial dans l'élaboration de ce travail.

À notre encadreur, l'ingénieur BAHATI KAHASHI Yvan, pour ses orientations précieuses et son accompagnement constant malgré ses occupations. Ses remarques constructives ont grandement enrichi ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à l'ULPGL/Goma, qui par l'intermédiaire de la FSTA, de ses autorités et de son personnel académique et administratif, a mis à notre disposition les ressources et l'environnement propices à notre apprentissage tout au long de nos 6 années de formation.

À nos chers parents, Maurice BWIRIRE et Francesca FÉRUZI, pour tous les sacrifices consentis durant nos études ainsi qu'à toute la famille pour le soutien moral et les encouragements.

Nos remerciements s'adressent aussi à nos amis et camarades qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont soutenu et accompagné dans la réalisation de ce travail.

BENGI-BABUYA BWIRIRE Ines

iii

***Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines***

Résumé

Le présent travail évalue l'influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton ordinaire, avec comme but la détermination de la distribution du squelette granulaire qui donnerait un béton avec de bonnes propriétés de résistance, d'ouvrabilité et un coût de production raisonnable. Il a donc été question d'étudier les matériaux entrant dans la composition des bétons et de procéder à la formulation de ces bétons par la méthode de Dreux – Gorisse. Nous avons ainsi fixé les trois paramètres suivants : fraction volumique de granulats, diamètre maximal des granulats « $D_{max}=25\text{mm}$ » et la résistance visée à la compression (20 MPa) ; et avons testé six bétons de distributions granulaires différentes : B20-C1, B20-D1, B20-D2, B20-D3, B20-D4 et B20-C2. Nous avons remarqué que les granulats ternaires qui constituent les bétons BD20-3 et BD20-4, utilisent une grande quantité de gros granulats (8/15 et 15/25). Cela augmente la densité, respectivement 2,3048 et 2,3004 ; et par conséquent améliore sa résistance à la compression (19,87 MPa et 17,83 MPa). En revanche, le mélange quaternaire des granulats constituant le béton BC20-1, avec une densité inférieure de 2,285, présente des effets de seuil où certaines tailles de granulats ne sont pas optimisées, créant des zones de faiblesse et augmentant le risque de ségrégation des particules fines et grossières, ce qui peut entraîner une distribution inégale des granulats et affecter la résistance, nous donnant ainsi une résistance de 13,065MPa à 28 jours, soit 65,32% de la résistance escompté.

Mots clés : Influence, Distribution, Squelette granulaire, Propriétés du béton, Béton Ordinaire.

Abstract

The present work evaluates the influence of granular skeleton distribution on the properties of ordinary concrete, with the aim of determining the granular skeleton distribution that would yield concrete with good strength properties, workability, and reasonable production cost. Therefore, it was necessary to study the materials used in the composition of concrete and to proceed with the formulation of these concretes using the Dreux-Gorisse method. We thus fixed the following three parameters: aggregate volume fraction, maximum aggregate diameter “ $D_{max}=25\text{mm}$ ”, and the target compressive strength (20 MPa); and tested six concretes with different granular distributions: B20-C1, B20-D1, B20-D2, B20-D3, B20-D4, and B20-C2. We observed that the ternary aggregates constituting concretes BD20-3 and BD20-4 use a large quantity of coarse aggregates (8/15 and 15/25). This increases the density, respectively 2.3048 and 2.3004; and consequently improves its compressive strength (19.87 MPa and 17.83 MPa). On the other hand, the quaternary aggregate mix constituting concrete BC20-1, with a lower density of 2.285, presents threshold effects where certain aggregate sizes are not optimized, creating zones of weakness and increasing the risk of segregation of fine and coarse particles, which can lead to an uneven distribution of aggregates and affect the strength, thus giving us a strength of 13.065 MPa at 28 days, or 65.32% of the expected strength.

Keywords: Influence, Distribution, Granular Skeleton, Concrete Properties, Ordinary Concrete.

Table des matières

Épigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières	vi
Liste des abréviations.....	x
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
Liste des annexes	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 1 GÉNÉRALITÉS SUR LE BÉTON	5
1.1 INTRODUCTION.....	5
1.2 CONSTITUANTS DU BÉTON	5
1.2.1 Le ciment	5
1.2.2 Les granulats	10
1.2.3 L'eau de gâchage	14
1.2.4 Les adjuvants	14
1.3 TYPOLOGIE DES BÉTONS [3].....	15
1.3.1 Le béton ordinaire	15
1.3.2 Le béton précontraint	15
1.3.3 Le béton auto plaçant	15

vi

Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :

application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines

1.3.4	Le béton à haute performance	16
1.3.5	Le béton à très haute performance	16
1.4	CLASSIFICATION DES BÉTONS	16
1.4.1	Classification des bétons selon la masse volumique.....	16
1.4.2	Classification des bétons selon leur résistance [11].....	17
1.4.3	Classification des bétons selon la destination [7]	17
1.4.4	Classification des bétons selon le genre de liant utilisé [11]	17
1.5	MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS	18
1.5.1	La méthode de DREUX-GORISSE [3]	18
1.5.2	La méthode de BOLOMEY [13]	19
1.5.3	La méthode de FULLER-THOMPSON [14].....	19
1.5.4	La méthode de FAURY [15].....	19
1.5.5	La méthode de BARON-OLIVIER [16].....	20
1.6	PROPRIÉTÉS DU BÉTON	20
1.6.1	Les propriétés du béton frais.....	21
1.6.2	Les propriétés du béton durci [7]	21
1.7	DISTRIBUTION DU SQUELETTE GRANULAIRE ET PROPRIÉTÉS FINALES DU BÉTON	22
1.7.1	Influence sur l'ouvrabilité du béton.....	22
1.7.2	Influence sur la résistance mécanique.....	23
1.7.3	Influence sur la durabilité	24
1.8	PATHOLOGIE DES BÉTONS	25
1.8.1	Le ressuage.....	25
1.8.2	La ségrégation.....	25
1.8.3	La carbonatation.....	25
1.8.4	La fatigue	26
1.8.5	Les attaques sulfatiques	26
1.8.6	Attaques acides	26

1.9	DOMAINES D'UTILISATION DU BÉTON	27
1.9.1	Le béton dans le bâtiment	27
1.9.2	Le béton dans les travaux publics	27
1.10	CONCLUSION PARTIELLE	28
Chapitre 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE		29
2.1	INTRODUCTION.....	29
2.2	NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS	29
2.2.1	Le ciment	29
2.2.2	Les granulats	29
2.2.3	L'eau de gâchage	30
2.3	CARACTÉRISATION DES CONSTITUANTS.....	30
2.3.1	Échantillonnage.....	30
2.3.2	Analyse granulométrique	31
2.3.3	Le degré de propreté du sable	33
2.3.4	Masse volumique absolue	35
2.3.5	Masse volumique apparente.....	36
2.3.6	Essai Los Angeles	37
2.3.7	L'absorption d'eau	39
2.4	FORMULATION DU BÉTON.....	39
2.4.1	Choix et justification de la méthode	40
2.4.2	Méthode de DREUX GORISSE	40
2.5	CARACTÉRISATION DES BÉTONS	48
2.5.1	Essai sur le béton frais	49
2.5.2	Essais sur le béton durci.....	50
2.6	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	51
2.7	CONCLUSION PARTIELLE.....	53
Chapitre 3 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....		54

3.1	INTRODUCTION.....	54
3.2	CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS	54
3.2.1	L'analyse granulométrique	54
3.2.2	Module de finesse	56
3.2.3	Degré de propreté du sable	56
3.2.4	Masses volumiques des granulats	57
3.2.5	Essai Los Angeles	57
3.2.6	L'absorption d'eau des graviers.....	57
3.3	RÉSULTATS DE LA FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE.....	57
3.3.1	Données de base.....	58
3.3.2	Calcul des dosages en divers éléments	58
3.3.3	Dosage en granulats	58
3.3.4	Distribution du squelette granulaire.....	60
3.3.5	Récapitulatif des résultats de la formulation.....	61
3.4	CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS D'ÉTUDE	63
3.4.1	Caractéristique des bétons à l'état frais	63
3.4.2	Caractéristiques des bétons à l'état durci.....	64
3.5	ÉVALUATION ÉCONOMIQUE.....	66
3.6	CONCLUSION PARTIELLE.....	67
	CONCLUSION GÉNÉRALE	68
	BIBLIOGRAPHIE.....	70

Liste des abréviations

BAP	: Béton Auto Plaçant
BHP	: Béton à Haute Performance
BO	: Béton Ordinaire
BTHP	: Béton à Très Haute Performance
C	: Dosage en Ciment
CHF	: Ciment de Haut Fourneau
Cla	: Coefficient de Los Angeles
CLC	: Ciment au Laitier et aux Cendres
CPA	: Ciment Portland Artificiel
CPJ	: Ciment Portland Composé
CPZ	: Ciment Pouzzolanique
E	: Dosage en Eau
ES	: Équivalent de Sable
FSTA	: Faculté des sciences et technologies appliquées
G	: Dosage en Gravier
Mf	: Module de finesse
NF EN	: Norme Française – Norme Européenne
Rcj	: Résistance à la compression à j jour
S	: Dosage en Sable
ULPGL	: Université Libre des Pays des Grands Lacs

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1 spécification mécaniques et physiques des ciments [2].....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1-2 différents types de ciments courants normalisés avec indication [3].....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1-3 Classification des bétons selon la masse volumique [7]</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 1-4 Classes des bétons selon la résistance [7].....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 1-5 Classes des bétons suivant l'affaissement au cône d'Abrams [7]</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 2-1 Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [7].....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 2-2 Classification des granulats suivant la masse volumique [7]</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 2-3 Types de graviers selon le coefficient LA [7]</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 2-4 Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G [3].....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 2-5 Correction sur le dosage en eau en fonction de Dmax [3].....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 2-6 Teneur en eau approximative des granulats courants en litres pour un metre cube de materiau (en volume apparent) [3]</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 2-7 Valeurs du terme correcteur K [3]</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 2-8 Valeurs du coefficient de compacité [7]</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 2-9 Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône [3]</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 3-1 Valeurs des masses volumiques des granulats</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 3-2 Données de base</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 3-3 Dosage en ciment et en eau</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 3-4 Coordonnées de la courbe de référence OAB</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 3-5 Dosages massiques des granulats</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3-6 Dosages définitifs en divers constituants des bétons.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3-7 Valeurs d'affaissement obtenues pour les bétons étudiés</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 3-8 Les coûts de production de chaque béton étudié.....</i>	<i>66</i>

Liste des figures

<i>Figure 2-1</i> Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [3]	42
<i>Figure 2-2</i> Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S en fonction de l'affaissement [3].....	43
<i>Figure 3-1</i> Courbes granulométriques du béton quaternaire.....	55
<i>Figure 3-2</i> Courbes granulométriques du béton binaire	56
<i>Figure 3-3</i> Répartition des granulats du béton quaternaire.....	59
<i>Figure 3-4</i> Répartition des granulats du béton quaternaire	60
<i>Figure 3-5</i> Densités obtenues pour les bétons durcis	64
<i>Figure 3-6</i> Résistances en compression des bétons en étude	65

Liste des annexes

<i>Annexe A ESSAIS SUR LES GRANULATS</i>	74
A.1 COMPOSITIONS GRANULOMÉTRIQUES.....	74
A.1.1 Sable 0/4.....	74
A.1.2 Gravier 4/8.....	74
A.1.3 Gravier 8/15.....	75
A.1.4 Gravier 15/25.....	75
A.1.5 Gravier 4/25.....	76
A.2 MASSES VOLUMIQUES.....	76
A.2.1 Masses volumiques absolues.....	76
A.2.2 Masses volumiques relatives.....	77
A.3 ÉQUIVALENT DE SABLE.....	77
<i>Annexe B ESSAIS SUR LES BÉTONS DURCIS</i>	78
B.1 DENSITÉ.....	78
B.2 RÉSISTANCE EN COMPRESSION.....	78
B.2.1 Béton quaternaire BC20-1.....	79
B.2.2 Béton ternaire BD20-1.....	79
B.2.3 Béton ternaire BD20-2.....	80
B.2.4 Béton ternaire BD20-3.....	80
B.2.5 Béton ternaire BD20-4.....	80
B.2.6 Béton binaire BC20-2.....	81

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La République Démocratique du Congo, par ses diverses ressources, est considérée comme un pays émergent surtout dans le domaine de construction [1]. Différents projets entrepris à travers le pays, notamment le développement de diverses infrastructures en font largement témoignage. Des bâtiments de tout usage, aux barrages, en passant par les routes, les ponts, ... toutes ces constructions font le plus souvent recours au matériau **béton** qui ne cesse de marquer l'histoire du génie civil à travers le monde [1]. Le béton est actuellement le matériau de construction le plus utilisé et le plus connu, en raison du faible coût de sa production, de sa facilité de mise en œuvre, de la disponibilité de ses constituants, de ses performances mécaniques et de la durabilité qu'il assure [2].

Le béton est un matériau composite obtenu grâce au durcissement d'un mélange de liant, généralement le ciment ; d'eau, de granulats et éventuellement des adjuvants choisis de façon rationnelle. Ses caractéristiques et ses propriétés sont fonction de ses différents constituants [3]. D'où l'importance d'une bonne répartition des grains selon leur grosseur présentée par la granularité qui est la distribution dimensionnelle d'un granulat. La distribution du squelette granulaire dans le béton joue un rôle crucial dans ses propriétés mécaniques, physiques et sa durabilité. Le squelette granulaire est constitué de granulats, qui peuvent être classés en granulats fins (sable) et granulats grossiers (graviers). La manière dont ces granulats sont disposés et leur taille relative influencent directement des caractéristiques telles que la résistance à la compression, la perméabilité, la durabilité et le retrait.

Plusieurs travaux ont été fait dans le même contexte, dont celui présenté par **Amar Boukais** et **Zohra Dahou** portant sur *l'effet du squelette granulaire sur le développement de la FPZ dans le béton*. Ils ont constaté que, pour une résistance constante du béton à la compression (25 MPa), la présence de la discontinuité au niveau du squelette granulaire a un effet significatif sur le processus de rupture dans le béton, elle contribue à une augmentation de la taille de la zone d'élaboration de la rupture (FPZ) [4]. **Fatiha Boumaza-Zeraoulia** et **Mourad Behim**, dans leur travail sur *l'optimisation du squelette granulaire par la méthode de Dreux-Gorisse pour la formulation des bétons auto-plaçant*, ont remarqué que la composition du squelette granulaire par la méthode

graphique de Dreux - Gorisse est applicable par le choix des fractions granulaires et leurs analyses granulométriques permettent de mettre en évidence les classes manquantes. Un squelette granulaire optimisé garantit par une continuité des courbes granulométriques des différents granulats (sables et gros granulats) donne des résultats encourageants quant à la résistance du BAP [5].

Pour ce qui est de notre travail, il fait objet de l'étude de l'influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton ordinaire (BO). Il vise à déterminer quelle distribution du squelette granulaire donne un béton dont les propriétés avoisineraient le plus celles d'un BO idéal tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Bien que les normes et réglementations en vigueur sur la formulation du béton soient connues par les professionnels du domaine de construction en RDC, il s'observe une certaine négligence dans leurs mises en application sur terrain, en l'occurrence concernant le respect de la distribution du squelette granulaire. Lors de la formulation et la confection du béton le non-respect de la répartition du squelette granulaire peut entraîner une baisse de la résistance des bétons et cela implique directement l'instabilité des éléments structuraux face aux différentes sollicitations. Pour une zone sismique comme le rift Est africain par exemple, des désordres peuvent s'observer lors des séismes suite à cette baisse de résistance, des zones de concentration de contraintes, des vides, ou de faiblesse pouvant affecter négativement les propriétés mécaniques du béton. Une mauvaise distribution du squelette granulaire favorise également une ségrégation des matériaux, compromettant l'adhérence entre les composants et réduisant la résistance du béton. Elle peut aussi entraîner une élévation du coût des constituants du béton, plus particulièrement celui du ciment. La distribution du squelette granulaire est alors au centre de notre problématique, étant donné que notre pays, qui est en pleine construction, consomme un tonnage important de béton.

Eu égard à ce qui précède, notre intérêt à cette thématique s'articule autour de 3 questions :

1. Comment la distribution du squelette granulaire affecte-t-elle la résistance à la compression du béton ?

2

***Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines***

2. Comment modifier cette distribution afin de répondre à des exigences spécifiques concernant la résistance, la durabilité ou l'ouvrabilité du béton ordinaire ?
3. Quelles sont les implications économiques de l'optimisation de cette distribution en termes de coût de production du béton ?

Aux 3 questions ci-haut énoncées, les réponses anticipatives suivantes sont envisagées :

1. La non homogénéité de la distribution du squelette granulaire affecterait négativement la résistance à la compression du béton ;
2. Les essais expérimentaux en laboratoire permettraient de présenter la distribution du squelette granulaire répondant aux exigences spécifiques d'un béton ordinaire de haute qualité ;
3. Une distribution du squelette granulaire continue et homogène favoriserait la réduction du coût de production du béton.

La distribution des granulats, à savoir le sable et les graviers, dans le mélange du béton joue un rôle crucial sur les propriétés et les performances finales de celui-ci. Les granulats, appelés matériaux inertes, constituent l'ossature du béton et représentent 60 à 80% de son poids, lui conférant ainsi l'essentiel de sa résistance mécanique [2].

Cette distribution constitue une contrainte à laquelle les ingénieurs de la ville de Goma se heurtent lorsqu'il faut effectuer la confection du béton. Le présent travail, portant sur ***l'influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton*** revêt une importance capitale car le squelette granulaire joue un rôle majeur dans les propriétés finales du béton.

Les résultats de notre recherche auront des avantages significatifs scientifiquement : l'étude explore comment la taille et la distribution des granulats affectent la résistance et la durabilité du béton ; professionnellement : les résultats guident dans le choix optimal des granulats pour obtenir des propriétés spécifiques du béton (ouvrabilité, résistance, durabilité, etc.), ces conclusions peuvent influencer les normes et les pratiques professionnelles concernant l'utilisation des granulats dans le domaine de la construction ; et économiquement : utiliser des granulats

appropriés permet de réduire les coûts de production du béton ; des granulats bien distribués contribuent à la durabilité des structures, réduisant ainsi les coûts de maintenance à long terme.

Dans ce travail, nous poursuivons l'objectif général de déterminer l'influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés finales du béton, tout en recherchant un béton avec des bonnes propriétés de résistance, de durabilité et d'ouvrabilité.

En vue d'atteindre l'objectif général, nous poursuivons les objectifs spécifiques suivant :

- Caractériser les différents matériaux nécessaires dans la formulation du béton ;
- Par la méthode de Dreux Gorisse, formuler respectivement un béton quaternaire, les bétons ternaires et binaire ;
- Par différents essais, déterminer les propriétés des bétons formulés ;
- Analyser et comparer les propriétés des bétons obtenus à l'état frais et à l'état durcis après formulation ;
- Déterminer quelle distribution du squelette granulaire donne un béton dont les propriétés avoisinent celles d'un béton ordinaire idéal.

Afin d'accéder à ces objectifs, des essais sur le sable moyen d'Idjwi, le ciment CIMERWA et les graviers concassés ont été effectués. Ainsi il a été nécessaire d'utiliser les méthodes et techniques suivantes :

- La méthode analytique ;
- La méthode expérimentale ;
- Techniques analytiques et statistiques.

Mises à part l'introduction générale et la conclusion générale, le présent travail est subdivisé en 3 chapitres : Le premier chapitre expose les généralités sur le béton ; le second chapitre présente les matériaux et la méthodologie de recherche ; et enfin le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 1

GÉNÉRALITÉS SUR LE BÉTON

1.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau composite aggloméré issu du mélange du ciment, de l'eau, du sable, des graviers et éventuellement des adjuvants et additifs. Il se distingue par sa résistance à la compression, ce qui en fait un choix privilégié pour les structures telles que les bâtiments, les ponts, les routes et les barrages. Réputé par sa polyvalence, sa durabilité et sa capacité à s'adapter à une grande variété d'applications ; le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés au monde [6].

Le présent chapitre traite des généralités sur le béton en présentant notamment ses constituants, les différents types des bétons, la classification des bétons, les méthodes de formulation des bétons, leurs propriétés, la distribution du squelette granulaire et les propriétés finales du béton, la pathologie du béton ainsi que les domaines d'utilisation du béton.

1.2 CONSTITUANTS DU BÉTON

Le béton doit ses caractéristiques à ses différents constituants. Dans cette section, nous présentons les différents constituants du béton notamment : le ciment, les granulats, l'eau et les adjuvants.

1.2.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou à l'eau [7]. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, dont les silicates de calcium (2CaO SiO_2) et les aluminates de calcium ($2\text{CaO Al}_2\text{O}_3$). La proportion de chaux (CaO) et de silice réactive (SiO_2) devant être au moins de 50% de la masse du ciment [3].

C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. Le choix du type de ciment et de son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature d'autres composants (granulométrie des granulats) [1]. Le dosage du ciment est dépendant de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés, etc.

1.2.1.1 Les constituants du ciment

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker, auquel peut être ajouté, suivant leur type du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés ou des fumées de silice dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions environnementales, soit pour des raisons de performances mécaniques [3].

a. Le clinker portland (K)

Le clinker est un produit obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) du mélange calcaire + argile. Dosé et homogénéisé, et comprenant principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des « Portland » et confère aux ciments de ce groupe leurs propriétés caractéristiques [3].

Les quatre principaux constituants du clinker sont :

- Le silicate tricalcique (50 à 70%) : 3CaO SiO_2 (ou C₃S) ;
- Le silicate bi-calcique (5 à 25%) : 2CaO SiO_2 (ou C₂S) ;
- L'aluminate tricalcique (2 à 12 %) : $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ (ou C₃A) ;
- L'alumino-ferrite tétra calcique (0 à 15%) : $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ou C₄AF).

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases. C'est ainsi qu'un ciment contenant 60% de C₃S et au moins 10% de C₃A présentera de fortes résistances initiales et pourra être avantageusement utilisé en temps froid, alors qu'un ciment

contenant au moins 40% de C_3S et dont le pourcentage de C_3A n'excède pas 5%, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé en temps chaud [3].

b. Le laitier granulé de haut-fourneau (S)

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation (dessèchement) [8].

c. Les cendres volantes (V et W)

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être [3]:

- Siliceuses (V), auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est à dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation :
- Ou calciques (W), auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes siliceuses (V) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 % [3].

d. Les pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer [3].

e. Schistes calcinés (T)

Ces produits sont obtenus à des températures de l'ordre de 800°C. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils présentent des propriétés pouzzolaniques mais aussi hydrauliques [7].

f. Les calcaires (L)

Les calcaires sont utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, lorsqu'ils représentent plus de 5% de la masse totale du ciment [7]. Ils présentent en effet, une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75% en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit au plus de 1,20 g pour 100 g et une teneur en matières organiques (TOC) au plus égale à 0,5% [3].

g. Les fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment. Ayant un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, elles présentent des propriétés pouzzolaniques dues à leur forte teneur en silice amorphe [8]. Puisqu'elles sont très fines, les fumées de silice complètent aussi la granulométrie des ciments. Il en résulte une forte augmentation de la compacité d'une part et une amélioration des résistances mécaniques d'autre part du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Elles doivent contenir au moins 85% de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes [3].

1.2.1.2 Types de ciments courants

a. Types de ciments selon leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; 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 et classe 52,5 [2]. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du *Tableau 1-1*.

Tableau 1-1 spécification mécaniques et physiques des ciments [2]

Classe	Résistance à la compression (Mpa)				Retrait à 28 jours (µm/m)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	≥ 13,5	-					
42,5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	
42,5R	≥ 20	-					
52	≥ 20	-	≥ 52.5	-	-		
52,5R	≥ 30	-					

b. Types de ciments selon leurs constituants

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ajoutés ou non au clinker lors de la fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le **Tableau 1-2** reprend la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu’ils contiennent [3].

Tableau 1-2 différents types de ciments courants normalisés avec indication [3]

Désignations	Type de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l’un des constituants suivants : Laitier-pouzzolanes- cendres-calcaires-schistes- fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5%

CPJ-CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94%	-De 6 à 20% de l'un quelconque constituant, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*) ;	0 à 5%
CPJ-CEM II/B		65 à 79%	-De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5%
CHF-CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64%	-36 à 65% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CHF-CEM III/B		20 à 34%	-66 à 80% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CLK-CEM III/C		5 à 19%	- 81 à 95% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	-10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10% ;	0 à 5%
CPZ-CEM IV/B		45 à 64%	-36 à 55% comme ci-dessus.	0 à 5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	-18 à 30% de laitier de haut fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
CLC-CEM V/B		20 à 39%	-31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5%

(*) Le pourcentage de filler est limité à 5%.

1.2.2 Les granulats

Les granulats, mélange de sable et de graviers, constituent la phase inerte du béton. Leur rôle dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. Ils contribuent à l'amélioration de la compacité, de l'homogénéité, de l'ouvrabilité et de la résistance du béton [2]. Leur choix doit être

judicieux et doit s'orienter vers des granulats durs, propres, de granulométrie continue, chimiquement inerte, et ne contenant pas certaines impuretés. Pour la formulation du béton, deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- La proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S ;
- La granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

1.2.2.1 La granularité

La granularité des granulats concerne la distribution dimensionnelle des grains. Normalement, la courbe granulométrique des granulats doit être continue en sorte que les petits grains puissent bien remplir les vides créés par les grains ayant une taille plus grande. Par ailleurs, un rapport optimal de Gravillon/Sable permet d'obtenir une meilleure compacité des granulats [2].

1.2.2.2 Classification des granulats selon la provenance

On appelle granulat un ensemble de grains d'origine minérale, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, provenant de roches meubles, massives, de minerais ou de leurs transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie [7].

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine et artificiels dans les autres cas.

En fonction de leur provenance, on distingue :

a. Les granulats naturels [7]

Les granulats naturels sont faits des granulats roulés et des granulats concassés.

- **Les granulats roulés** : ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes. Ils se caractérisent par leur aspect de grains arrondis et polis. Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature : Les granulats de rivière, les granulats de mer, les granulats de dunes.

- **Les granulats concassés :** Ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives. Les granulats concassés nécessitent un dépoussiérage pour éliminer les fines particules inférieures à 0,08 mm nuisibles à la résistance des bétons.

b. Les granulats artificiels et spéciaux [9]

Les granulats artificiels et spéciaux proviennent soit des sous-produits industriels, soit des fabrications spéciales en usine, soit des minéraux dont l'emploi est réservé à usage spécial.

- **Les granulats de laitier :** Le laitier de haut fourneau qui s'est refroidi lentement est proche d'une roche artificielle cristallisée. Il est ensuite traité comme les granulats concassés pour au final générer des granulats de laitier.
- **Les Granulats légers :** ce sont généralement les argiles ainsi que les polystyrènes expansés, la vermiculite fabriquée avec certains micas et la perlite issue des laves volcaniques. Ils sont appelés granulats légers à cause de leur masse volumique inférieure à celle des granulats naturels.
- **Les granulats spéciaux :** servent à la fabrication des bétons spéciaux tels que les bétons réfractaires (chromite, corindon, etc.) ainsi que les revêtements des sols des bâtiments industriels (limonite, magnétite, fonte en paillettes, corindon, hématite, etc.).

c. Les granulats recyclés

Les granulats sont dits recyclés lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés.

1.2.2.3 Classification selon la masse volumique

Les granulats sont dits légers lorsque leur masse volumique réelle (ρ_r) est inférieure à 2g/cm^3 , courants si ρ_r est comprise entre 2 g/cm^3 et 3 g/cm^3 et lourds au-delà de 3 g/cm^3 . Les granulats les plus utilisés dans les bâtiments et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 g/cm^3 et 3 g/cm^3 [7].

1.2.2.4 Classification selon la grosseur

Selon leurs dimensions extrêmes d et D on distingue cinq classes granulaires principales préconisée par la norme (NF EN 933-2) :

- Les fines : $0/d$ avec $d \leq 0,08$ mm ;
- Les sables : $0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm ;
- Les gravillons : d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm ;
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm ;
- Les graves $0/D$ avec $6,3$ mm $< D \leq 80$ mm.

La détermination des valeurs de d et D des classes granulaires d/D se fait en considérant que les granulats correspondant à ces dimensions doivent être présents en proportions suffisantes [7]. La résistance mécanique des granulats peut s'exprimer par des résistances mécaniques à la fragmentation, à l'usure et au polissage. Elle est donc fonction des caractéristiques intrinsèques de la roche d'origine.

Le classement des granulats se fait par criblage. Lorsque l'on est en présence d'un sable pauvre en éléments fins de granularité constante (à l'exemple des sables de certains cours d'eau), on peut le corriger en y ajoutant un sable fin, soit naturels à grains ronds, soit broyé en proportion convenable pour obtenir un sable composite de granularité admissible. Il ne faudrait pas confondre la granularité, l'ensemble des caractéristiques définissant l'état granulaire d'un produit, de la granulométrie qui est la mesure des dimensions des grains ou fragments.

En présence d'un sable très hétérogène, tantôt pauvre en éléments fins, tantôt excédentaire, la solution consiste à procéder à une coupure interne, à une maille judicieusement choisie, généralement comprise entre 0,4 et 0,8 mm. On obtient ainsi deux sables, un sable fin et un gros sable, qui correctement dosés lors de la fabrication du béton, permettent d'obtenir un sable composite acceptable [9].

1.2.2.5 Désignation des granulats

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit : *Granulat d/D*

Où :

- **Granulat** : sable ou gravier ;
- **d** : dimension minimale des grains ;
- **D** : dimension maximale des grains

Avec une tolérance de 15% d'élément $< d$ et 15% d'élément $> D$ si $D > 1.58d$ et une tolérance de 20% si $D < 1.58d$ [7].

1.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est la quantité d'eau que l'on utilise pour confectionner un béton. Le gâchage est l'opération irréversible qui consiste à ajouter de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage [10]. L'eau de gâchage est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant). Ainsi on ne néglige pas l'influence de la quantité d'eau sur la résistance et la durabilité du béton, l'eau en excès diminue la résistance et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne doit pas contenir d'impuretés nuisibles (matière organique, alcalis). Il convient de toujours utiliser l'eau potable. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. La quantité d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs notamment la teneur en ciment, les granulats, la consistance recherchée du béton frais ; généralement, elle est comprise entre 140 et 210 l/m³ [7]. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité : résistance mécanique à la compression, durabilité. La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau/ masse du ciment) du mélange. Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0,4 (qualité supérieure) et 0,6 (béton de fondation) [10].

1.2.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques provoquant des modifications des propriétés ou de comportement des bétons. Ils sont incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment. Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides.

Toutefois, afin de réduire leur cout de transport certains sont en poudre. Ils sont ainsi dilués avant d'être utilisé car la dispersion homogène d'une petite quantité de poudre dans un malaxeur de centrale à béton est en effet moins certaine que celle d'un liquide [3].

Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont : les plastifiants, les retardateurs de prise, les accélérateurs de prise, les entraîneurs d'air, etc. [7].

1.3 TYPOLOGIE DES BÉTONS [3]

Selon les propriétés recherchées, le type de liant utilisé, l'usage destiné au béton, il existe plusieurs types des bétons parmi lesquelles nous pouvons citer le béton ordinaire qui fait l'objet de cette étude, le béton précontraint, le béton auto plaçant, le béton à haute performance, le béton à très haute performance, etc.

1.3.1 Le béton ordinaire

Le béton ordinaire est un matériau de construction composé de ciment, d'eau, de granulats et éventuellement d'adjuvants. Il est largement utilisé pour sa résistance à la compression et sa facilité de mise en œuvre dans des applications telles que les fondations, dalles et structures diverses.

1.3.2 Le béton précontraint

Le béton précontraint est une forme de béton utilisée dans la construction. Il est sensiblement « Précontraint » (comprimé) pendant la production, d'une manière qui le renforce contre les forces de traction qui existeront en service. Cette compression est produite par la mise sous tension de « tendons » à haute résistance situés à l'intérieur ou à côté du béton et est effectuée pour améliorer les performances du béton en service.

1.3.3 Le béton auto plaçant

Le béton auto plaçant est un béton de ciment capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter

pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène.

1.3.4 Le béton à haute performance

Un béton à haute performance (BHP) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme.

1.3.5 Le béton à très haute performance

Les micro silices ou autres micros fines permettent au BTHP d'atteindre des résistances caractéristiques à la compression supérieure à 100MPa.

1.4 CLASSIFICATION DES BÉTONS

La classification des bétons se fait principalement selon plusieurs critères, notamment la masse volumique, la résistance, le liant utilisé, la destination, etc.

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 [7]. Le *Tableau 1-3* présente la classification des bétons selon les masses volumiques.

Tableau 1-3 Classification des bétons selon la masse volumique [7]

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'agrégats spéciaux à masse volumique élevée. 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'agrégats poreux naturels ou artificiels [7].

1.4.2 Classification des bétons selon leur résistance [11]

Afin de classer le béton selon la résistance, on réalise des essais à la compression des éprouvettes cylindriques de dimension (11 x 22 ; 16 x 32 ; 25 x 50). Les dimensions sont centimètres. Le moule le plus utilisé est le moule 16 x 32. Outre les moules cylindriques, les essais peuvent également se passer sur les moules cubiques. La résistance à la compression d'un béton est exprimée par la résistance caractéristique notée f_{ck} . La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leurs résistances caractéristiques à la compression suivant le **Tableau 1-4**.

Tableau 1-4 Classes des bétons selon la résistance [7]

Classe	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30
f_{ck} , Cyl (Mpa)	12	16	20	25
f_{ck} , cube (Mpa)	15	20	25	30

Dans ce **Tableau 1-4**, $f_{ck, Cyl}$ est la résistance caractéristique mesurée sur les éprouvettes cylindriques, $f_{ck, cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur des éprouvettes cubiques.

1.4.3 Classification des bétons selon la destination [7]

Selon la destination du béton, on distingue :

- Le béton ordinaire (pour les éléments de construction porteurs : poteaux, dalles, poutres, etc.)
- Les bétons hydrotechniques (pour les barrages, écluses, revêtement des canaux) ;
- Les bétons pour les planchers légers (couverture et fondations des chaussures, etc.) ;
- Etc.

1.4.4 Classification des bétons selon le genre de liant utilisé [11]

Selon le liant utilisé, on distingue :

- Les bétons de ciment, confectionnés avec des liants hydrauliques tels que le ciment Portland ;
- Les bétons au liants organiques ;
- Le béton bitumineux : utilise le bitume comme liant. Il est principalement utilisé pour les revêtements routiers et les infrastructures de transport
- Etc.

1.5 MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS

Formuler un béton, revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, de gravier, de l'eau et éventuellement des adjuvants entrant dans la composition d'un m³ de béton partant des propriétés recherchées [12]. Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes, elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférences pondérales ; le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac. Dans cette section, nous présentons, de façon sommaire, certaines méthodes de formulation du béton.

1.5.1 La méthode de DREUX-GORISSE [3]

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique simplifiée qui permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton d'étude mais que, seules quelques gâchées d'essais et la confection des éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des propriétés souhaitées et des matériaux utilisés.

Les données de base utilisées pour cette méthode sont notamment la nature de l'ouvrage, la résistance souhaitée à 28 jours et la consistance souhaitée. Outre ces trois données de base, la dimension maximale des granulats D_{max} est aussi un paramètre utile dans la composition du béton d'étude, d'où il ne doit pas être négligé.

1.5.2 La méthode de BOLOMEY [13]

En 1925, Bolomey propose une courbe granulométrique continue de référence incluant le ciment. Par la formule (1.1), on trace une courbe granulométrique de référence et 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.

$$P = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1.1)$$

Avec :

- P : le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,
- D : est le diamètre du plus gros grain,
- A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

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

1.5.3 La méthode de FULLER-THOMPSON [14]

En 1907, Fuller et Thompson basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{fuller\ Thompson} = \frac{100 \times 5\sqrt{d}}{D} \quad (1.2)$$

Avec :

- d : plus petite dimension ;
- D : plus grande dimension.

1.5.4 La méthode de FAURY [15]

En 1944 Faury proposa, suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type "continu ". Il s'inspire des travaux de Caquot relatifs à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. Cette loi de granulation est une loi

19

*Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines*

fonction de $\sqrt[5]{d}$ (la racine 5^{ème} du diamètre minimale) ; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduées $\sqrt[5]{d}$.

Les courbes granulométriques idéales conduisant à la compacité maximale sont alors théoriquement des droites, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

1.5.5 La méthode de BARON-OLIVIER [16]

Dans cette méthode, il s'agit de déterminer une composition de béton répondant à des caractéristiques précises de résistance et d'ouvrabilité à partir des principes énoncés par BARON. C'est à partir des études expérimentales qu'il a réalisées dans les années 1970-80 et qui ont été optimisées par la suite en utilisant les directives de la norme NF P 18305, remplacée par la norme Européenne EN 206-1.

Les expériences ont confirmé les travaux réalisés par BOLOMEY et FAURY dont certaines formules ont été retenues en ce qui concerne les dosages en liant et en eau. Pour les dosages en granulats ce sont, en partie, les travaux de DREUX qui ont été retenus. L'ensemble est complété par des résultats expérimentaux qui rendent la méthode aussi abordable que la méthode de DREUX sans avoir les inconvénients de sa limitation aux seuls bétons courants.

Le problème du dosage optimal d'un béton n'est pas unique : il y a en fait deux problèmes qui peuvent être traités indépendamment l'un de l'autre :

- La définition de la pâte liante,
- La définition du squelette granulaire.

1.6 PROPRIÉTÉS DU BÉTON

Le béton se présente sous deux états, l'état frais et l'état durci. Il est donc nécessaire de connaître ses différentes propriétés sous ces deux états pour mieux l'utiliser. Dans cette section sont respectivement présentées les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

1.6.1 Les propriétés du béton frais

La principale propriété du béton frais est la maniabilité ou l'ouvrabilité. C'est l'indice qui indique l'aptitude à la mise en place du béton dans un moule, à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. L'ouvrabilité se mesure à l'aide du cône d'Abrams. Les bétons frais sont classifiés à partir des différents affaissements observés au cône d'Abrams. Le **Tableau 1-5** reprend les différentes classes de consistance ainsi que leurs domaines respectifs d'utilisation [7].

Tableau 1-5 Classes des bétons suivant l'affaissement au cône d'Abrams [7]

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

L'ouvrabilité d'une pâte de béton dépend de plusieurs facteurs notamment le genre de ciment, la teneur en eau et en mortier de ciment, la grosseur des graviers, la composition de sable [2]. Des bétons de même composition, mais avec des ciments différents ont une ouvrabilité différente.

1.6.2 Les propriétés du béton durci [7]

Le béton durci se caractérise par plusieurs propriétés mais principalement par sa résistance mécanique. La résistance à la compression est l'une des propriétés prépondérantes du béton durci. Le béton présente une bonne résistance à la compression mais une moindre à la traction.

La résistance et l'ouvrabilité sont à étudier de pair, car ces 2 propriétés sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus, qu'elles varient en sens inverse en fonctions de

certaines facteurs essentiels de la composition du béton. La résistance à la compression du béton est la capacité de celui-ci à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression. Elle se mesure sur des éprouvettes normalisées à 28 jours.

Les bétons courants ont une résistance à la compression comprise entre 20 et 40 MPa pour un rapport E/C de l'ordre de 0,5. Les bétons spéciaux à l'instar des bétons à Haute performance présentent des résistances supérieures à 40 MPa.

1.7 DISTRIBUTION DU SQUELETTE GRANULAIRE ET PROPRIÉTÉS FINALES DU BÉTON

Le béton est un matériau composite constitué de granulats, de ciment et d'eau. Les granulats, qui forment le squelette granulaire, représentent environ 70 à 80 % du volume total du béton [17]. La distribution granulométrique, c'est-à-dire la répartition des tailles des grains, ainsi que leur forme et leur arrangement spatial, ont un impact significatif sur les propriétés finales du béton.

La distribution du squelette granulaire joue un rôle crucial dans les propriétés du béton, influençant à la fois ses caractéristiques mécaniques, sa durabilité et son ouvrabilité. Dans cette section, nous présentons l'influence de la distribution du squelette granulaire sur l'ouvrabilité, la résistance mécanique et la durabilité du béton.

1.7.1 Influence sur l'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton frais, c'est-à-dire sa capacité à s'écouler et à se mettre en place, est directement affectée par sa distribution des granulats. Des granulats bien distribués permettent un meilleur écoulement et une meilleure mise en place du béton, réduisant ainsi les besoins en eau et en adjuvants [17].

En général, la granulométrie du sable influence la quantité d'eau requise pour la formulation du béton. En effet, plus la taille des grains d'un sable est petite, plus la quantité d'eau est importante pour la formulation du béton. Autrement dit, la classe granulaire d'un sable influe sur l'ouvrabilité d'un béton [18].

- **Le sable grossier [5mm-25mm]** : présente généralement un défaut par rapport à la liquéfaction de la pâte de ciment. Ce défaut se traduit par une instabilité du mélange frais, qui conduit à un ressuage (État du béton qui laisse ressortir son humidité intérieure) important.
- **Le sable trop fin [<2,5mm]** : a une demande en eau de mouillage très élevée. Cette eau augmente le rapport E/C demandant ainsi une augmentation de la quantité de ciment.
- **Le sable moyen aux grains arrondis** : contient peu de grains de $\phi < 100\mu m$, mais est riche en grains moyens de 0,250 à 0,500mm. Ce type de sable, est considéré comme un bon sable pour la fabrication du béton, en termes d'ouvrabilité, car il a un bon rapport à la liquéfaction de la pâte de ciment et ne nécessite pas une augmentation de la quantité d'eau de gâchage.

1.7.2 Influence sur la résistance mécanique

Le rapport entre la distribution du squelette granulaire et la résistance obtenue du béton est crucial et repose sur la compréhension de l'impact direct de la compacité, de l'adhérence interfaciale, de la réparation des contraintes et de la consommation de ciment.

1.7.2.1 Optimisation du compactage

La distribution des granulats influence la compacité du béton. Un squelette granulaire bien gradué permet un meilleur compactage, réduisant ainsi la porosité. Moins il y a de vide dans le béton, plus la matrice cimentaire remplit efficacement les espaces entre les granulats, ce qui améliore l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment. Une bonne compaction réduit les défauts internes, comme les microfissures, et améliore la résistance globale du béton [19].

1.7.2.2 Adhérence interfaciale

La résistance du béton dépend en grande partie de l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment. Une distribution granulométrique bien équilibrée permet une meilleure adhésion mécanique et chimique entre les granulats et la matrice cimentaire. Un squelette granulaire bien distribué réduit les zones de transition interfaciales faibles, qui sont souvent les points de départ des fissures sous charge [20].

1.7.2.3 Effet sur la Distribution des Contraintes

La répartition des granulats affecte la manière dont les contraintes sont transmises et distribuées au sein du béton. Une distribution hétérogène ou mal équilibrée des granulats peut entraîner une concentration des contraintes dans certaines zones, augmentant ainsi les risques de fissuration sous charge. Une bonne distribution assure une répartition uniforme des contraintes, minimisant les points faibles [21] .

1.7.2.4 Réduction de la Consommation de Ciment

Une distribution granulaire optimale permet de réduire la quantité de ciment nécessaire pour obtenir une certaine résistance. Lorsque les granulats sont bien distribués, la matrice cimentaire peut être utilisée plus efficacement, car elle est mieux répartie entre les particules. Cela permet de réduire la quantité de ciment tout en maintenant, voire en améliorant, la résistance du béton.

1.7.3 Influence sur la durabilité

La distribution du squelette granulaire influence également la durabilité du béton.

1.7.3.1 La perméabilité et la porosité

La distribution granulométrique influence la perméabilité du béton. Une distribution bien graduée réduit la porosité, ce qui diminue la perméabilité et améliore la durabilité du béton en le rendant moins susceptible aux attaques chimiques et à la pénétration de l'eau [17].

1.7.3.2 Résistance au cycle Gel-Dégel

La résistance aux cycles gel-dégel est également amélioré par une bonne distribution des granulats. Une structure dense et bien compactée empêche la formation de grandes poches d'eau, réduisant ainsi les dommages causés par le gel et le dégel [17].

1.8 PATHOLOGIE DES BÉTONS

Les pathologies pouvant compromettre la durabilité et la sécurité des structures en béton sont bien nombreuses, elles ont des causes et conséquences variables.

1.8.1 Le ressuage

Fraichement malaxé, le béton se tasse et une couche d'eau limpide apparaît en surface. Cette couche d'eau s'appelle « eau de ressuage ». Le tassement dans le coffrage et une vibration non homogène risquent de provoquer une fissuration du béton avant même la prise et le durcissement [9].

1.8.2 La ségrégation

Les granulats placés dans la pâte de ciment sont soumis à leur poids propre, à la poussée d'Archimède, étant donné que la pâte de ciment est considérée comme un fluide, et aux forces de liaison de la pâte. Lorsque les forces de liaison sont faibles, faible viscosité de la pâte, les granulats, plus lourds tendent à descendre et les bulles d'air, plus légères tendent à remonter vers la surface. Lorsque le béton est soumis à des vibrations ou des chocs importants ou répétés, il y a risque de décohésion des éléments les plus gros du mélange. Ainsi, la ségrégation c'est le phénomène de séparation des éléments les plus gros du mélange. Ces derniers tendent à descendre [9].

1.8.3 La carbonatation

La carbonatation se produit lorsque le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air réagit avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dans le béton, réduisant ainsi son Ph et rendant les armatures en acier susceptibles à la corrosion. Des défauts esthétiques se présentent au début (tache de rouille) qui peut conduire à de gros désordres structurels tel que la ruine de l'ouvrage quand le phénomène se généralise [22].

1.8.4 La fatigue

La fatigue d'un élément signifie son endommagement sous l'effet d'efforts répétés ou cycliques. Alors qu'il est conçu pour résister à des efforts donnés, l'application répétée d'efforts plus faibles peut provoquer sa rupture.

Les endommagements par fatigue se traduisent par une dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures entraînant l'apparition d'une fissuration pouvant affecter la durée de vie de l'ouvrage, voire des déformations irréversibles sous l'effet des charges de service. Ils peuvent entraîner éventuellement la rupture quand l'assemblage atteint sa limite d'endurance [22].

1.8.5 Les attaques sulfatiques

Les réactions sulfatiques sont provoquées par l'action des sulfates provenant de l'environnement (milieu aqueux, remblais contenant des sulfates), avec la chaux et les aluminates du ciment pour former de l'ettringite. Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante qui altère les caractéristiques mécaniques du béton [22].

1.8.6 Attaques acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. L'action des acides (comme la substance agressive) sur le béton durci (Comme la substance réactive) traduit par la transmutation des composés de calcium (Hydroxyde de calcium hydraté de calcium, le silicate et d'aluminate de calcium hydraté) aux sels de calcium. En raison de ces réactions, la structure du ciment durci est détruite. Le taux de réaction des différents acides avec du béton n'est pas déterminée par l'agressivité de l'acide, mais par la solubilité du sel de calcium qui en résulte [22].

1.9 DOMAINES D'UTILISATION DU BÉTON

Grace à sa durabilité, le béton résiste très longtemps aux sollicitations physico-chimiques liées aux conditions d'emploi, aussi bien qu'à l'environnement. Ses caractéristiques lui permettent de répondre aux multiples exigences imposées aux ouvrages notamment la sécurité, la stabilité statique et dynamique, la tenue au feu, l'inertie thermique, acoustique et bien entendu esthétique [6]. À travers ses performances et sa souplesse d'emploi, le béton est présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics.

1.9.1 Le béton dans le bâtiment

Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements, écoles, hôpitaux...) aussi bien dans les constructions liées à l'activité professionnelle (business, ateliers, commerces, bureaux) que dans des réalisations diverses (socioculturelles, sportives ou de loisir...) ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels.

Dans un bâtiment, diverses fonctions sont assurées par le gros œuvre ; on peut les classer en quatre fonctions essentielles : La fonction structure, la fonction plancher, la fonction enveloppe et la fonction couverture [6]. Le béton apporte dans ces quatre fonctions une réponse très largement positive à la satisfaction des exigences qu'est en droit d'avoir l'utilisateur.

1.9.2 Le béton dans les travaux publics

Tout comme dans le bâtiment, le béton est utilisé dans les travaux publics et joue un rôle primordial notamment dans la construction des ponts, des tunnels, des barrages, des routes et d'autres ouvrages à intérêt public.

1.9.2.1 Les ponts

Les progrès techniques, et en particulier l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.

1.9.2.2 Les tunnels

Pour les grands tunnels, dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est soit coulé en place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer, le tunnelier.

1.9.2.3 Les barrages

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

1.9.2.4 Les routes

La chaussée en béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse, traitement de surface. Les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

1.9.2.5 Les autres ouvrages

Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshore ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevée.

1.10 CONCLUSION PARTIELLE

Ce premier chapitre a traité des généralités sur le béton. Il a été question de définir le béton, de parler de ses constituants, de types de bétons, leurs classifications, les différentes méthodes mises en place pour la formulation du béton, des domaines d'utilisation du béton, de la distribution du squelette granulaire et les propriétés finales du béton, les pathologies du béton et ses domaines d'application. On y a donc présenté les éléments nécessaires à la compréhension de la thématique traitée dans ce travail.

Chapitre 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons la nature et l'origine des constituants, et une série d'essais effectués au laboratoire en vue de leurs caractérisations.

En outre, nous présentons également la méthode de formulation de Dreux Gorisse ainsi que certains essais de caractérisation des bétons d'étude : l'essai d'étalement au cône d'Abrams et la résistance à la compression.

Nous finirons ce chapitre en présentant un programme expérimental décrivant la procédure utilisée lors de la confection des bétons d'étude afin d'évaluer l'influence de la distribution du squelette granulaire, objet de notre travail.

2.2 NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS

Les constituants utilisés dans la confection des bétons sont de diverses natures et origines. Dans cette section nous présentons respectivement la nature et l'origine du ciment, des granulats, et de l'eau de gâchage.

2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment Cimerwa. Il s'agit d'un ciment pouzzolanique de classe CEM IV/B 42.5 produit au Rwanda, de masse volumique $2,97 \text{ g/cm}^3$ [23].

2.2.2 Les granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont des concassés ainsi que des roulés : le sable (0/4) est roulé et provient de l'île d'Idjwi, les graviers (4/8), (8/15) et (15/25) produits par l'entreprise CARRIGO, sont issus du concassage de la roche volcanique de Goma.

2.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable fournie par la REGIDESO et recueillie au robinet.

2.3 CARACTÉRISATION DES CONSTITUANTS

Les propriétés du béton dépendent des quantités et des types de matériaux utilisés, ainsi que de la façon dont ils sont mélangés, transportés, mis en œuvre et curés. D'où l'importance d'étudier les propriétés et les caractéristiques de chaque constituant par des essais effectués au laboratoire de géo-matériau de la FSTA de l'ULPGL.

Dans cette partie, nous présentons certains essais normalisés sur les matériaux constitutifs du béton tel que : l'analyse granulométrique pour le sable et les graviers, le degré de propreté du sable ainsi que la détermination des masses volumiques absolues et apparentes du sable et des graviers. Ces essais portent nécessairement sur des quantités réduites des matériaux appelées échantillons

2.3.1 Échantillonnage

Prendre un échantillon d'un matériau, c'est prendre une fraction de ce matériau pour fin d'essai telle que la partie prélevée représente le plus fidèlement possible l'ensemble du matériau dont on désire déterminer les caractéristiques. En d'autres termes, la partie prélevée doit être identique à la partie restante.

L'échantillon pour le laboratoire est la quantité de matériau nécessaire pour réaliser dans de bonnes conditions le/les essais. Il est indispensable que cette quantité soit au moins deux fois plus grande que la masse nécessaire pour le/les essais.

Nous présentons dans cette section les techniques d'échantillonnage, plus particulièrement la séparation de l'échantillon par quartage utilisée pour la réalisation des essais.

2.3.1.1 Techniques d'échantillonnage [24]

Deux étapes sont à parcourir pour obtenir la quantité d'échantillon désirée :

- La première étape concerne le prélèvement dans la réserve ou le gisement naturel. Ce prélèvement se fait le long de lignes verticales, car c'est le lieu probable des particules appartenant à une même masse avant mise en réserve ou avant sédimentation. Le prélèvement doit être à quelques centimètres de la surface afin d'éliminer l'effet de ségrégation due aux pluies et au vent. Le prélèvement doit ensuite se faire à trois niveaux de chaque verticale, le haut, le milieu, le bas et ceci pour tenir compte de la ségrégation durant la mise en œuvre.
- La deuxième étape se réalise au laboratoire où les échantillons partiels obtenus doivent être cumulés et mélangés, puis passés dans un séparateur pour obtenir enfin la quantité voulue. À défaut du séparateur d'échantillon, on peut réaliser, sur le mélange obtenu, un quartage.

2.3.1.2 Séparation de l'échantillon par quartage

On appelle quartage l'opération de l'échantillonnage qui consiste à fractionner manuellement en quatre parties plus ou moins égales du mélange de matériau. On commence par brasser le matériau et constituer un tas homogène étalé sur une surface lisse. Ensuite, à l'aide d'une truelle, l'échantillon est séparé d'abord en deux moitiés, puis en quatre parties à peu près égales, suivant deux axes perpendiculaires et on prélève deux parties opposées. Enfin mettre en tas étalé ces deux parties opposées et refaire l'opération si cette quantité est trop importante pour l'essai que l'on veut effectuer [25]

2.3.2 Analyse granulométrique

L'essai d'analyse granulométrique qui détermine la composition granulométrique, est effectué selon la norme NF EN 933-1 par voie sèche. L'échantillon de masse préalablement séchée dans une étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) a été tamisé à travers une série de tamis [3]. Dans cette section nous présentons respectivement le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que l'expression des résultats.

2.3.2.1 But de l'essai

L'Analyse Granulométrique a pour but de déterminer les dimensions des grains, la répartition pondérale des granulats selon les différentes classes des grains par tamisage et d'en déduire le module de finesse.

2.3.2.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes de haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration des tamis.

2.3.2.3 Matériels utilisés

Les matériels utilisés pour l'analyse granulométrique sont : Une balance, un tamiseur mécanique, une série de tamis conforme à la norme NF EN 933-2.

2.3.2.4 Mode opératoire

Le mode opératoire pour cet essai est le suivant :

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissante de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond,
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis,
- Agiter mécaniquement cette colonne,
- Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle,
- Déterminer ainsi la masse du refus de chaque tamis,
- Poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenus dans le fond de la colonne de tamis.

2.3.2.5 Expression des résultats

Les masses des différents refus ont été rapportées à la masse initiale du matériau et ont été exprimées en pourcentage. Ces pourcentages ont servi dans le traçage de la courbe

32

*Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines*

granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les diamètres d'ouvertures des mailles D en abscisse.

a. Détermination du module de finesse

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante pour le sable : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm [3]. Il a donc été déterminé par la formule (2.1).

$$MF = \frac{1}{100} \Sigma \text{Refus cumulé en } \% \quad (2.1)$$

Avec Mf : le module de finesse du sable.

- Si $2,2 < Mf < 2,8$: bon sable à béton ;
- Si $Mf < 2,2$: le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ;
- Si $Mf > 2,8$: le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

2.3.3 Le degré de propreté du sable

Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai de l'équivalent sable selon la norme NF P 18-598. Dans cette section nous présentons successivement le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que l'expression des résultats [7].

2.3.3.1 But de l'essai

L'essai de l'équivalent sable vise à vérifier le degré de propreté des sables entrant dans la composition des bétons.

2.3.3.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculante dans l'éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. L'équivalent de sable est calculé par la formule (2.2).

$$ES = \frac{H1}{H2} \times 100 (\%) \quad (2.2)$$

Où :

- H_1 est la hauteur du dépôt de sable visible en (cm).

- H_2 est la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension) en (cm).

2.3.3.3 Matériels utilisés

Conformément à la norme NF P 18-598, les matériels utilisés pour cet essai sont les suivants : Les éprouvettes en plexiglass (ayant chacun deux traits repères) et leurs bouchons, entonnoir pour l'introduction du sable, la bombonne de 5 litres avec bouchon et siphon, le tube laveur métallique plongeant, l'agitateur électrique, la règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable et floculat, le piston taré à masse coulissante de 1 kg pour la mesure des hauteurs.

2.3.3.4 Mode opératoire

Le mode opératoire fait intervenir les étapes suivantes :

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

2.3.3.5 Expression des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentages suivant la formule (2.2) et interprétés suivant le *Tableau 2-1*

Tableau 2-1 Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [7]

ES a vue	ES au piston	Conclusions
ES<65%	ES<60%	Sable argileux, risque de retrait ou gonflement. Sable à rejeter pour un béton de qualité
65%≤ES≤75%	65%≤ES≤75%	Sable légèrement argileux, de propreté admissible pour le béton qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquences notables sur la qualité du béton
ES>85%	ES>80%	argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau

2.3.4 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci. Elle a été déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. La méthode qui a été utilisée est celle de l'éprouvette graduée. Dans cette section, nous présentons tour à tour le principe de l'essai, le mode opératoire ainsi que l'expression des résultats.

2.3.4.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue calculée selon la formule (2.3) :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (2.3)$$

Avec :

- ρ_{abs} : la masse volumique absolue en (g/cm³) ;
- Ms : la masse sèche du matériau en (g) ;
- V1 et V2 respectivement la lecture sur l'éprouvette graduée du volume avant et après l'introduction du granulat, en (ml).

***Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines***

2.3.4.2 Mode opératoire

Le mode opératoire fait intervenir les étapes suivantes :

- Introduire une quantité V1 d'eau dans une éprouvette graduée ;
- Introduire des granulats secs de masse Ms (300g) dans l'éprouvette graduée contenant de l'eau ;
- Éliminer les bulles d'air ;
- Prise de volume V2 correspondant.

2.3.4.3 Expression des résultats

Les résultats sont exprimés suivant la formule (2.3) et interprétés selon le *Tableau 2-2*

Tableau 2-2 Classification des granulats suivant la masse volumique [7]

Nature des granulats	Masse volumique
Granulats légers	$\rho_{\text{abs}} < 2\text{t/m}^3$
Granulats courants	$2\text{t/m}^3 < \rho_{\text{abs}} < 3\text{t/m}^3$
Granulats lourds	$\rho_{\text{abs}} > 3\text{t/m}^3$

2.3.5 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un granulat est la masse par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant [3]. Elle a été déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. Pour cet essai, nous présentons le principe de l'essai et le mode opératoire.

2.3.5.1 Principe de l'essai

L'essai a consisté au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule (2.4) :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad (2.4)$$

Où :

- ρ_{app} : la masse volumique apparente en (g/cm³) ;

- M est la masse sèche du matériau en (g) ;
- V est le volume du récipient en (ml).

2.3.5.2 Mode opératoire

Le mode opératoire pour la détermination de la masse volumique apparente d'un granulat est se présente comme suit :

- Sécher des granulats préalablement lavés ;
- Verser l'échantillon dans un volume ;
- Araser à la règle le débordement.
- Prise de volume V2 correspondant.

2.3.6 Essai Los Angeles

L'essai permet d'estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté d'un matériau en calculant le coefficient de Los Angeles [26]. Pour cet essai, nous présentons le principe de l'essai, le mode opératoire et l'expression des résultats.

2.3.6.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieure à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs des boulets normalisés et aux fragmentations réciproques dans la machine Los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de classe granulaire : (4/6,3) ou (6,3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31,5) ou (25/50).

2.3.6.2 Mode opératoire

Le mode opératoire pour cet essai se présente comme suit :

- Introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, faire opérer la machine de Los Angeles.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr/min et 33tr/min.

- Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus du bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm, égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à une masse constante.
- Peser ce refus une fois séché. Soit P le résultat de la pesée avec :

$$P = 5000 - Refus \quad (2.5)$$

Le coefficient de Los Angeles est donné par la formule (2.6) :

$$Cla = \frac{P}{5000} \times 100 \quad (2.6)$$

Où

- Cla : le coefficient de Los Angeles ;
- P : est le passant à 1,6mm.

2.3.6.3 Expression des résultats

Plus le coefficient Los Angeles est faible, plus le granulat est résistant à la fragmentation par chocs. Les valeurs de ce coefficient indiquent la nature du gravier et permettent d'apprécier leur qualité pour composer un béton comme présente le *Tableau 2-3*.

Tableau 2-3 Types de graviers selon le coefficient LA [7]

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

Le coefficient LA ne doit pas excéder 45 pour les granulats du béton

2.3.7 L'absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats est par définition le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Pour cet essai, nous présentons le mode opératoire et l'expression des résultats.

2.3.7.1 Mode opératoire

Le taux d'absorption des graviers a été déterminé selon la norme NF P 18-555 suivant le mode opératoire ci-après :

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

2.3.7.2 Expression des résultats

Le résultat de l'essai d'absorption d'eau des graviers est exprimé en pourcentage et calculé à partir de la formule (2.7) :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100 (\%) \quad (2.7)$$

Avec

- Ab en (%) : l'absorption d'eau ;
- M_a en (g) : la masse humide ;
- M_s en (g) : la masse sèche.

2.4 FORMULATION DU BÉTON

La formulation d'un béton consiste à déterminer les quantités et les qualités de ses composants afin que celui-ci réponde à des exigences aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Dans cette section, nous présentons la méthode de *Dreux Gorisse* utilisée dans notre travail.

2.4.1 Choix et justification de la méthode

Le choix de l'utilisation de la méthode de *Dreux Gorisse* dans notre travail a été guidé non seulement par sa facilité de mise en application mais aussi par la grande proportion de graviers qui entre dans sa formulation. La méthode de *Dreux Gorisse* permet une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est aussi très simple d'utilisation par le fait qu'elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Elle permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulats et ciment) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges [12].

2.4.2 Méthode de DREUX GORISSE

La méthode dite de Dreux-Gorisse est une méthode pratique de composition de béton qui a pour seul but de permettre de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés [3].

2.4.2.1 Données de base

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

a. La dimension maximale des granulats

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

b. La résistance souhaitée

La résistance souhaitée est en général définie par la résistance en compression sur éprouvette cylindrique à 28 jours. C'est elle qui conduit directement vers le choix du dosage approximatif en ciment. Les résistances nominales à 28 jours sont majorées de 15% compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique. La résistance en compression a été déterminée par la formule (2.8).

$$f_c = f_{c28} + 15\% \quad (2.8)$$

Avec :

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

c. La consistance désirée

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

2.4.2.2 Détermination du dosage en eau et en ciment

En fonction de la résistance moyenne désirée f_c , on commencera par évaluer approximativement le rapport C/E. Ce rapport est déterminé grâce à la formule (2.9).

$$f_c = G \times F_{CE} \times \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2.9)$$

Avec :

- f_c : La résistance moyenne en compression désirée à 28 jours en MPa
- F_{CE} : la classe vraie du ciment à 28 jours en MPa
- C : Le dosage en ciment en kg/m^3 ;
- E : Le dosage en eau en l/m^3 ;
- G : Le coefficient granulaire (compris entre 0,35 et 0,65).

Le coefficient granulaire « G » est fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats. Le **Tableau 2-4** reprend les coefficients granulaires G en fonction de la qualité et de la taille des granulats.

Tableau 2-4 Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G [3]

Qualité des granulats	Dimension Dmax des granulats		
	Fins Dmax < 16 mm	20 < Dmax < 31,5	Gros Dmax > 50 mm
Excellente	0,55	0,6	0,65
Bonne, courante	0,45	0,5	0,55
Passable	0,35	0,4	0,45

Le dosage en ciment est ainsi dépendant du rapport C/E mais aussi du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la **Figure 2-1** *Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée* permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

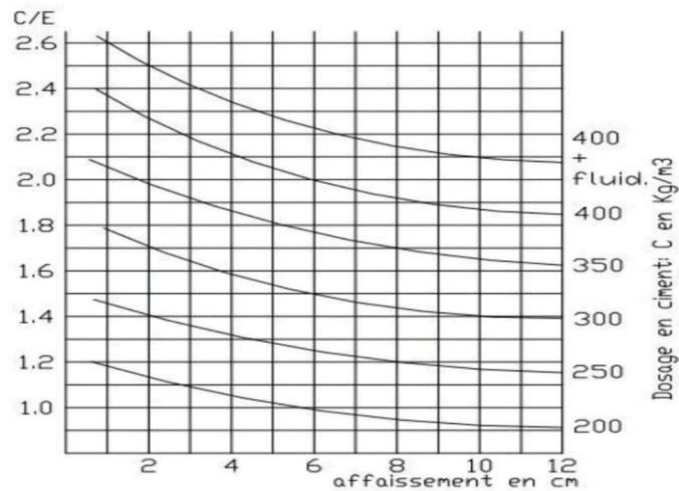


Figure 2-1 *Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [3]*

2.4.2.3 Détermination du dosage en eau

Après qu'on ait fait le choix du dosage en ciment C, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et que l'on pourra ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité.

L'abaque de la **Figure 2-2** donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition, c'est par des essais sur éprouvettes que les divers éléments constitutifs et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosés.

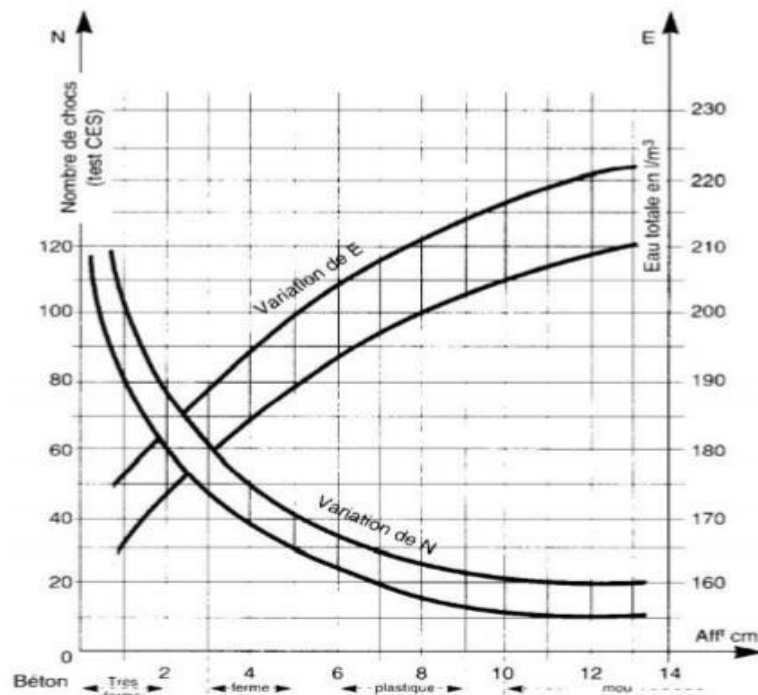


Figure 2-2 Variation relatives moyennes du dosage en eau *E* et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S en fonction de l'affaissement [3]

Les données précédentes sont spécifiquement applicables aux bétons pour lesquels la dimension maximale des granulats est d'environ $D = 20$ mm (dimension la plus courante). Si l'on a un $D < 20$ mm, la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice versa. La correction sur le dosage en eau correspondant à $D \neq 20$ mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du **Tableau 2-5** en fonction de D [3].

Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines

Tableau 2-5 Correction sur le dosage en eau en fonction de Dmax [3]

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

a. Dosage en eau réel

La quantité d'eau totale (sur matériaux supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, on obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats), à l'aide des indications approximatives du **Tableau 2-6** (à défaut de mesures plus précises de la teneur en eau des granulats) [3]

Tableau 2-6 Teneur en eau approximative des granulats courants en litres pour un metre cube de materiau (en volume apparent) [3]

Degré apparent d'humidité	Eau d'apport en l/m³			
	Sable 0/5	Gravillon 5/12,5	Gravier 5/20	Gravier 20/40
Apparence :				
Sèche	0 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Humide	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Très humide	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
Saturée, égouttée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

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

granulats stockés depuis longtemps sous le soleil en saison sèche, l'eau d'apport devient négligeable [3].

2.4.2.4 Qualité des granulats

Les graviers doivent être de bonnes qualités minéralogiques, suffisamment durs et bien propres, mais la forme de leur courbe granulaire, plus ou moins concave, a une influence relativement moins importante que celle du sable. Le sable est l'élément qui a sur le béton, selon ses qualités, une influence prépondérante. Sa propreté, son module de finesse et sa courbe granulométrique seront vérifiés conformément aux spécifications susmentionnées.

a. Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), le tracé de la courbe granulométrique de référence consiste à tracer la courbe OAB où le point O correspond à l'origine ; le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées définies en abscisse (X_A) à partir de la dimension D, et en ordonnée par Y_A (en %). Pour un $D \leq 20$ mm X_A est D/2 et pour un $D > 20$ mm X_A est situé au milieu du segment gravier limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D. Y_A est déterminé par la formule (2.10) [3] :

$$Y_A = 50 - \sqrt{1,25D} + K + K_s \quad (2.10)$$

Avec

- D : la dimension du plus gros granulat ;
- K : coefficient correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la puissance de la vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) ;
- K_s : correction supplémentaire dépendant du module de finesse du sable obtenu par la relation (2.11) :

$$K_s = 6M_f - 15 \quad (2.11)$$

Le **Tableau 2-7** reprend les différentes valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de la forme des granulats (roulés ou concassé).

45

***Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines***

Tableau 2-7 Valeurs du terme correcteur K [3]

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

b. Coefficient de compacité

Le coefficient de compacité γ_c est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre [3]. Le *Tableau 2-8* reprend les différentes valeurs du coefficient de compacité fonction de la plasticité, du diamètre maximal et du type de vibration.

Tableau 2-8 Valeurs du coefficient de compacité [7]

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,75	0,78	0,795	0,805	0,81	0,815	0,82
	Vibration faible	0,755	0,785	0,8	0,81	0,815	0,82	0,825
	Vibration normale	0,76	0,79	0,805	0,815	0,82	0,825	0,83
Plastique	Piquage	0,76	0,79	0,805	0,815	0,82	0,825	0,83
	Vibration faible	0,765	0,795	0,81	0,82	0,825	0,83	0,835
	Vibration normale	0,77	0,8	0,815	0,825	0,83	0,835	0,84
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,82	0,83	0,835	0,84	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,82	0,83	0,835	0,845	0,845
	Vibration normale	0,78	0,81	0,825	0,835	0,84	0,85	0,85
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,83	0,84	0,845	0,855	0,855

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

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

2.4.2.5 Dosage des granulats

La courbe granulaire de référence OAB est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. Les lignes de partage sont alors tracées entre chacun des granulats, en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du premier, au point de 5 % de la courbe du granulats suivant et ainsi de suite. Le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats sera lu sur la courbe de référence, au point de croisement avec la ou les droites de partage.

a. Dosage volumique

*Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines*

Si C est le dosage en ciment et ρ_c la masse spécifique du ciment, le volume absolu des grains de ciment est obtenu par la formule (2.12).

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} \quad (2.12)$$

Si γ est le coefficient de compacité choisit dans le Tableau 2.8 en fonction de D , de la consistance et de l'efficacité du serrage ; le volume absolu de l'ensemble des granulats est déterminé par la formule (2.13).

$$V = \gamma - V_c \quad (2.13)$$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par la suite obtenus par la formule (2.14).

$$\begin{cases} V_s = \%S \times V \\ V_G = \%G \times V \end{cases} \quad (2.14)$$

Avec :

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

b. Dosage massique

Connaissant les masses spécifiques ρ_s et ρ_G , respectivement masse spécifique du sable et du gravier, on déduit les masses m_s et m_G , respectivement masse du sable et du gravier, de la formule (2.15).

$$\begin{cases} m_s = V_s \times \rho_s \\ m_G = V_G \times \rho_G \end{cases} \quad (2.15)$$

2.5 CARACTÉRISATION DES BÉTONS

Il a été nécessaire d'étudier les propriétés du béton sous ses deux états, notamment à l'état frais et à l'état durci. Cette caractérisation s'est faite par différents essais normalisés sur les bétons d'étude, d'abord l'essai d'étalement au cône d'Abrams ensuite les essais sur le béton durci.

2.5.1 Essai sur le béton frais

Le principal essai du béton frais est la maniabilité ou l'ouvrabilité. C'est l'indice qui indique l'aptitude à la mise en place du béton dans un moule.

2.5.1.1 Affaissement au cône d'Abrams [3]

L'essai slump-test est incontestablement un des plus simples et des fréquemment utilisés. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être exécuté par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration.

Cet essai a fait l'objet de la norme NFP 10-451, et nous n'en rappelons et nous en rappelons ci-dessous les principes essentiels : on remplit de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm) ; le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, en raison de 25 coups par couche, on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.

Il s'agit ici de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand est plus le béton sera réputé fluide.

Les mesures sont évidemment quelque peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au *Tableau 2-9*.

Tableau 2-9 Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône [3]

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme	0 à 4	± 1 cm
Plastique	5 à 9	± 2 cm
Très plastique	10 à 15	± 3 cm
Fluide Fl	≥ 16	± 3 cm

Malheureusement, cet essai ne convient pas pour tester les bétons qui seraient encore plus fermes, plus secs, qu'un béton donnant un affaissement presque nul (il n'y a en effet pas d'échelle négative pour cette mesure) ; dans le cas de béton sec, il peut d'ailleurs y avoir écroulement du

cône, à ne pas confondre avec un affaissement normal. Il ne convient pas non plus pour les bétons très mous et des mesures supérieures à une quinzaine de centimètres qui ne sont plus très significatives, mais il reste très variable et d'une bonne sensibilité pour tester la consistance des bétons les plus couramment utilisés.

a. Équipements nécessaires

L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-541, il se compose de 4 éléments :

- Un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, de 20cm de diamètre en sa partie inférieure se de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure ;
- Une plaque d'appui ;
- Une tige de piquage ;
- Un portique de mesure

2.5.2 Essais sur le béton durci

Dans cette section, nous présentons les essais effectués sur le béton à l'état durci à savoir la densité et la détermination de la résistance à la compression.

2.5.2.1 Densité du béton durci

La densité du béton à l'état durci est le rapport de la masse volumique correspondante sur la masse volumique de l'eau [7]. Cet essai permet de déterminer la masse volumique d'un échantillon de béton par rapport à la masse volume de l'eau, ce qui est essentiel pour évaluer ses propriétés physiques et mécaniques.

a. Mode opératoire et expression de résultats

Cet essai repose sur la mesure de la masse d'un échantillon de béton et de son volume, permettant ainsi de calculer sa densité.

Voici les étapes et principes fondamentaux de cet essai :

- Préparation de l'échantillon : l'échantillon doit être complètement durci, ce qui signifie qu'il doit avoir atteint une résistance suffisante (généralement 28 jours après le coulage) ;
- L'échantillon est pesé pour déterminer sa masse m ;

La densité du béton à l'état durci s'obtient par la formule (2.16) :

$$d = \frac{m}{\rho_w \times V} \quad (2.16)$$

Avec :

- d : la densité du béton durci ;
- M : la masse de l'échantillon de béton durci en (kg) ;
- V : le volume en (m^3) ;
- ρ_w : la masse volumique de l'eau (environ $1000\text{kg}/m^3$).

2.5.2.2 Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 12390-3. La presse est électrique à doubles manomètres et grands plateaux, ayant une capacité 5 000 kgf. Les résultats ont été obtenus par la formule (2.17) :

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (2.17)$$

Où :

- R_{cj} la résistance à la compression à j jours en MPa ou en N/mm^2 ,
- F est la force qui agit sur l'éprouvette en (N)
- A est la section de l'éprouvette (mm^2)

2.6 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Dans cette partie, nous présentons le programme expérimental qui montre la procédure utilisée afin d'évaluer l'influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton ordinaire.

Trois types de bétons sont formulés, soit un béton binaire, un béton ternaire et un béton quaternaire, en se basant sur la composition du béton ordinaire avec différentes distributions granulaires afin d'étudier l'effet du squelette granulaire sur les propriétés du béton pour une résistance visée de (20MPa).

Le squelette granulaire est optimisé par le choix des fractions granulaires et leurs analyses granulométriques permettant de détecter les classes manquantes.

Pour la composition des bétons expérimentés, à base de Ciment Cimerwa (CEM IV/B 42,5 N), nous utilisons un sable naturel d'Idjwi avec une taille maximale de 4 mm, et trois tailles différentes des graviers soit : 4/8 mm, 8/15 mm et 15/25mm. Ces granulats ont fait l'objet d'analyses granulométriques conformément à la norme NF EN 933-1 par voie sèche dans le but de composer le squelette granulaire des bétons par la méthode graphique de Dreux- Gorisse. Ces classes ont été choisies afin d'avoir une courbe continue des différents mélanges (binaire, ternaire et quaternaire) en vue de déterminer l'optimum correspondant et une résistance suffisante à la compression.

Selon la méthode de Dreux-Gorisse, il a été fixé les trois paramètres : fraction volumique de granulats, diamètre maximal des granulats « $D_{max}=25mm$ » et la résistance à la compression ; et les six bétons testés, comprennent respectivement :

1. **Béton quaternaire B20-C1** : Un squelette granulaire continu composé de sable roulé 0/4 et de trois tailles différentes de graviers soit : 4/8 mm, 8/15 mm et 15/25 mm ;
2. **Béton ternaire discontinu B20-D1** : Un squelette granulaire discontinu en supprimant la classe granulaire (8/15 mm) du béton quaternaire et en la remplaçant par une masse égale de graviers (4/8 mm et 15/25 mm) répartie comme suit : 25 % de cette masse est ajoutée au gravier 4/8 mm et 75% au gravier 15/25 mm, tout en conservant la même fraction volumique des granulats ; cette répartition a été faite selon la méthode de Dreux-Gorisse afin de conserver la même résistance visée, soit 20 MPa ;
3. **Béton ternaire discontinu B20-D2** : Un squelette granulaire discontinu toujours en supprimant la classe granulaire (8/15 mm) mais en la remplaçant par une répartition 50/50 % des graviers (4/8 mm et 15/25 mm), tout en conservant la même fraction volumique des granulats afin de conserver la même résistance visée, soit 20 MPa ;

4. **Béton ternaire discontinu B20-D3** : Un squelette granulaire discontinu en supprimant la classe granulaire (4/8 mm) et en la remplaçant par une masse égale de graviers (8/15 mm et 15/25 mm) pour une répartition de 25/75 % ; en conservant toujours la même fraction volumique des granulats afin de maintenir la même résistance visée (20 MPa) ;
5. **Béton ternaire discontinu B20-D4** : Un squelette granulaire discontinu en supprimant la classe granulaire (4/8 mm) et en la remplaçant par une masse égale de graviers (8/15 mm et 15/25 mm) pour une répartition de 50/50 % ; en conservant la même fraction volumique des granulats afin de maintenir la même résistance visée (20 MPa) ;
6. **Béton binaire continu BC20-C2** : Un squelette granulaire continu, composé de sable roulé 0/4 et d'un mélange de trois classes des granulats (4/8 mm ; 8/15 mm et 15/25 mm) considéré comme une seule classe granulaire.

Au total 18 éprouvettes seront confectionnées en raison de 3 éprouvettes par béton. Nous évaluerons ensuite la densité pour chaque type de béton à l'état durci.

2.7 CONCLUSION PARTIELLE

De la description des matériaux utilisés à la caractérisation des bétons d'étude, ce chapitre met en évidence respectivement : tous les essais de caractérisation des matériaux, la méthode utilisée dans la formulation des bétons d'étude, la méthode de Dreux-Gorisse, les essais de caractérisation des bétons d'études et enfin le programme expérimental.

Chapitre 3

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats des essais normalisés, effectués afin d'étudier comparativement les bétons formulés, c'est-à-dire le béton quaternaire, les bétons ternaires et le béton binaire. Il reprend les caractéristiques des constituants obtenus par des essais de caractérisation tels que l'analyse granulométrique, les masses volumiques, le degré de propreté, et l'essai Los Angeles. Les résultats des formulations et les caractéristiques des bétons confectionnés y sont ensuite présentés.

3.2 CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

Dans cette section nous présentons les résultats de l'analyse granulométrique, le module de finesse, le degré de propreté du sable, les masses volumiques absolue et apparente et les résultats de l'essai Los Angeles.

3.2.1 L'analyse granulométrique

La *Figure 3-1* et la *Figure 3-2* présentent respectivement les graphiques des courbes granulométriques des bétons quaternaire et binaire ; l'axe des abscisses reprend les différents modules des tamis (en mm) utilisés et celui des ordonnées les pourcentages cumulés des passants.

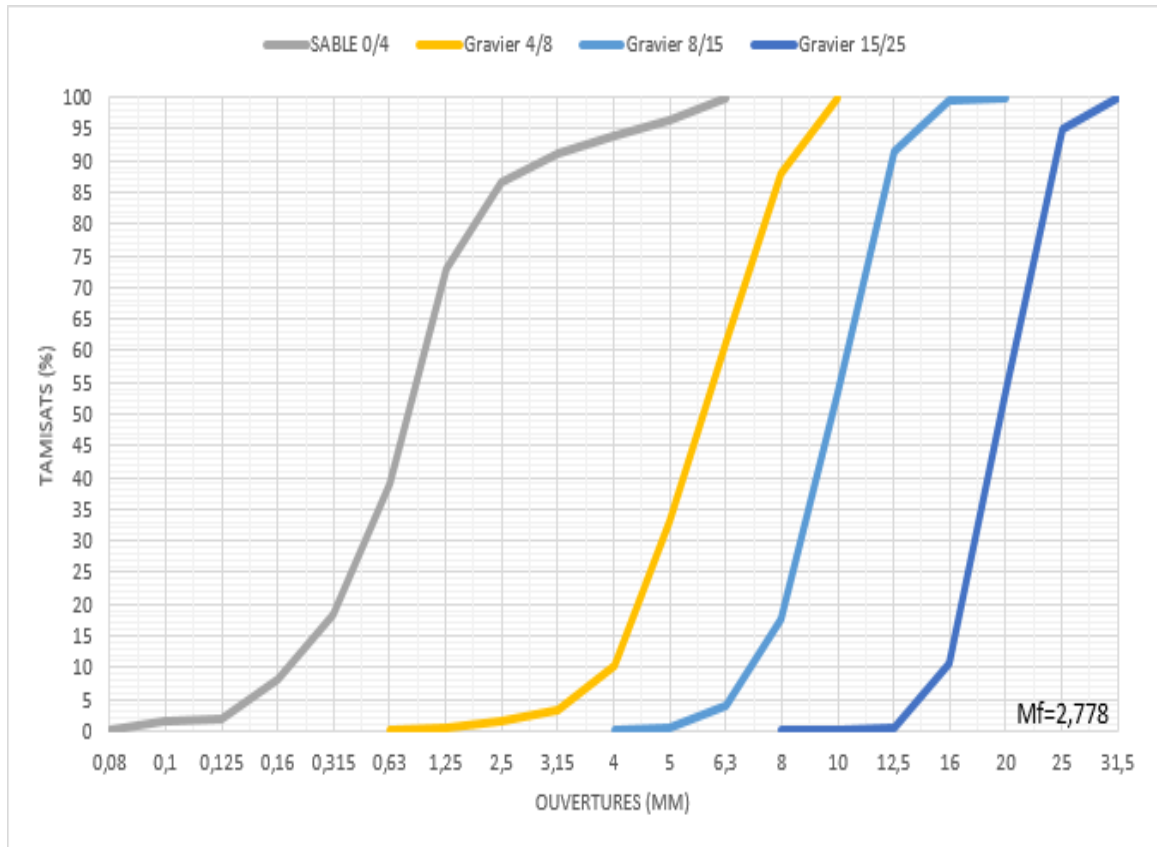


Figure 3-1 Courbes granulométriques du béton quaternaire

L'allure de la courbe granulométrique du sable est en S (couleur grise), sable préférentiel ; elle indique une distribution granulométrique où les particules de différentes tailles sont présentes. La partie inférieure représente les particules fines, tandis que la partie supérieure représente les particules plus grossières. La transition entre ces deux zones est douce, ce qui reflète une gradation continue des tailles de particule.

Les courbes granulométriques des graviers 4/8 mm, 8/15 mm et 15/25 mm montrent une distribution complémentaire, essentielle pour la formulation du béton quaternaire. Le gravier 4/8 mm, avec sa taille fine, permet de remplir les vides entre les particules plus grosses, améliorant ainsi la compacité et la maniabilité. Le gravier 8/15 mm apporte un bon équilibre entre résistance et fluidité, tandis que le gravier 15/25 mm contribue à la résistance structurelle globale. Ensemble, ces trois classes d'agrégats favorisent une densité optimale et une durabilité accrue du béton, tout en minimisant les risques de ségrégation.

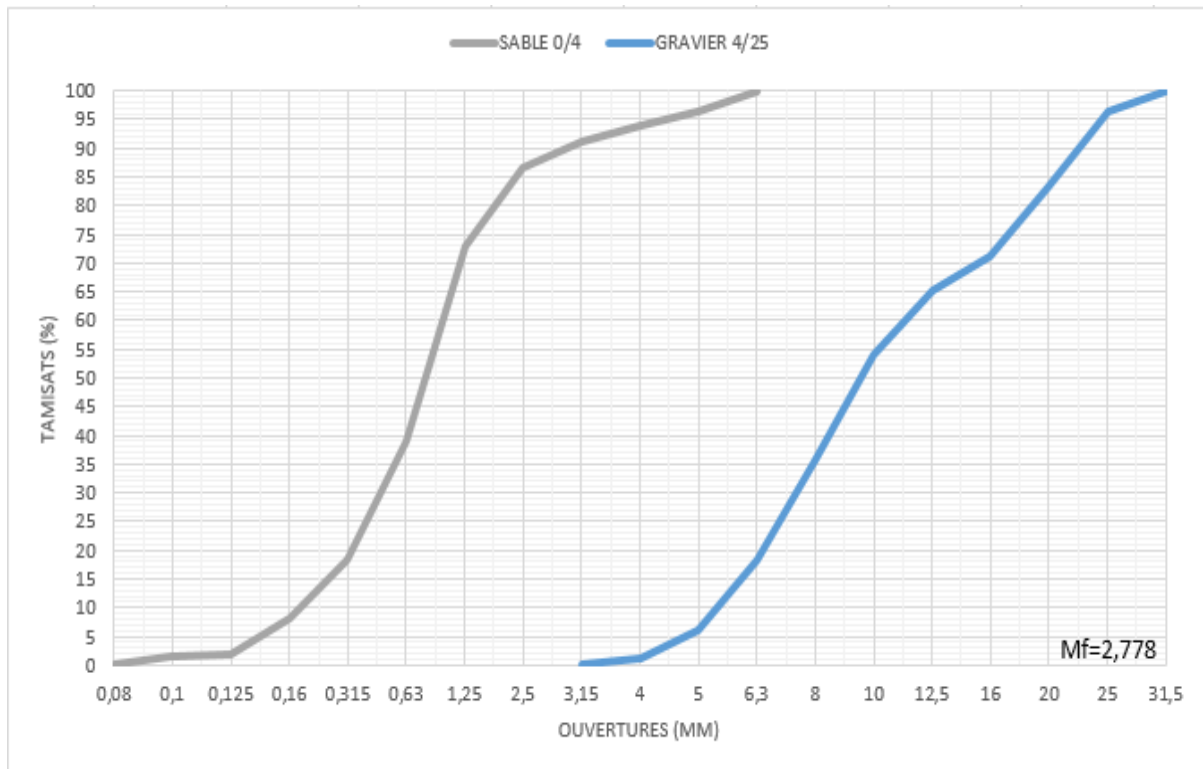


Figure 3-2 Courbes granulométriques du béton binaire

La courbe granulométrique des graviers 4/25 mm montre une distribution équilibrée des tailles de particules, essentielle pour assurer une bonne compacité dans le béton binaire. La présence de granulats de différentes tailles permet de combler efficacement les vides, améliorant ainsi l'adhérence avec la pâte de ciment.

3.2.2 Module de finesse

Le module de finesse obtenu a été de 2,78. Cette valeur se trouvant entre 2,2 et 2,8, cela nous mène à conclure que le sable est bon 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 92,6%. Cette valeur étant supérieure à 80%, ce sable est très propre et convient pour un béton de haute qualité

3.2.4 Masses volumiques des granulats

Les valeurs des masses volumiques absolues et apparentes des granulats sont présentées dans le *Tableau 3-1*.

Tableau 3-1 Valeurs des masses volumiques des granulats

Désignation	Sable roulé	Gravier (4/8)	Gravier (8/15)	Gravier (15/25)	Gravier (4/25)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,60	2,57	2,69	2,71	2,61
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,554	1,29	1,33	1,55	1,45

Les masses volumiques absolues des granulats sont comprises entre 2 g/cm³ et 3 g/cm³ ; il s'agit donc des granulats courants.

3.2.5 Essai Los Angeles

La valeur à l'essai de Los Angeles obtenue est de 20,48% (graviers durs). Cette valeur étant inférieure à 45%, les granulats sont bons pour la confection du béton.

3.2.6 L'absorption d'eau des graviers

Le taux d'absorption des graviers obtenu est de 2,42%. Cette valeur représente la quantité d'eau que ces graviers peuvent absorber.

3.3 RÉSULTATS DE LA FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Dans cette section, sont présentés les résultats obtenus par la méthode de Dreux-Gorisse, de la formulation des bétons quaternaire, ternaires et binaire. Les données de base de la formulation, les différents dosages des constituants ainsi que la distribution des squelettes granulaires sont aussi présentés.

3.3.1 Données de base

Les données de base qui ont servi dans cette étude sont présentées dans le tableau **Tableau 3-2**.

Tableau 3-2 Données de base

Données	Valeurs
Nature de l'ouvrage	Ouvrage ferrailé
Rc28	20 MPa
Consistance	Plastique
Plus grand diamètre (Dmax) en mm	25
Classe vraie du ciment (FCE)	38,5 MPa

3.3.2 Calcul des dosages en divers éléments

Cette section présente les résultats de calculs des dosages en éléments constitutifs du béton notamment le dosage en ciment, le dosage en eau et enfin le dosage en granulats.

3.3.2.1 Dosage en ciment et en eau

La formule (2.8) et la Figure 2-1 nous ont permis de trouver le dosage en ciment et celui en eau pour un m³ de béton. Les valeurs obtenues sont présentées dans le **Tableau 3-3**.

Tableau 3-3 Dosage en ciment et en eau

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	350
Dosage en eau (kg)	207

3.3.3 Dosage en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide des proportions du sable et graviers obtenues à partir de la courbe de référence OAB. Dans le **Tableau 3-4** sont reprises les coordonnées de la courbe de référence.

Tableau 3-4 Coordonnées de la courbe de référence OAB

Désignation	O	A	B
X (mm)	0	11,25	25
Y (%)	0	46,1	100

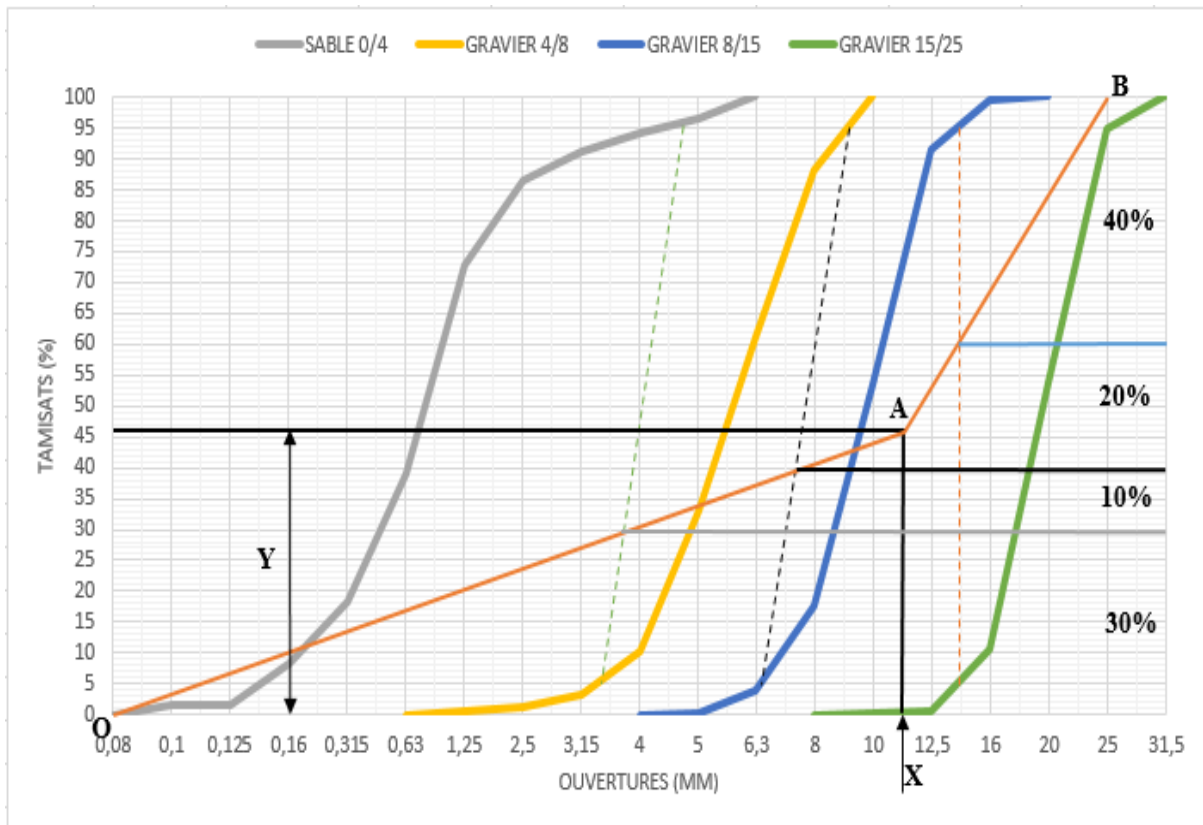


Figure 3-3 Répartition des granulats du béton quaternaire

Il advient de la **Figure 3-3** que le sable entre dans la composition du béton quaternaire à 30%, le gravier 4/8 à 10%, le gravier 8/15 à 20% et le gravier 15/25 à 40%.

**Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines**

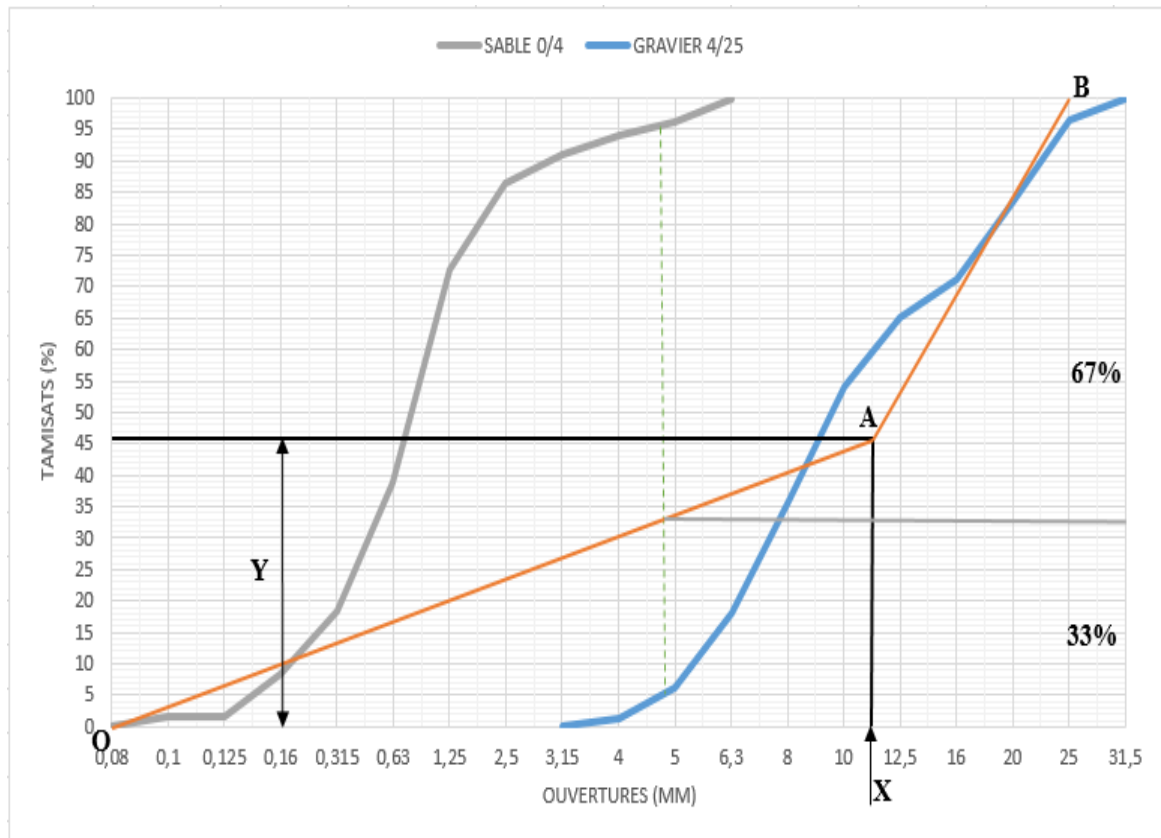


Figure 3-4 Répartition des granulats du béton quaternaire

Il advient de la **Figure 3-4** que le sable entre dans la composition à 33% et les graviers à 67%, pour le béton binaire. Ces pourcentages sont exprimés en fonction de 100% des granulats.

3.3.4 Distribution du squelette granulaire

De ce qui précède, pour mener à bien notre étude, les distributions des squelettes granulaires de différents bétons pour un m³ de béton sont repris dans le **Tableau 3-5**.

Tableau 3-5 Dosages massiques des granulats

Bétons	Sable 0/4		Gravier 4/8		Gravier 8/15		Gravier 15/25		Gravier 4/25	
	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)
BC20-1	30	546	10	180	20	376,6	40	758,8	-	-
BD20-1	30	546	15	270	-	-	55	1043,35	-	-
BD20-2	30	546	20	360	-	-	50	948,5	-	-
BD20-3	30	546	-	-	22,5	423,7	47,5	901	-	-
BD20-4	30	546	-	-	25	470,75	45	853,7	-	-
BC20-2	33	600,6	-	-	-	-	-	-	67	1224

Comme expliqué dans le programme expérimental, pour le béton BD20-1, les 20% du gravier 8/15 du BC20-1 sont repartis en 25% du gravier 4/8 et 75% du gravier 15/25 ; le béton BD20-2, les 20% du gravier 8/15 du BC20-1 sont repartis en 50% du gravier 4/8 et 50% du gravier 15/25 ; le béton BD20-3, les 10% du gravier 4/8 du BC20-1 sont repartis en 25% du gravier 8/15 et 75% du gravier 15/25 ; le béton BD20-4, les 10% du gravier 4/8 du BC20-1 sont repartis en 50% du gravier 8/15 et 50% du gravier 15/25.

3.3.5 Récapitulatif des résultats de la formulation

Les résultats de la formulation par la méthode de Dreux-Gorisse ont présenté les dosages en divers éléments pour chaque béton en étude, notamment les bétons quaternaire, ternaires et binaire. Dans cette section sont récapitulés ces différents dosages pour un m³ de béton et leurs équivalents pour remplir 3 éprouvettes cylindriques (16x32). Le **Tableau 3-6** en est l'illustration.

Tableau 3-6 Dosages définitifs en divers constituants des bétons

		Désignations		Dosages massiques (kg)	
		Bétons	Constituants	Pour 1m ³	Pour 3 éprouvettes (V=0,01930m ³)
Béton quaternaire	BC20-1	Ciment	350	8,1	
		Sable 0/4	546	13	
		Gravier 4/8	180	4,1	
		Gravier 8/15	376,6	8,7	
		Gravier 15/25	758,8	17,56	
		Eau	207	4,79	
Bétons ternaires	BD20-1	Ciment	350	8,1	
		Sable 0/4	546	13	
		Gravier 4/8	270	6,2	
		Gravier 15/25	1043,35	24,1	
		Eau	207	4,79	
	BD20-2	Ciment	350	8,1	
		Sable 0/4	546	13	
		Gravier 4/8	360	8,32	
		Gravier 15/25	948,5	21,9	
		Eau	207	4,79	
	BD20-3	Ciment	350	8,1	
		Sable 0/4	546	13	
		Gravier 8/15	423,7	9,8	
		Gravier 15/25	901	20,8	
		Eau	207	4,79	
	BD20-4	Ciment	350	8,1	
		Sable 0/4	546	13	

***Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines***

		Gravier 8/15	470,75	10,89
		Gravier 15/25	853,7	19,76
		Eau	207	4,79
Béton binaire	BC20-2	Ciment	350	8,1
		Sable 0/4	600,6	14
		Gravier 4/25	1224	28,3
		Eau	207	4,79

3.4 CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS D'ÉTUDE

Dans cette section sont présentées respectivement les caractéristiques des bétons confectionnés à l'état frais et à l'état durci.

3.4.1 Caractéristique des bétons à l'état frais

Le *Tableau 3-7* présente les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams obtenues pour les différents bétons confectionnés.

Tableau 3-7 Valeurs d'affaissement obtenues pour les bétons étudiés

	Bétons	Affaissements (cm)
Béton quaternaire	BC20-1	7
Bétons ternaires	BD20-1	6,9
	BD20-2	6
	BD20-3	8
	BD20-4	7,1
Béton binaire	BC21-2	7,5

Il ressort du *Tableau 3-7* que les différents bétons formulés ont des affaissements compris entre 5 et 9 cm et par conséquent ce sont des bétons plastiques destinés à la construction des semelles coffrées, des murs de soutènement, des planchers, de dallage, des poutres, des poteaux,...

L'écart entre ces affaissements serait dû à la quantité d'eau ajoutée lors de la confection afin d'atteindre l'affaissement souhaité, ainsi que la répartition granulaire qui varie pour chaque béton étudié.

3.4.2 Caractéristiques des bétons à l'état durci

Dans cette section sont présentés les résultats des essais de la résistance à la compression, et de densité sur les éprouvettes cylindriques 16x32 confectionnées dans cette étude, après 28 jours d'immersion dans l'eau.

3.4.2.1 Densité du béton durci

La **Figure 3-5** présente les valeurs de densités obtenues pour les différents bétons à l'état durci.

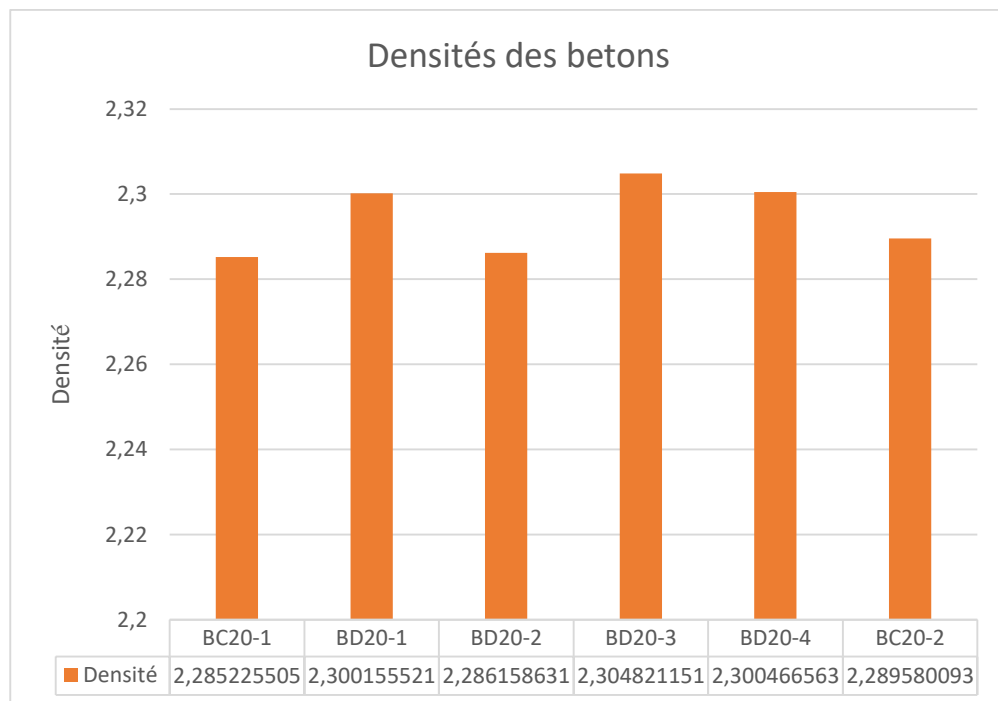


Figure 3-5 Densités obtenues pour les bétons durcis

Il ressort de la **Figure 3-5** que les densités des différents bétons durcis varient légèrement. Le béton BD20-3 présente la densité la plus élevée indiquant une structure interne plus compacte.

3.4.2.2 Résistance à la compression

La **Figure 3-6** présente les résultats de l'essai de la résistance à la compression des bétons étudiés formulés à partir de la méthode de Dreux-Gorisse.

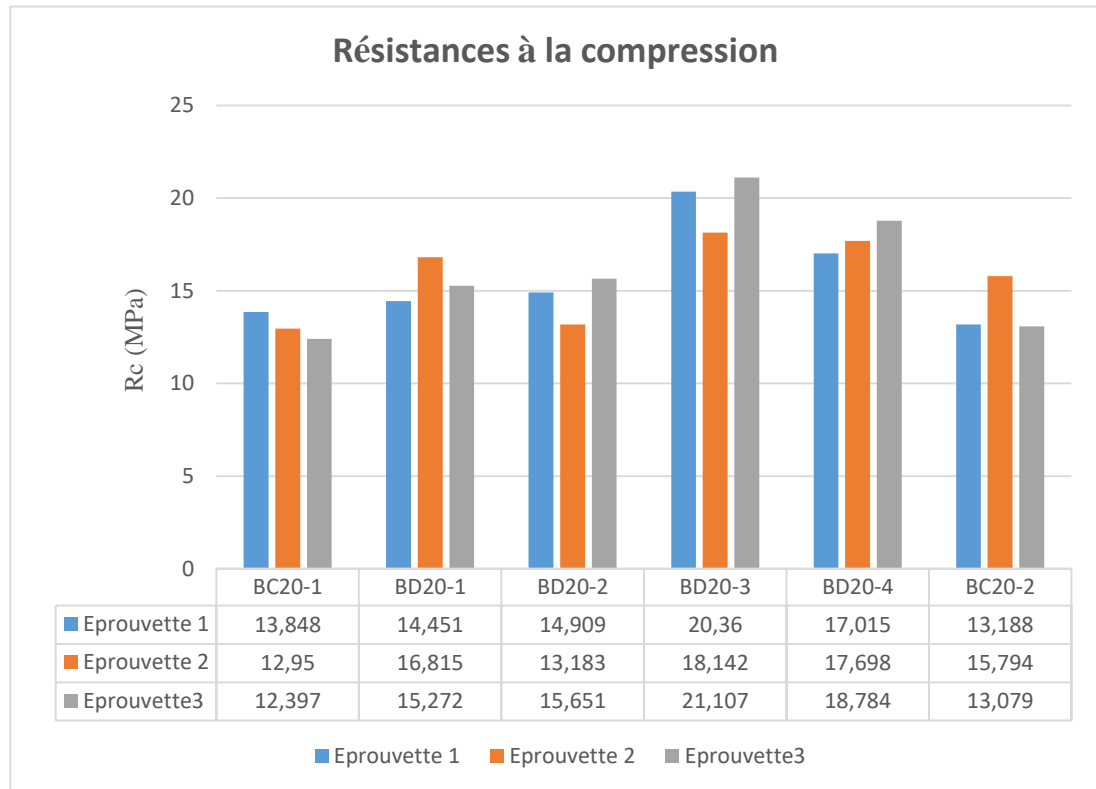


Figure 3-6 Résistances en compression des bétons en étude

D'après la **Figure 3-6**, seuls les bétons ternaires BD20-3 et BD20-4 présentent des résistances moyennes de 19,87 MPa et 17,83 MPa, respectivement, après 28 jours de durcissement. Ces valeurs correspondent à 99,35 % et 89,15 % de la résistance cible de 20 MPa, ce qui les rend acceptables.

Ceci serait dû au fait que les granulats ternaires qui constituent les bétons BD20-3 et BD20-4, utilisent une grande quantité de gros granulats (8/15 et 15/25), réduisant leur surface spécifique et permettant ainsi une meilleure compacité du béton. Cela augmente la densité, comme nous

l'avons remarqué à partir de l'essai précédent, et par conséquent améliore sa résistance à la compression.

Conformément au Chapitre 1(p. 24), les distributions des squelettes granulaires de ces bétons ternaires (BD20-3 et BD20-4) permettent une répartition plus homogène des contraintes à l'intérieur du béton, réduisant ainsi les points de faiblesse et les concentrations de stress (concentration de contrainte) ; ce qui contribue à une meilleure performance mécanique.

Dans la distribution des squelettes granulaires des bétons quaternaires et binaires, il peut y avoir des effets de seuil où certaines tailles de granulats ne sont pas optimisées, créant des zones de faiblesse. Pour la distribution du squelette granulaire quaternaire, la diversité des tailles peut augmenter le risque de ségrégation des particules fines et grossières, ce qui peut entraîner une distribution inégale des granulats et affecter la résistance

La combinaison de ces facteurs permet au béton avec des granulats ternaires d'atteindre une résistance à la compression supérieure en optimisant la compacité et la répartition des contraintes.

3.5 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

Dans cette partie, nous évaluons les coûts de production pour chaque 1m³ de béton étudié. Le *Tableau 3-8* illustre les différents prix.

Tableau 3-8 Les coûts de production de chaque béton étudié

	Bétons	Coûts (\$)
Béton quaternaire	BC20-1	142,612
Bétons ternaires	BD20-1	142,550
	BD20-2	142,405
	BD20-3	142,891
	BD20-4	142,883
Béton binaire	BC21-2	141,235

Nous remarquons à partir *Tableau 3-8* que les bétons étudiés présentent des coûts de production presque identiques pour 1 m³ de béton suite au dosage en ciment et à la fraction volumique de granulats qui sont restés constants.

Par ailleurs, malgré ce même dosage, nous avons une différence de résistance ; ceci implique que pour remonter les résistances des bétons dont les squelettes granulaires n'ont pas permis d'obtenir une bonne résistance, il faudra augmenter le dosage en ciment ; ce qui a un impact direct sur le coût de production sachant que c'est le ciment qui coûte cher dans le béton.

3.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce dernier chapitre a porté sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus suivant la démarche présentée au chapitre précédent. Nous y avons donc présenté les caractéristiques des granulats, les résultats de la formulation des bétons étudiés ainsi que leurs caractéristiques. L'évaluation économique de ces bétons y est aussi présentée. Nous avons alors observé, par les essais de densité et de résistance à la compression, que, les bétons BD20-3 et BD20-4 présentent des distributions des squelettes granulaires optimales donnant de valeur intéressantes de densité, et par conséquent des résistances à la compression de 19,87 MPa et 17,83 MPa qui sont des valeurs très proches de la résistante recommandée comprise entre 20 et 40 MPa.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail a porté sur l'étude de l'influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton, dont l'application a été faite sur un béton ordinaire, avec comme but la détermination expérimentale de la distribution du squelette granulaire qui donnerait un béton avec de bonnes propriétés de résistance, d'ouvrabilité et un coût de production raisonnable. Ce que nous avons qualifié dans ce travail de béton idéal.

Il a donc été question d'étudier les matériaux entrant dans la composition des bétons et de procéder à la formulation de ces bétons par la méthode de Dreux – Gorisse. Nous avons ainsi fixé les trois paramètres suivants : fraction volumique de granulats, diamètre maximal des granulats « $D_{max}=25\text{mm}$ » et la résistance visée à la compression (20 MPa) ; et avons testé six bétons de distributions granulaires différentes : B20-C1, B20-D1, B20-D2, B20-D3, B20-D4 et B20-C2 ; afin d'aboutir aux résultats de ce travail.

Ainsi, au terme de ce travail, nous avons fait quelques constats tel que :

- Les mélanges ternaires des granulats qui constituent les bétons BD20-3 et BD20-4, utilisent une grande quantité de gros granulats (8/15 et 15/25), réduisant leur surface spécifique et permettant ainsi une meilleure compacité du béton. Cela augmente la densité, respectivement 2,3048 et 2,3004 ; et réduit la porosité du béton, par conséquent améliore sa résistance à la compression (19,87 MPa et 17,83 MPa). Cependant, le mélange quaternaire des granulats constituant le béton BC20-1, avec une densité inférieure de 2,285, présente des effets de seuil où certaines tailles de granulats ne sont pas optimisées, créant des zones de faiblesse et augmentant le risque de ségrégation des particules fines et grossières, ce qui peut entraîner une distribution inégale des granulats et affecter la résistance, donnant ainsi une résistance de 13,065MPa, soit 65,32% de la résistance escomptée ;

- Les différents bétons formulés ont des affaissements compris entre 5 et 9 cm et par conséquent ce sont des bétons plastiques destinés à la construction des semelles coffrées, des murs de soutènement, des planchers, de dallage, des poutres, des poteaux, etc. L'écart entre ces affaissements est dû à la quantité d'eau ajoutée lors de la confection afin d'atteindre l'affaissement souhaité, ainsi que la répartition granulaire qui varie pour chaque béton étudié ;
- Malgré le même dosage en ciment, nous avons constaté une différence de résistance ; ceci implique que pour remonter les résistances des bétons dont les squelettes granulaires n'ont pas permis d'obtenir une bonne résistance, il faudra augmenter le dosage en ciment ; ce qui a un impact direct sur le coût de production du béton sachant que le ciment est le constituant le plus coûteux du mélange.

Eu égard à ce qui précède, les distributions ternaires des squelettes granulaires qui constituent les bétons BD20-3 et BD20-4, ont donné des caractéristiques qui avoisinent le plus celles du béton ordinaire que nous recherchons dans ce travail, notamment une bonne ouvrabilité : 8 et 7,1, et des résistances admissibles : 19,87 MPa et 17,83 MPa.

Ce travail, s'étant limité à l'évaluation expérimentale de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton par la méthode de Dreux - Gorisse, et en gardant constants certains paramètres tel que le diamètre maximal, la résistance visée et la fraction volumique des granulats ; n'a pas abordé un programme numérique permettant de prévoir la résistance du béton dépendamment de la distribution du squelette granulaire choisi, d'une autre méthode de formulation ou d'un diamètre maximal variable . Il ouvre ainsi une brèche aux futurs chercheurs qui aimeraient approfondir les études avec une autre méthode, en variant les paramètres et /ou sur une modélisation numérique de la prévention du comportement du béton afin de réaliser de logiciels informatiques d'aide à la formulation des bétons.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Muhindo Wa Muhindo, «Etude comparative des propriétés du béton formulé à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma,» FSTA, ULPGL, GOMA, 2016-2017.
- [2] G. Nigri, «Technologie du béton,» Faculté des sciences et de la Technologie, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, 2020.
- [3] J. Festa et G. Dreux, Nouveau guide du beton et de ses consyituants, Paris: Eyrolles, 2006.
- [4] A. Boukais et Z. Dahou, «L’effet du squelette granulaire sur le développement de la FPZ dans le béton – Apport de la technique d’émission acoustique,» p. 9, 2023.
- [5] F. Boumaza-Zeraoulia et M. Behim, «Formulation des bétons autoplacants : Optimisation du squelette granulaire par la méthode de Dreux - Gorisse,» p. 10, 2013.
- [6] Cimebéton, Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre, Paris, Janvier 2013.
- [7] A. Alinabiwe, «Physique et technologie du béton,» FSTA, ULPGL, GOMA, 2021-2022.
- [8] M. Vénuat, La pratique des ciments mortiers et bétons, 1976.
- [9] F. Dr. Ngagüe, «Cours de physique et technologie du béton,» FSTA, ULPGL, Goma, 2018.
- [10] C. A. Akeza, «Etude et formulation d'un béton autoplaçant par la méthode de Dreux-Gorisse,» FSTA, ULPGL, Goma, 2019.
- [11] P. Guiraud et B. Daubilly, «Classification des bétons dans la norme benton NF EN 206+A2/CN,» chez *Infociments*, Octobre 2022.
- [12] P. Badesire, «Cours de physique et technologie du béton,» Faculté des sciences appliquées, UCS, Goma, 2021-2022.
- [13] J. Bolomey, Durcissement des mortiers et bétons, Paris: Rouge et Cie, 1925.
- [14] W. Fuller and S. Thompson, The laws of proportioning concrete, Transactions of ASCE, Volume 59, ASCE, 1907.

- [15] J. Faury, Le béton: Influence de ses constituants- Regles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers 3ieme édition, Paris, France: Dunod, 1944.
- [16] J. Baron et J.-P. Olivier, Les BETONS, Bases et données pour leur formulation, Paris: Editions Eyrolles, 1996.
- [17] H. Hamid, Influence des parametres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais, Paris: Université Paris-Est: école doctorale des sciences, ingénieure et environnement, 2012.
- [18] P. M. Lompo, «Etude de la qualité du sable sur les propriétés physico-mécanique d'un béton courant,» Ouagadougou, Juillet 2017.
- [19] F. Larrard et P. Tondat, «Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton. Materials and structures,» pp. 505-516, Novembre 1993.
- [20] R. Zouaoui, K. Miled et O. Limam, «Prédiction des propriétés élastiques du béton par un modele micromécanique discret,» Université de Tunis El Manar, Laboratoire de Genie Civil, Tunis, May 2015.
- [21] F. De Larrad et A. Belloc, «L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons,» Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Nantes, France, 1990.
- [22] S. Bensalem, «Principales pathologies des constructions,» Juillet 2018.
- [23] A. Masumbuko Murhonyi, «Contribution à l'étude comparative et analyse des différentes propriétés des bétons confectionnés à base des differents types de ciments utilisés dans la ville de Goma,» ULPGL, Goma, 2021-2022.
- [24] H. Kabbab, «Les essais de laboratoire sur les matériaux de construction,» Laboratoire national de l'habitat et de la construction, Algérie.
- [25] «Norme Francaise P 18-553, Granulats-Préparation d'un échantillon pour essais, AFNOR,» Septembre 1990.

- [26] F. Moncef et B. Mohamed, «Caractérisations géotechniques des granulats de la carrière de l'Euch en vue de leur utilisation comme matériaux pour béton,» Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi- Borj Bou Arreridj, Algérie, 2022.

ANNEXES

Annexe A

ESSAIS SUR LES GRANULATS

A.1 COMPOSITIONS GRANULOMÉTRIQUES

A.1.1 Sable 0/4

NUMERO TAMIS		OUVERTURES		REFUS CUMULÉS		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTEM	AFNOR	(kg)	%	%
1/4"	39	6,35	6,3	0	0	100
3/16"	38	4,76	5	0,092	3,68	96,32
5	37	4	4	0,152	6,08	93,92
6	36	3,36	3,15	0,226	9,04	90,96
8	35	2,38	2,5	0,34	13,6	86,4
166	32	1,19	1,25	0,68	27,2	72,8
30	29	0,59	0,63	1,526	61,04	38,96
50	26	0,315	0,315	2,042	81,68	18,32
100	23	0,16	0,16	2,292	91,68	8,32
120	22	0,125	0,125	2,456	98,24	1,76
140	21	0,1	0,1	2,46	98,4	1,6
200	20	0,08	0,08	2,5	100	0

A.1.2 Gravier 4/8

NUMERO TAMIS		OUVERTURES		REFUS CUMULÉS		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTEM	AFNOR	(kg)	%	%
1/3"	40	7,93	8	0,298	11,92	88,08
1/4"	39	6,35	6,3	0,97	38,8	61,2
3/16"	38	4,76	5	1,678	67,12	32,88

74

*Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines*

5	37	4	4	2,244	89,76	10,24
6	36	3,36	3,15	2,416	96,64	3,36
8	35	2,38	2,5	2,466	98,64	1,36
16	32	1,19	1,25	2,486	99,44	0,56
30	29	0,59	0,63	2,488	99,52	0,48
200	20	0,08	0,08	2,5	100	0

A.1.3 Gravier 8/15

NUMERO TAMIS		OUVERTURES		REFUS CUMULÉS		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTEM	AFNOR	(kg)	%	%
3/4"	44	19,1	20	0	0	100
2/3"	43	16,9	16	0,016	0,64	99,36
1/2"	42	12,7	12,5	0,212	8,48	91,52
3/8"	41	9,52	10	1,166	46,64	53,36
1/3"	40	7,93	8	2,056	82,24	17,76
1/4"	39	6,35	6,3	2,404	96,16	3,84
3/16"	38	4,76	5	2,42	96,8	3,2
5	37	4	4	2,49	99,6	0,4
6	36	3,36	3,15	2,5	100	0

A.1.4 Gravier 15/25

NUMERO TAMIS		OUVERTURES		REFUS CUMULÉS		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTEM	AFNOR	(kg)	%	%
1"	45	25,4	25	0,128	5,12	94,88
3/4"	44	19,1	20	1,158	46,32	53,68
2/3"	43	16,9	16	2,232	89,28	10,72
1/2"	42	12,7	12,5	2,486	99,44	0,56
3/8"	41	9,52	10	2,494	99,76	0,24
1/3"	40	7,93	8	2,5	100	0

*Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines*

A.1.5 Gravier 4/25

NUMERO TAMIS		OUVERTURES		REFUS CUMULÉS		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTEM	AFNOR	(kg)	%	%
11/4"	46	31,7	31,5	0	0	100
1"	45	25,4	25	0,105	3,5	96,5
3/4"	44	19,1	20	0,51	17	83
2/3"	43	16,9	16	0,87	29	71
1/2"	42	12,7	12,5	1,044	34,8	65,2
3/8"	41	9,52	10	1,377	45,9	54,1
1/3"	40	7,93	8	1,938	64,6	35,4
1/4"	39	6,35	6,3	2,454	81,8	18,2
3/16"	38	4,76	5	2,814	93,8	6,2
5	37	4	4	2,97	99	1
6	36	3,36	3,15	3	100	0

A.2 MASSES VOLUMIQUES

A.2.1 Masses volumiques absolues

	Essais	Sable roulé	Gravier 4/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Gravier 4/25
V1(ml)		500	500	500	500	500
m(g)		300	300	300	300	300
V2(ml)	Essai 1	615	616	610	611	616
V2(ml)	Essai 2	616	617	613	610	619
ρ (abs)	Essai 1	2,60	2,58	2,72	2,70	2,58
ρ (abs)	Essai 2	2,586	2,56	2,65	2,72	2,52
ρ (abs) (moyen) (g/cm ³)		2,6	2,57	2,69	2,71	2,61

A.2.2 Masses volumiques relatives

	Essais	Sable roulé	Gravier 4/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Gravier 4/25
V1(cm3)		198,8	923,35	923,35	923,35	923,35
m1(g)	Essai 1	310	1200	1230	1435	1336
m2(g)	Essai 2	311	1190	1240	1445	1340
ρ (app)	Essai 1	1,55	1,29	1,332	1,55	1,446
ρ (app)	Essai 2	1,56	1,288	1,342	1,56	1,451
ρ (app) (moyen) (g/cm3)		1,554	1,29	1,33	1,55	1,45

A.3 ÉQUIVALENT DE SABLE

Désignation		Éprouvette 1	Éprouvette 2	Moyenne
Lecture visuelle	H ₁ (cm)	9,8	10,2	
	H ₂ (cm)	10,4	10,7	
lecture à piston	H ₁ ' (cm)	9,1	10	
ESV (%)		94,2308	95,3271	
ESP (%)		87,5	93,4579	90,479

Annexe B

ESSAIS SUR LES BÉTONS DURCIS

B.1 DENSITÉ

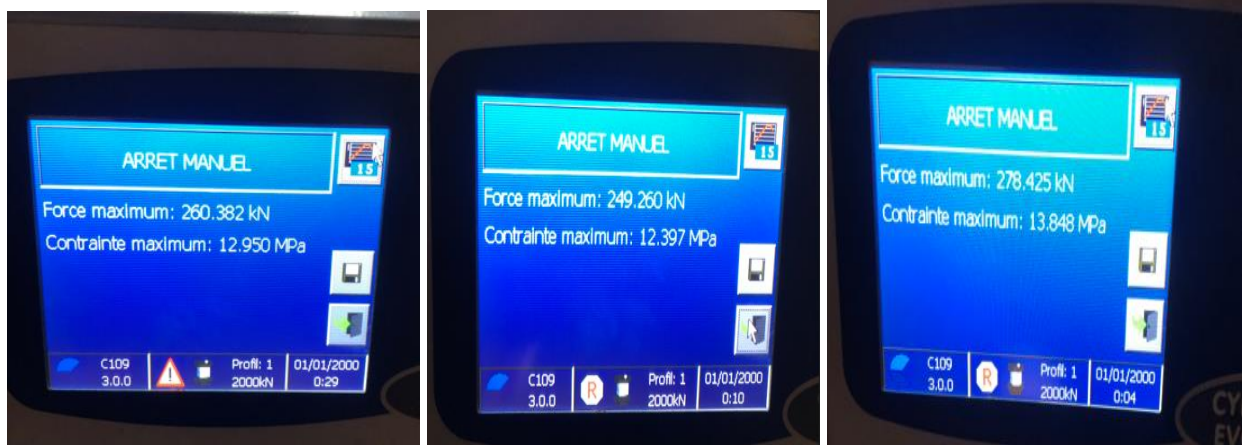
Désignation	Masse moyenne (Kg)	Volume (m3)	ρ_w (kg/m3)	Densité
BC20-1	14,694	0,00643	1000	2,28522551
BD20-1	14,79	0,00643	1000	2,30015552
BD20-2	14,7	0,00643	1000	2,28615863
BD20-3	14,82	0,00643	1000	2,30482115
BD20-4	14,792	0,00643	1000	2,30046656
BC20-2	14,722	0,00643	1000	2,28958009

B.2 RÉSISTANCE EN COMPRESSION

	Bétons	Désignations	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
Béton quaternaire	BC20-1	Force (kN)	278,425	260,382	249,260	262,689
		Rc28 (Mpa)	13,848	12,950	12,397	13,065
Bétons ternaires	BD20-1	Force (kN)	290,547	338,091	307,064	311,90
		Rc28 (Mpa)	14,451	16,815	15,272	15,51
	BD20-2	Force (kN)	299,761	265,060	314,689	293,17
		Rc28 (Mpa)	14,909	13,183	15,651	14,58
	BD20-3	Force (kN)	409,371	364,773	424,384	399,51
		Rc28 (Mpa)	20,360	18,142	21,107	19,87
	BD20-4	Force (kN)	342,100	355,847	377,680	358,54
		Rc28 (Mpa)	17,015	17,698	18,784	17,83
	BC20-2	Force (kN)	265,155	317,566	262,959	281,89

Béton binaire		Rc28 (Mpa)	13,188	15,794	13,079	14,02
---------------	--	------------	--------	--------	--------	-------

B.2.1 Béton quaternaire BC20-1



B.2.2 Béton ternaire BD20-1



B.2.3 Béton ternaire BD20-2



B.2.4 Béton ternaire BD20-3



B.2.5 Béton ternaire BD20-4



*Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton :
application à un béton ordinaire ; Par Bengi-babuya BWIRIRE Ines*

B.2.6 Béton binaire BC20-2

