

**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**  
**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



BP. 368 GOMA

[www.ulpgl.net](http://www.ulpgl.net)

**INFLUENCE MORPHOLOGIQUE DES  
GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE  
BÉTON ORDINAIRE**

Par **KAZENZEL TSIBANGU Célestin**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de  
Bachelor en Sciences et Technologies Appliquées

**Option : Génie civil**

**Directeur:** Dr. Eng. MUHINDO WA MUHINDO  
Abdias

**Encadreur :** Ir. BISIMWA Franklin

**ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025**

## **Epigraphe**

« La résistance d'un ouvrage commence par le choix judicieux des matériaux qui le composent »

**Eugène Freyssinet**

## **In memoriam**

À la mémoire de notre très chère père TSHIBANGU John

## **Dédicace**

À tous les membres de ma famille.

**KAZENZEL TSIBANGU Célestin**

## Remerciements

La réalisation de ce travail résulte non seulement de nos efforts personnels, mais aussi du soutien et des contributions de plusieurs personnes. Ce serait de l'ingratitude de notre part de ne pas reconnaître leur précieuse contribution.

Nous rendons avant tout grâce à l'Éternel Dieu pour la vie, la santé et la sagesse qu'il n'a cessé de nous accorder tout au long de ce parcours académique.

Nos sincères remerciements s'adressent également à notre directeur, Dr. Eng. MUHINDO WA MUHIDO Abdias, qui, malgré ses multiples responsabilités, a accepté de diriger ce travail. Nous exprimons aussi notre gratitude à notre encadreur, l'ingénieur BISIMWA MURHULA Franklin pour son accompagnement et le temps consacré à l'encadrement de cette étude.

Nous adressons une profonde reconnaissance à ma très chère mère NYABITA MONGAYI Mirelle, pour son amour, ses sacrifices, son soutien moral et ses encouragements constants tout au long de mon parcours académique.

Nous exprimons également notre sincère gratitude au couple Robert TSHIBANGU pour leur soutien tant morale, matériels et financiers ont été d'une grande importance pour l'aboutissement de cette étude. Nous adressons également nos remerciements à la Docteure Divine pour son soutien, son attention et ses encouragements.

Nous exprimons aussi notre gratitude envers nos frères et sœurs : Rachel TSIBANGU, Josephine TSHIBANGU, Georges TSHIBANGU et Esther TSHIBANGU, pour leur soutien, leur affection et les moments partagés ensemble. Nos pensées reconnaissantes vont également à nos collègues et camarades, avec qui nous avons partagé les joies et les difficultés de cette expérience académique. Enfin, nous remercions toutes les personnes dont les noms ne sont pas mentionnés ici, mais qui ont contribué, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail. Qu'elles trouvent à travers ces lignes l'expression de notre gratitude.

**KAZENZEL TSIBANGU Célestin**

## Résumé

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le domaine du génie civil. Il est principalement constitué de ciment, d'eau et de granulats. Les granulats occupent une proportion importante dans la composition du béton et jouent un rôle déterminant dans ses propriétés mécanique et physique. Le présent travail porte sur l'étude de l'influence morphologique des granulats sur les propriétés du béton ordinaire. L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence de la morphologie des granulats sur les propriétés physique, mécanique du béton ordinaire. Pour apprécier cette influence, les essais morphologiques réalisés sur les granulats ont concerné principalement la détermination de l'indice d'aplatissement et de l'indice de forme. Pour atteindre cet objectif il a été procédé dans un premier temps à la caractérisation des différents constituants du béton, notamment le ciment et les granulats. Les essais réalisés ont permis de déterminer les propriétés physique et mécanique des granulats ainsi que leurs caractéristiques morphologiques. Ensuite, la formulation des bétons d'études a été réalisée suivant la méthode de Dreux-Gorisse. Trois types de graviers ont été utilisés pour la confection des bétons, à savoir les graviers concassés, les graviers tout-venants et les graviers roulés. Des éprouvettes de béton ont été confectionnées et soumises à des essais de résistance à la compression à différents âges. Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression du béton augmente progressivement avec l'âge du béton, notamment entre 7 jours, 14 jours et 28 jours. L'analyse des résultats à l'âge de 28 jours montre que le béton à base des graviers concassés présente une résistance moyenne de 15,25 Mpa, tandis que le béton à base des graviers tout-venants présente une résistance moyenne de 13,15 Mpa et celui à base des graviers roulés une résistance moyenne de 11,3 Mpa. Ces résultats montrent que la morphologie des granulats influence les propriétés mécaniques du béton. Les granulats concassés améliorent la résistance grâce à leur meilleure adhérence avec la pâte de ciment, tandis que les granulats roulés offrent une meilleure maniabilité mais des résistances plus faibles.

**Mots clés : Morphologie des granulats, indice d'aplatissement, indice de forme.**

## **Abstract**

Concrete is one of the most widely used construction materials in the field of civil engineering. It is mainly composed of cement, water, and aggregates. Aggregates occupy a significant proportion in the composition of concrete and play a determining role in its mechanical and physical properties. The present work focuses on the study of the morphological influence of aggregates on the properties of ordinary concrete. The main objective of this study is to analyze the influence of aggregate morphology on the physical and mechanical properties of ordinary concrete. To assess this influence, the morphological tests carried out on the aggregates mainly concerned the determination of the flakiness index and the shape index. To achieve this objective, the first step consisted of the characterization of the different constituents of concrete, namely cement and aggregates. The tests carried out made it possible to determine the physical and mechanical properties of the aggregates as well as their morphological characteristics. Then, the formulation of the study concretes was carried out according to the Dreux-Gorisse method. Three types of gravel were used for the production of the concrete, namely crushed gravel, all-in gravel, and rounded gravel. Concrete specimens were prepared and subjected to compressive strength tests at different ages. The results obtained show that the compressive strength of concrete increases progressively with the age of the concrete, particularly between 7 days, 14 days, and 28 days. The analysis of the results at the age of 28 days shows that concrete made with crushed gravel presents an average strength of 15,25 Mpa, while concrete made with all-in gravel presents an average strength of 13,15 Mpa and that made with rounded gravel an average strength of 11,3 Mpa. These results show that the morphology of aggregates influences the mechanical properties of concrete. Crushed aggregates improve strength due to their better adhesion with the cement paste, whereas rounded aggregates offer better workability but lower strengths.

**Keywords: Aggregate morphology, flakiness index, shape index**

## Liste des abréviations

<b>AFNOR</b>	: Association Française de Normalisation
<b>Ab</b>	: Absorption d'eau
<b>BHP</b>	: Béton à hautes performances
<b>C</b>	: Dosage en ciment
<b>C/E</b>	: Rapport ciment sur eau
<b>CHF</b>	: Ciment de haut fourneau
<b>d</b>	: Densité du béton durci
<b>Dmax</b>	: Diamètre maximale
<b>ES</b>	: Equivalent sable
<b>FI</b>	: Indice d'aplatissement
<b>G</b>	: Coefficient granulaire
<b>LA</b>	: Los Angeles
<b>Mpa</b>	: Méga pascal
<b>Mf</b>	: Module de finesse
<b>NF EN</b>	: Norme française – Norme Européenne
<b>S</b>	: Dosage en sable
<b><math>\rho</math></b>	: Masse volumique
<b>ULPGL</b>	: Université Libres des Pays des Grands Lacs

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 Liste des différents types des ciments courants</i> .....	8
<i>Tableau 1.2 Classification des ciments selon la résistance</i> .....	9
<i>Tableau 1.3 Familles des granulats</i> .....	12
<i>Tableau 1.4 classification des bétons selon les masses volumiques</i> .....	16
<i>Tableau 1.5 Classification des bétons en fonction de leurs résistances</i> .....	17
<i>Tableau 2.1 interprétation de l'indice d'aplatissement</i> .....	36
<i>Tableau 2.2 Tableau 2.2 Interprétation de l'indice de forme</i> .....	37
<i>Tableau 2.3 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable</i> .....	40
<i>Tableau 2.4 les valeurs du coefficient granulaire G</i> .....	50
<i>Tableau 2.5 corrections sur le dosage en eau en fonction de Dmax</i> .....	52
<i>Tableau 2.6 Valeur du coefficient correcteur K</i> .....	53
<i>Tableau 2.7 Valeurs du coefficient de compacité</i> .....	54
<i>Tableau 2.8 Classes de consistance des bétons</i> .....	58
<i>Tableau 3.1 Coefficient d'uniformité et de courbure</i> .....	66
<i>Tableau 3.2 Indice d'aplatissement des graviers</i> .....	67
<i>Tableau 3.3 Coefficient de forme des graviers</i> .....	68
<i>Tableau 3.4 Masse volumique absolue et apparente des granulats</i> .....	69
<i>Tableau 3.5 Absorption d'eau des graviers</i> .....	69
<i>Tableau 3.6 la consistance du ciment</i> .....	71
<i>Tableau 3.7 Données de base pour la formulation</i> .....	72
<i>Tableau 3.8 Coordonnées des courbes de référence OAB</i> .....	74
<i>Tableau 3.9 Dosage massique des granulats du béton</i> .....	74

## Liste des figures

<i>Figure 1.1 Procédés de fabrication du ciment</i> .....	7
<i>Figure 2.1 Ciment CIMERWA 42.5N</i> .....	29
<i>Figure 2.2 Granulats utilisés : (1) Sable de Rwanda, (2)Graviers concassés, (3)Graviers tout-venants, (4)Graviers roulés</i> .....	30
<i>Figure 2.3 Appareillage de l'essai d'analyse granulométrique</i> .....	32
<i>Figure 2.4 Appareillage de l'équivalent de sable</i> .....	39
<i>Figure 2.5 Rapport C/E en fonction de la consistance exigée du béton</i> .....	51
<i>Figure 3.1 Courbe granulométrique de sable</i> .....	64
<i>Figure 3.2 Courbe granulométrique du gravier concassé</i> .....	64
<i>Figure 3.3 Courbe granulométrique du gravier tout-venant</i> .....	65
<i>Figure 3.4 Courbe granulométrique du gravier roulé</i> .....	65
<i>Figure 3.5 Coefficient Los Angeles</i> .....	70
<i>Figure 3.6 Dosage en ciment et en eau</i> .....	73
<i>Figure 3.7 Valeur de l'affaissement</i> .....	75
<i>Figure 3.8 Densités des bétons à l'état durci</i> .....	76
<i>Figure 3.9 Résistance à la compression</i> .....	77

# Sommaire

## Table des matières

Epigraphe .....	i
In memoriam .....	ii
Dédicace .....	iii
Remerciements .....	iv
Résumé .....	v
Liste des abréviations .....	vii
Liste des tableaux .....	viii
Liste des figures .....	ix
Sommaire .....	x
0. Introduction générale .....	1
0.1. Contexte/Généralités sur le thème .....	1
0.2. Identification et formulation du problème .....	1
0.3. Questions de recherche .....	2
0.4. Formulation des hypothèses .....	2
0.5. Justification du choix du sujet et motivations .....	2
0.6. Énoncé des objectifs de recherche .....	3
0.6.1. L'objectif général .....	3
0.7. Méthodologie et délimitation du travail .....	3
0.8. Structure du mémoire/ Subdivision du travail .....	4
Chapitre 1 : GENERALITES SUR LE BETON .....	5
1.1 INTRODUCTION .....	5
1.2 CONSTITUANTS DU BETON .....	5
1.2.1 Le ciment .....	5

1.2.2	L'eau de gâchage.....	9
1.2.3	Les granulats .....	10
1.2.4	Les adjuvants.....	15
1.3	CLASSIFICATION DES BETONS .....	16
1.3.1	Classification des bétons selon la masse volumique .....	16
1.3.2	Classification des bétons selon leur résistance .....	17
1.3.3	Classification des bétons selon la destination .....	17
1.3.4	Classification des bétons selon le genre de liant utilisé.....	17
1.4	TYPOLOGIE DES BETON.....	18
1.4.1	Béton ordinaire.....	18
1.4.2	Béton armé .....	18
1.4.3	Béton précontraint .....	18
1.4.4	Bétons à hautes performances (BHP).....	18
1.4.5	Les bétons fibrés .....	19
1.4.6	Les béton autoplaçants (BAP).....	19
1.5	QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON .....	19
1.5.1	Méthode de Dreux-Gorisse .....	19
1.5.2	Méthode de bolomey .....	20
1.5.3	Méthode de faury .....	21
1.5.4	Méthode d'Abrams.....	21
1.5.5	Méthode de caquot .....	21
1.5.6	Méthode de valette .....	22
1.5.7	Méthode de Fuller-Thompson.....	22
1.6	PROPRIÉTÉS DU BETON.....	22
1.6.1	Propriétés à l'état frais.....	23
1.6.2	Propriétés à l'état durci.....	23
1.7	PATHOLOGIES DU BETON.....	24
1.7.1	Les pathologies physico-chimiques.....	24
1.7.2	Les pathologies mécaniques .....	26
1.8	CONCLUSION PARTIELLE .....	27
Chapitre 2 . METHODOLOGIE.....		28

2.1	INTRODUCTION .....	28
2.2	NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS .....	28
2.2.1	Le ciment .....	28
2.2.2	L'eau de gâchage.....	29
2.2.3	Les granulats .....	29
2.3	CARACTERISATION DES CONSTITUANTS .....	30
2.3.1	Échantillonnage.....	31
2.3.2	Analyse granulométrique.....	31
2.3.3	L'indice d'aplatissement.....	34
2.3.4	Coefficients de forme des graviers.....	36
2.3.5	Le degré de propreté de sable .....	37
2.3.6	Masse volumique apparente.....	40
2.3.7	Masse volumique absolue.....	41
2.3.8	Taux d'absorption d'eau .....	42
2.3.9	Essai Los Angeles .....	43
2.3.10	Essai de consistance .....	45
2.4	FORMULATION DU BETON .....	46
2.4.1	Méthode de Dreux-Gorisse .....	46
2.4.2	Principe de formulation .....	47
2.4.3	Etape de formulation .....	47
2.5	CARACTERISATION DU BETON .....	56
2.5.1	Caractéristique du béton à l'état frais.....	56
2.5.2	Caractérisation du béton à l'état durci.....	58
2.6	PROGRAMME EXPERIMENTAL .....	61
2.7	CONCLUSION PARTIELLE .....	62
Chapitre 3 . PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS. 63		
3.1	INTRODUCTION .....	63
3.2	CARACTERISATION DES MATERIAUX .....	63
3.2.1	Analyse granulométrique.....	63
3.2.2	Coefficient d'uniformité Cu et de courbure Cz .....	66
3.2.3	Module de finesse.....	66

3.2.4	Indice d'aplatissement .....	66
3.2.5	Coefficient de forme.....	67
3.2.6	Degré de propreté de sable.....	68
3.2.7	Masse volumique.....	68
3.2.8	Taux d'absorption d'eau .....	69
3.2.9	Essai Los Angeles .....	69
3.2.10	Essai de consistance .....	70
3.3	RESULTATS DE LA FORMULATION DU BETONS .....	71
3.3.1	Données de base de la formulation .....	71
3.3.2	Calcul des dosages.....	72
3.4	CARACTERISTIQUES DU BETON.....	74
3.4.1	Caractéristique à l'état frais .....	74
3.4.2	Caractéristique à l'état durci .....	76
3.5	CONCLUSION PARTIELLE .....	78
	CONCLUSION GENERALE .....	79
	BIBLIOGRAPHIE .....	82
	Annexe A . ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRANULTAS .....	86
	Annexe B . EQUIVALENT DE SABLE .....	87
	Annexe C . MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES GRANULATS .....	88
	Annexe D MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES GRANULATS .....	89
	Annexe E ESSAI LOS ANGELES POUR LES GRAVIERS .....	90
	Annexe F ABSORPTION D'EAU DES GRAVIERS .....	91
	Annexe G RESULTATS DE L'ESSAI DE COMPRESSION .....	92
	Annexe H COEFFICIENT DE FORME ET D'APLATISSEMENT DES GRAVIERS .....	94
	Annexe I COURBE DE REFERENCE DES GRAVIERS.....	99



## **0. Introduction générale**

### **0.1. Contexte/Généralités sur le thème**

Le béton est actuellement le matériau de construction le plus utilisé en raison de sa résistance élevée, de la grande disponibilité de sa matière première et de son faible coût [1]

Il est un matériau composite, constitué des granulats, liants, eau et éventuellement des adjuvants, le granulat est communément considéré comme une charge inerte, qui représente 60 à 80% du volume du béton. Bien que le granulat soit considéré comme une charge inerte, il s'agit d'un composant nécessaire cela définit les propriétés thermique et élastique du béton et stabilité dimensionnelle [2]

Le granulat exige pour leur meilleure utilisation, une connaissance rigoureuse de leurs caractéristiques étant donné que, même à l'œil nu, ils diffèrent suivant la nature des roches desquelles ils proviennent, la forme de leur particule, leurs compositions chimique et minéralogique, leur comportement physique et mécanique [3]

Le granulat rend le béton non seulement plus économique en occupant un volume plus important, mais ils lui confèrent également une stabilité volumique et augmentent sa durabilité. La forme des particules de granulats peut influencer significativement certaines propriétés du béton frais comme durci [4]

### **0.2. Identification et formulation du problème**

La formulation du béton repose généralement sur des paramètres classiques tels que la granulométrie et le dosage de constituants, tandis que la morphologie des granulats est souvent peu considérée. Pourtant, des granulats de types différents, notamment différents types de graviers, peuvent présenter des formes et des textures variées influençant le comportement du béton. Dans cette étude, l'utilisation de trois types de graviers met en évidence que des granulats distincts peuvent engendrer des variations de maniabilité, de demande en eau et de résistances mécaniques. Ces différences rendent parfois difficile la maîtrise de performances du béton. Ainsi, la non-prise en compte des caractéristiques morphologiques constitue une limite dans les méthodes classiques de formulation. Il devient alors nécessaire d'analyser l'influence des différents types de granulats sur les propriétés du béton ordinaire.

### **0.3. Questions de recherche**

Dans le cadre de cette étude, plusieurs questions de recherche ont été formulées.

- Comment la demande en eau et la maniabilité d'un béton seraient-elles affectées par l'utilisation de granulats concassés, roulés et tout-venant ?
- Quelle serait la corrélation entre la texture des granulats concassés, roulés et tout-venant et la résistance mécanique du béton ?
- En quoi la morphologie des granulats concassés, roulés et tout-venant influencerait-elle les propriétés du béton ordinaire à l'état frais, notamment l'ouvrabilité ?

### **0.4. Formulation des hypothèses**

Pour répondre à ces questions, des hypothèses ont été formulées.

- L'utilisation de granulats concassés entraînerait une augmentation de la demande en eau pour une ouvrabilité donnée, en raison de leur forme anguleuse et de leur surface spécifique plus élevée, contrairement aux granulats roulés qui nécessitent moins d'eau. Les granulats tout-venant présenteront un comportement intermédiaire.
- Les granulats concassés, en raison de leur rugosité et de leur meilleur emboîtement, conduiraient à une résistance mécanique plus élevée du béton durci, tandis que les granulats roulés offriront une résistance légèrement inférieure. Les granulats tout-venant devraient présenter des performances intermédiaires.
- Les granulats roulés amélioreraient l'ouvrabilité du béton grâce à leur forme arrondie, alors que les granulats concassés réduiront cette ouvrabilité en raison de leur angularité. Les granulats tout-venant, étant un mélange hétérogène, présenteront un comportement intermédiaire.

### **0.5. Justification du choix du sujet et motivations**

Le choix du sujet est motivé par son importance dans le domaine du génie civil et de la science de matériau, pour cette thématique l'intérêt porté à la durabilité et à la performance des bétons locaux mais aussi d'un constat pratique en laboratoire avec des variations de consistances ou de résistance, parfois significative sur des bétons formulés strictement avec les mêmes dosages ou avec dosages

différents, mais aussi avec des lots de granulats différents. Sur le plan scientifique la recherche contribuera à enrichir les connaissances sur l'effet de la morphologie granulaire sur les propriétés mécanique et physique du béton. Sur le plan social et économique ce travail aidera les praticiens à mieux choisir les sources de granulat en fonction des performances recherchées et cela permettra de réduire le coût, d'améliorer la durabilité des ouvrages et aussi assurer la sécurité des infrastructures

## **0.6. Énoncé des objectifs de recherche**

### **0.6.1. L'objectif général**

L'objectif général est d'analyser l'influence de la morphologie des granulats sur les propriétés physique, mécanique du béton ordinaire.

### **0.6.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques**

Pour que cet objectif soit atteint, nous avons formulés les objectifs spécifiques suivants :

- Identifier et caractériser les propriétés morphologiques des granulats
- Etudier l'influence de la morphologie granulaire sur les résistances mécanique du béton
- Comparer les résistances mécaniques de béton réaliser avec des granulats de morphologie différentes lié à leur forme et texture de surface (sphériques, cubiques, allongés, surface lisse, surface rugueuse)
- Evaluer l'impact de la forme des granulats sur la maniabilité et la demande en eau du béton à l'état frais

## **0.7.Méthodologie et délimitation du travail**

La méthodologie de ce travail repose sur une approche expérimentale en laboratoire. Des essais seront réalisés sur des échantillons de béton afin de mesurer l'impact de l'utilisation de granulats de différentes morphologies. En ce qui concerne la délimitation de ce travail, il sera délimité à l'étude de l'influence de deux morphologies qui sont : leur indice de forme et leur indice d'aplatissement des graviers concassés, roulés et tout-venants sur les propriétés du béton ordinaire, sans aborder l'impact d'autres types de granulats ou d'autres ajouts.

## **0.8. Structure du mémoire/ Subdivision du travail**

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres en plus de l'introduction et de la conclusion :

- **Chapitre 1 : Revue de la littérature ;**

Ce chapitre expose les connaissances théoriques sur les granulats, en décrivant leurs types, leurs caractéristique morphologique et leur rôle dans la composition du béton. Il présente aussi les propriétés du béton ordinaire, la relation entre les caractéristiques des granulats et le comportement du béton.

- **Chapitre 2 : méthodologie et protocole expérimental ;**

Le deuxième chapitre décrit de manière détaillée les matériaux utilisés dans les essais, ainsi que les différentes méthode et procédures expérimentales appliquées pour étudier l'influence de la morphologie des granulats.

- **Chapitre 3 : présentation et analyse des résultats.**

Ce troisième chapitre présente les résultats obtenus lors des essais réalisés sur les différents types de granulats et les bétons correspondant. Les données expérimentales y sont analysées et interprétées afin de mettre en évidence l'effet de la morphologie des granulats sur les propriétés physique et mécanique du béton.

# **Chapitre 1 : GENERALITES SUR LE BETON**

## **1.1 INTRODUCTION**

Le béton est l'un de matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction. Il occupe une place prépondérante en génie civil et en bâtiment car il offre une grande souplesse d'usage et de formulation. Dans un contexte général, le terme « béton » désigne un mélange d'eau, de ciment ou liant, et de granulats choisis de façon rationnelle [5].

Une bonne connaissance des propriétés des matériaux de construction permet de bien utiliser et de construire des ouvrages solides, durable et économique, etc. on y incorpore les adjuvants à faible dose afin d'améliorer ses propriétés.

Le présent chapitre traite des généralités sur le béton en présentant notamment ses constituant, la classification des bétons, les différents types des bétons, les méthodes de formulation du béton, les propriétés du béton, la pathologie du béton.

## **1.2 CONSTITUANTS DU BETON**

Le béton est un matériau hétérogène formé des plusieurs constituant, notamment : les granulats, liant, eau et adjuvants. La composition des différents constituants à une influence sue la qualité du béton c'est-à-dire sur les caractéristique physiques et mécanique du béton.

### **1.2.1 Le ciment**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence de l'eau. Il forme une pate faisant prise qui durci progressivement à l'air ou même sous l'eau [6]. C'est le constituant fondamentale du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. La quantité de ciment à introduire dans un mélange de béton est déterminée en fonction de plusieurs paramètres, notamment la nature du béton à produire, l'usage prévu de l'ouvrage, le niveau de résistance attendu, ainsi que les caractéristiques des granulats employés. Ce dosage joue un rôle déterminant dans le développement des propriétés mécaniques du béton, en particulier sa résistance.

### 1.2.1.1 Constituants du ciment [7]

Le ciment est composé de plusieurs constituants clés :

- **Le clinker** : c'est le constituant principal des ciment, obtenu par cuisson du calcaire-argile. Il contient principalement quatre phase minérales (silicates et aluminates de calcium) désignées chimiquement  $C_3S$  (le silicate tricalcique),  $C_2S$  (le silicate bi-calcique),  $C_3A$  (aluminate tricalcique) et  $C_4AF$ . Ces phases fournissent l'essentiel de la résistance mécanique du ciment durci.
- **Le gypse** : ajouté en faible proportion (2-5 %) au clinker broyé pour réguler la prise du ciment Portland (CEM I).
- **Les constituants additionnels** : il s'agit de matières minérales incorporées (en général jusqu'à 35%) pour conférer des propriétés spécifique ou écologique au ciment. On trouve notamment : le laitier de haut fourneau (scorie granulée d'acier, noté S) aux propriétés hydrauliques latentes, les cendres volantes (V) et pouzzolanes (Z) à effet pouzzolanique, le calcaire fin (L) pour améliorer la compacité, et la fumée de silice (D) pour augmenter les résistances.

### 1.2.1.2 Procédé de fabrication du ciment [8]

La fabrication du ciment comporte plusieurs étapes principales dont nous avons : l'extraction, le concassage, la préparation du cru, la cuisson, le refroidissement, broyage, stockage, ensachage et expédition. *La figure 1.1* montre les procédés pour la fabrication du ciment.

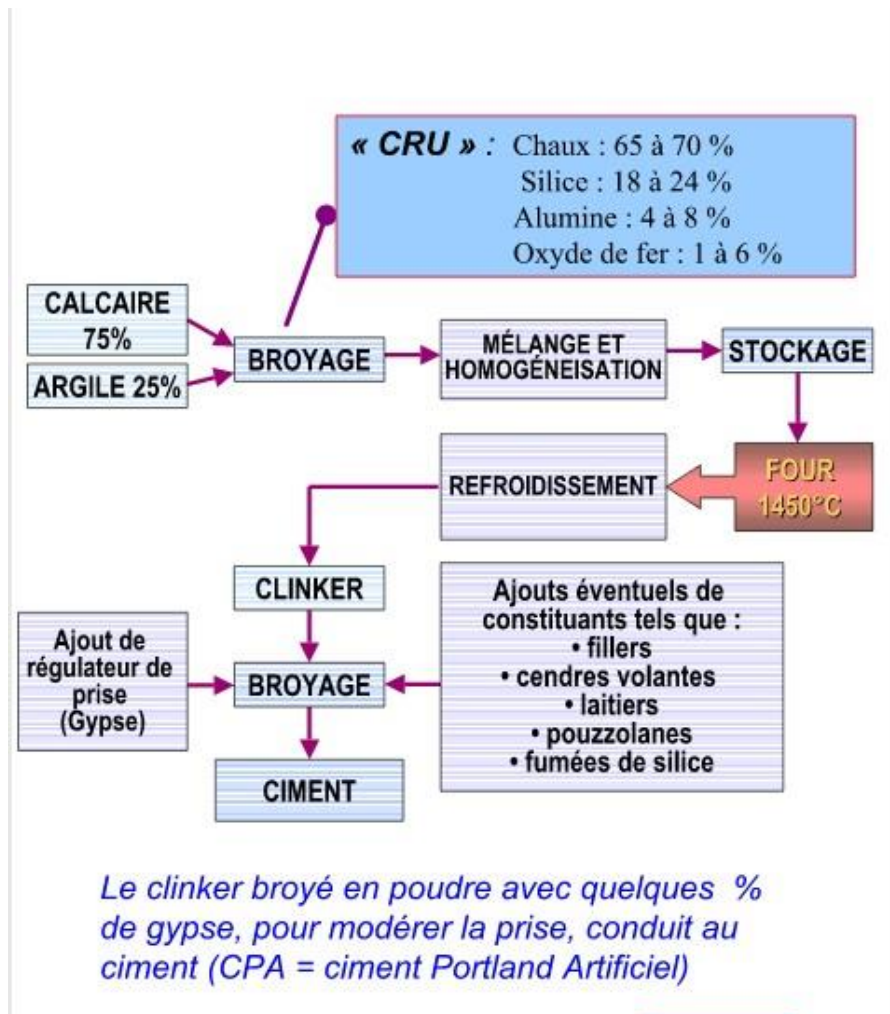


Figure 1.1 Procédés de fabrication du ciment

### 1.2.1.3 Types de ciment

#### a) Types de ciments selon leurs constituants

Les types de ciment sont fonction de la teneur en clinker ainsi que de constituant secondaire. Les ciments sont actuellement classés sous la dénomination CEM suivi d'un chiffre romain allant de I à V suivi d'une lettre majuscule en fonction de leur teneur en clinker et d'autres composants selon la norme NF EN 197-1. *Le tableau 1.1* ci-dessous présente la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent [3].

**Tableau 1.1 Liste des différents types des ciments courants**

<b>Désignations</b>	<b>Type de ciments</b>	<b>Teneur en clinker</b>	<b>Teneur en % de l'un des constituants suivants : Laitier-pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes fumées de silice</b>	<b>Teneur en constituants secondaires</b>
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%.

**b) Types de ciments selon leur résistance**

Les ciments sont répartis en trois classe de résistance normale à 28 jours, de sous-classe « R » sont associées à ces 3 classes principales pour designer des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées : classe 32,5 ; 42,5 ; 52,5 [9]. La classification des ciments selon la résistance est donnée dans le *tableau 1.2*.

*Tableau 1.2 Classification des ciments selon la résistance*

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	-					

**1.2.2 L'eau de gâchage**

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

L'eau de gâchage est la qualité d'eau que l'on utilise pour la fabrication du béton. Elle entre directement dans la composition de la gâchée du béton [10]. Son rôle est double : elle déclenche l'hydratation du ciment (permettant la prise et le durcissement du béton) et assure la maniabilité du béton frais pour sa mise en place. Autrement dit, sans eau le ciment ne peut pas réagir pour lier les granulats, et sans une quantité suffisante de pâte liquide le béton ne serait pas plastifiable.

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication des béton armés ou précontraints [11]. La quantité d'eau de gâchage influence fortement les

caractéristiques du béton frais et durci. Un excès d'eau augmente la fluidité (l'ouvrabilité) du mélange mais au prix d'une résistance réduite et d'une durabilité amoindrie. A l'inverse, un béton trop sec (eau insuffisante) ne permettra pas une hydratation complète du ciment, réduisant l'adhérence aux granulats et la résistance finale [10]. 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/m<sup>3</sup>. 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. En pratique, les dosages de béton usuels donnent souvent un E/C compris entre 0,4 et 0,6 [12].

### **1.2.3 Les granulats**

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant du recyclage. Ces matériaux sont quelque fois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation est abandonnée depuis fort longtemps car ce terme signifie tout simplement une réunion de substance diverses formant un tout non homogène [3].

#### **1.2.3.1 Classification selon la provenance**

Les granulats sont classés en trois grandes catégories selon la provenance :

##### **a) Les granulats naturels [11]**

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine et artificiels dans les autres cas. Parmi cette catégorie nous avons les granulats roulés ainsi que les granulats concassés.

##### **❖ Les granulats roulés**

Les granulats roulés 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, ils sont obtenus par criblage, lavage, dragage ou soit par extraction. Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature notamment les granulats de rivière, les granulats de mer et les granulats de dunes.

#### ❖ **Les granulats concassés**

Les granulats concassés quant à eux sont obtenus par concassage, abattage des 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. Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte du ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités.

#### **b) Les granulats artificiels [13]**

Les granulats artificiels proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais. Dans cette catégorie on retrouve aussi les sous-produits industriels tel que les laitiers de haut fourneau, les scories, les centres volants et les résidus de mines. Nous pouvons ainsi citer les granulats légers, de laitier et spéciaux.

#### ❖ **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**

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

#### ❖ **Les granulats spéciaux**

Ils 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.

#### 1.2.3.2 Classification selon la grosseur [11]

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres. Le terme « granulats d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour la dimension minimale des grains à D pour la dimension maximal des grains. Les dimensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2). Les familles des granulats sont présentées dans le *tableau 1.3*.

**Tableau 1.3 Familles des granulats**

Fines 0/D	Où $D \leq 0.080\text{mm}$
Sables 0/D	Où $D \leq 6.3\text{mm}$
Gravillons d/D	Où $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 31.5\text{mm}$
Cailloux d/D	Où $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 80\text{mm}$
Graves 0/D	Où $6.3\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$
Ballasts d/D (concassés)	Où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$

La détermination des valeurs de d et D des classes granulaires d/D ainsi définies se fait en considérant que les granulats correspondant à ces dimensions doivent être présent en proportions suffisantes.

#### 1.2.3.3 Classification selon la masse volumique

Les granulats sont dits légers lorsque leur masse volumique réelle ( $\rho_r$ ) est inférieure à  $2\text{g/cm}^3$ , courants si  $\rho_r$  est comprise entre  $2\text{g/cm}^3$  et  $3\text{g/cm}^3$  et lourds au-delà de  $3\text{g/cm}^3$ . Les granulats les plus utilisés dans les bâtiments et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre  $2\text{g/cm}^3$  et  $3\text{g/cm}^3$  [6].

### **1.2.3.4 Paramètres morphologique des granulats**

La morphologie de granulats est déterminante pour le comportement du béton. Elle englobe la géométrie des particules (formes usuelles, dimension, etc.). Les granulats peuvent avoir plusieurs formes très diverses : sphérique (arrondie), cubique, nodulaire, plate ou allongé acquise selon leur origine.

#### **a) La forme**

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

La forme d'un granulats est définie par sa longueur  $L$ , son épaisseur  $E$  qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles, sa grosseur  $G$  [3].

#### **b) L'indice d'aplatissement [14]**

L'indice d'aplatissement est défini par la norme EN 933-3 :2012 comme le pourcentage en masse des particules dont l'épaisseur est inférieure à une valeur limite déterminée en fonction de leur classe granulométrique. Contrairement aux anciennes méthodes françaises basées sur le rapport direct entre la dimension de maille carrée minimale et l'épaisseur de grain, la norme européenne adopte une approche fondée sur la dimension moyenne de chaque fraction granulométrique. Un grain est considéré comme aplati lorsque son épaisseur est inférieure à 0,6 fois la dimension moyenne de la fraction à laquelle il appartient. Cette méthode permet une harmonisation des résultats à l'échelle européenne et assure une meilleure cohérence entre les différents laboratoires.

Le domaine d'application de cette norme couvre les granulats naturels, artificiels et recyclés dans les bétons hydrauliques, les bétons bitumineux, les couches de fondation et les ouvrages routiers. Elle s'applique principalement aux granulats dont la dimension est supérieure à 4mm.

#### **c) L'indice d'allongement [15]**

L'indice d'allongement est déterminé conformément à la norme NF EN 933-4. Il caractérise la proportion de particules dont la longueur excède une limite proportionnelle à leur dimension

moyenne. Selon cette norme un grain est considéré comme allongé lorsque sa longueur est supérieure à 1,8 fois la dimension moyenne de la fraction granulométrique correspondante. Cet indice, exprimé en pourcentage, permet d'évaluer la présence de particules longues susceptibles de créer de points de concentration de contraintes au sein du matériau.

Les particules allongées peuvent en effet compromettre l'imbrication des granulats, réduire la stabilité des couches granulaires et favoriser la fissuration dans les béton soumis à des sollicitation mécanique importantes. Dans le domaine routier, un excès de grains allongés peut diminuer la résistance à l'orniérage et altérer le comportement des couches de base.

#### **d) La texture de surface [16]**

La texture de surface (rugosité) concerne l'état microscopique des grains. On distingue souvent deux types : surface lisse (grains polis, typiques des alluvion) et surface rugueuse (grains concassés à l'aspect granuleux). Les surfaces rugueuses favorisent l'accrochement mécanique de la pâte cimentaire et augmente la résistance à l'arrachement, ce qui peut améliorer la résistance finale du béton. Toutefois, elles accroissent aussi le frottement interne et la demande en eau pour compenser la perte de maniabilité. En somme, une texture de granulats rugueuse tend à renforcer la cohésion et la résistance à la compression du béton durci, au pris d'une perte d'ouvrabilité (besoin en eau).

#### **e) L'angularité**

L'angularité d'un granulats est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et des rapports de concassages. Une angularité assez forte favorise l'adhérence mécanique entre les granulats et le mortier. Par contre, chaque fois qu'on recherche un angle de frottement interne élevé, on préfère employer des particules angulaires de faible sphéricité [17].

#### **f) La sphéricité [18]**

La sphéricité est un paramètre morphologique qui caractérise le degré de ressemblance d'un granulats avec une sphère parfaite. Elle est définie comme le rapport entre la surface d'une sphère ayant le même volume que la particule et la surface réelle de cette particule. Sa valeur est comprise entre 0 et 1, où 1 correspond à une sphère parfaite et les valeurs plus faibles indiquent des formes irrégulières, aplaties ou allongées. Une sphéricité élevée améliore la maniabilité du béton, car les

grains roulent plus facilement les uns sur les autres et réduisent le frottement interne. En revanche, une sphéricité faible augmente l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats, ce qui peut améliorer la résistance mécanique du béton durci.

### **1.2.3.5 Influence des paramètres morphologique des granulats sur les propriétés du béton [19]**

#### **a) Maniabilité du béton frais**

La maniabilité dépend fortement de la forme et de la texture de surface des granulats. Les grains anguleux et rugueux entraîne une demande en eau plus élevée pour atteindre la même fluidité qu'avec des grains arrondis.

#### **b) Résistance mécanique**

La morphologie des granulats agit aussi sur la résistance du béton durci. Les granulats anguleux et rugueux procurent un meilleur ancrage mécanique dans la pâte de ciment, augmentant la résistance à la compression. La densité de compactage (compacité) joue un rôle : un mélange bien empilé (bonne granularité, grains anguleux) limite les vides et les défauts internes. En revanche, la présence de particules très plates ou allongées crée des zones faibles sous contrainte (risque de fissuration).

#### **c) Durabilité du béton**

La durabilité (résistance aux cycles gel-dégel, agression chimique, etc.) dépend en grande partie de la quantité de l'interface ciment-granat et du volume des vides. Des granulats à surface rugueuse et anguleuse renforce l'ancrage de la pâte et réduisent porosité de l'interface, ce qui améliore la durabilité globale du béton. A l'inverse, la présence d'élément plats ou cassants génère des zones internes fragile propices aux microfissures et à la dégradation prématurée.

## **1.2.4 Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faible quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0,4% du poids du béton) afin d'en améliorer

certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton [20].

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]. Les principaux adjuvant sont : les plastifiants, les super plastifiants, les retardateurs de prise, les accélérateurs de prise, les entraineurs d'air, les hydrofuges, les rétenteurs d'eau, etc.

### 1.3 CLASSIFICATION DES BETONS

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

#### 1.3.1 Classification des bétons selon la masse volumique

Suivant la masse volumique du béton, on distingue le béton très lourd (extra lourd), le béton lourd, le béton léger et le béton très léger. Le *tableau 1.4* présente la classification des bétons selon les masses volumiques [11].

*Tableau 1.4 classification des bétons selon les masses volumiques*

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 [11].

### 1.3.2 Classification des bétons selon leur résistance

Pour classer le béton selon la résistance, on réalise des essais à la compression des éprouvettes cylindriques de dimension (11 x22 ; 16 x 32 ; 25 x 50). Les dimensions sont en 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  $f_{ck}$  [11]. La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leurs résistances caractéristiques à la compression suivant le *tableau 1.5*.

**Tableau 1.5 Classification des bétons en fonction de leurs résistances**

<b>Classe</b>	<b>C12/15</b>	<b>C16/20</b>	<b>C20/25</b>	<b>C25/30</b>
f <sub>ck</sub> , Cyl (Mpa)	12	16	20	25
f <sub>ck</sub> , cube (Mpa)	15	20	25	30

Dans ce tableau 1.5  $f_{ck, Cyl}$  est la résistance caractéristique mesurée sur les éprouvettes cylindriques,  $f_{ck, cube}$  est la résistance caractéristique mesurée sur des éprouvettes cubiques.

### 1.3.3 Classification des bétons selon la destination

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 chaussées, etc.).

### 1.3.4 Classification des bétons selon le genre de liant utilisé

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. [11].

## **1.4 TYPOLOGIE DES BÉTON**

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 léger, le béton précontraint, le béton autoplaçant, le béton à haute performance, le béton armé, le béton fibré, etc. [3].

### **1.4.1 Béton ordinaire**

Le béton ordinaire est un mélange homogène composé exclusivement des constituants de base : ciment, granulat, eau, avec un rapport C/E qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Il est largement utilisé pour sa résistance à la compression et sa facilité de mise en œuvre.

### **1.4.2 Béton armé**

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

### **1.4.3 Béton précontraint**

Le béton précontraint est une forme de béton utilisée dans la construction. Au moment de la fabrication, le béton va être compressé à l'aide de câble de précontrainte en acier. 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.

### **1.4.4 Bétons à hautes performances (BHP)**

Les bétons à hautes performances se caractérisent par une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 Mpa sur cylindre et par son rapport Eau /liant équivalent inférieur à 0,4. Ils présentent une micro texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs. La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci.

### **1.4.5 Les bétons fibrés**

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui représente un comportement plus homogène. Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2% en volume soit de 5 à 150 kg par m<sup>3</sup> de béton.

### **1.4.6 Les béton autoplaçants (BAP)**

Les béton autoplaçant se caractérisent par leur fluidité, un faible ressuage, leur pompabilité ainsi qu'un bon maintien de leur ouvrabilité. Ils sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Les béton autoplaçant épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, ils ne doivent pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

## **1.5 QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON**

La formulation d'un béton, revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, de gravier, de l'eau entrant dans la composition d'un mètre cube de béton partant des propriétés recherchées.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes ; elles aboutissent à des dosages volumétrique ou de préférence pondéreux, le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac [3] . Dans cette section, nous présentons, de façon sommaire, certaines méthodes de formulation du béton.

### **1.5.1 Méthode de Dreux-Gorisse**

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

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

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

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par l'essai au cône d'Abrams [21].

### **1.5.2 Méthode de bolomey**

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m<sup>3</sup> ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

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

La formule de base est la formule 1.1 :

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

Avec :

- P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ;
- D : est le diamètre des plus gros grains ;
- A : la valeur de A dépendra de la consistance souhaitée de béton, La provenance des granulats.

Elle varie de 6 à 16, étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue [21].

### 1.5.3 Méthode de faury

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

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

Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi et du Rayon moyen du moule [21].

L'effet de paroi est déterminé à l'aide de la relation 1.2 et le rayon moyen du moule par la relation 1.3.

$$EP = \frac{D}{R} \quad (1.2)$$

$$R = \frac{\text{volume du béton (aciers déduit)}}{\text{surface de tout ce qui est en contact du béton}} \quad (1.3)$$

### 1.5.4 Méthode d'Abrams

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

Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduit au minimum [3].

### 1.5.5 Méthode de caquot

Caquot a proposé, dès 1937, une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètre maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise

en œuvre, la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains [3].

### **1.5.6 Méthode de valette**

Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». On calcule d'abord le dosage de sable et du ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment [3].

### **1.5.7 Méthode de Fuller-Thompson**

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 [22].

$$P_{fuller\ Thompson} = \frac{100 \times 5\sqrt{d}}{D} \quad (1.4)$$

Avec :

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

## **1.6 PROPRIÉTÉS DU BETON**

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés. Le béton possède deux types de comportement dont à l'état frais et à l'état durci.

### **1.6.1 Propriétés à l'état 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. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : le dosage en ciment, la forme et dimensions des granulats, granulométrie, dosage en eau, emploi des adjuvants. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau puisse être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par la diminution de la compacité et corrélativement, des résistances et par un phénomène de ressuage, qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation [23].

Le teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité, d'hydratation du ciment et de respect des spécification liées à la classe d'exposition à laquelle est soumis l'ouvrage [23].

### **1.6.2 Propriétés à l'état durci**

Le béton durci est principalement caractérisé par sa résistance mécanique. Le béton est un matériau travaillant bien en compression. Dons la connaissance de ses propriétés mécanique est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Le béton est ainsi plus résistant à la compression mais moins résistant en traction.

Cette résistance du béton à la compression est fonction des certains paramètres notamment le rapport C/E, résistance du ciment, la qualité des granulats, le degré de compacité du mélange et les conditions de durcissement :

- Les ciments qui ont une activité élevée, c'est-à-dire une résistance à 28 jours élevée, donnent des bétons plus résistants.
- Plus le béton est compacté, plus il est résistant car le volume des pores est réduit. Il faudra donc bien compacter le béton pour réduire le volume des pores autant que possible, mais tout en évitant la ségrégation.

- Le milieu ambiant influe sur l'accroissement de la résistance du béton. Les conditions normales de durcissement du béton sont l'humidité relative de l'air entre 90 et 100% et une température de  $20 \pm 20$  C.

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 et cette résistance se détermine à l'aide des différents essais mécanique destructifs ou non destructifs [24].

## **1.7 PATHOLOGIES DU BETON**

Tout au long de son existence, le béton est soumis à de multiples phénomènes (climatique, physico-chimique, mécaniques, etc.) pouvant entraîner de potentiels désordre et dégradations impactant directement la santé des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages. Il existe plusieurs types de pathologie dont voici quelques-unes.

### **1.7.1 Les pathologies physico-chimiques**

#### **a) La carbonatation**

La carbonatation est un processus chimique lent par lequel le dioxyde de carbone de l'air pénètre le béton et réagit avec la portlandite (hydroxyde de calcium) du ciment hydraté. Cette réaction produit du carbonate de calcium et fait chuter le pH du béton de 13 à 9 environ. La baisse du pH détruit la passivation de l'acier de renfort, déclenchant la corrosion des armatures. Cette corrosion produit de la rouille expansive, gonflant et fissurant le béton environnant [25].

**Prévention :** pour prévenir la carbonatation, on utilise des bétons très peu poreux (E/C faible) et de ciments contenant peu de portlandite (ex. ciment au laitier, aux cendres ou fumée de silice) [26].

#### **b) Attaque par les ions chlorure**

Les ions chlorurent provenant de l'environnement (eau de mer, sels de déverglaçage, piscines, granulats contaminés, etc.) peuvent pénétrer dans le réseau poreux du béton et atteindre l'armature. Les chlorures détruisent localement la couche passive de l'acier même si le pH reste élevé, entraînant une corrosion rapide par piqûres. Le principal symptôme est l'apparition de fissures

verticales autour des barres corrodés, associées à des éclats et à des tâches de rouille en surface [25].

**Prévention :** pour prévenir ce phénomène, on doit : choisir un béton très compact (E/C faible, adjuvants plastifiants), assurer un enrobage d'acier suffisant et conforme, et éventuellement utiliser des ciments spéciaux ou des aciers inoxydable/galvaniser [25].

### c) Réaction alcali-granulats

L'alcalin-silice est un processus interne expansif lié à la réaction des alcalins du ciment (Na, K) avec certaines silices contenues dans des granulats réactifs. Les symptômes caractéristiques sont l'apparition d'un réseau de microfissures en carte ou en écailles sur l'ouvrage, souvent accompagné d'un léger gonflement global du béton [26].

**Prévention :** la prévention repose surtout sur la formulation du béton : utiliser des granulats non réactifs ou des addition pouzzolanique (laitier, cendres) pour réduire la teneur en alcalins effective [26].

### d) Cycles gel-dégel

En climat froid, l'eau pénétrant dans les pores du béton gèle, se dilate et engendre de fortes pression internes. Sous l'effet répété des cycles gel/dégel, ces pressions provoquent des fissures fines internes, un écaillage superficiel et des éclatements du béton (souvent aggravés en présence de sels de déverglaçage). Les signes visibles sont de la rugosité, des petits éclats en surface ou la perte de parement [26].

**Prévention :** la prévention classique repose sur la formulation du béton (rapport E/C faible, adjuvants entraîneur d'air) et la protection superficielle (imprégnation hydrofuge, couvertures isolantes). En cas de gel/dégel observé, on renouvelle ou répare le parement détérioré avec un mortier résistant et on restaure le drainage des eaux pour limiter l'absorption d'humidité [26].

## 1.7.2 Les pathologies mécaniques

### a) Retrait (dessiccation, plastique, thermique)

Le retrait du béton est une contraction volumique liée à la perte d'eau (retrait plastique et dessiccation) ou aux variations de température. Le retrait de dessiccation (hydrique) survient lorsque le béton perd son eau de gâchage en durcissant : chaque évaporation crée une diminution de volume qui se traduit par l'apparition de fissures de dessiccation, généralement fines et parallèles en surface. Le retrait plastique est un retrait précoce du béton frais mal entretenu. De même un retrait thermique résulte d'un refroidissement du béton (ex. coulage en masse) et peut provoquer des fissures si l'élément est contraint [26].

**Prévention :** pour prévenir, on contrôle le rapport E/C, on introduit des joints de retrait ou un ferrailage fin pour distribuer les fissures. En réparation, on peut injecter les fissures structurelles avec de la résine époxy et appliquer un mortier de surface adapté [26].

### b) Surcharges et défauts de conception

Les fissures structurelles dues à un dimensionnement ou une mise en œuvre inadaptés sont fréquentes. Si les efforts (flexion, compression, cisaillement) excèdent les capacités du béton, des fissures marquées apparaissent. Fissures de flexion en partie tendue, fissures de cisaillement inclinées (cravate), fissures de compression (poinçonnement), voire des effrètements localisés en cas de surcharge importantes. Le ferrailage peut être exposé ou rompu. Ces désordres résultent en général d'une erreur de calcul ou d'une surcharge accidentelle [25].

**Prévention :** la prévention consiste à vérifier les normes et charges prévues, et à surdimensionner ou renforcer les zones critiques (ajout d'acier). En réparation on peut réaliser un renforcement externe ou une reconstruction partielle [25].

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

## **1.8 CONCLUSION PARTIELLE**

Le présent chapitre a porté sur les généralités sur le béton. En mettant en évidence les notions fondamentales nécessaire à la compréhension de ce matériau. Il a permis de définir le béton et de présenter ses principaux constituants, quelques paramètres morphologiques de granulats, leur influence sur les propriétés du béton, les différents types de béton, les méthodes de formulation du béton ainsi que certaines propriétés courantes du béton. Nous clôturons ce chapitre par la présentation de quelques pathologies du béton ainsi que leur prévention.

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

## **Chapitre 2. METHODOLOGIE**

### **2.1 INTRODUCTION**

Ce chapitre est consacré aux méthodologies utilisées dans le cadre de notre étude, il décrit la nature et l'origine des constituants du béton, notamment le sable, les graviers, le ciment et l'eau de gâchage. Une attention particulière est accordée à la caractérisation morphologique des granulats, en mettant en évidence des paramètres tels que l'indice de forme et l'indice d'aplatissement des graviers.

Ce chapitre présente également les modes opératoires des différents essais effectués au laboratoire de Génie civil de la faculté des Sciences et Technologie de l'ULPGL/GOMA il présente aussi la formulation du béton à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse et pour finir par les caractérisations du béton notamment à l'état frais et durci.

### **2.2 NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS**

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

#### **2.2.1 Le ciment**

Le ciment utilisé pour notre expérimentation est le ciment Cimerwa. Il s'agit d'un ciment pouzzolanique de classe CEM IV/B 42.5 produit au RWANDA, de classe commerciale 42.5 MPa.



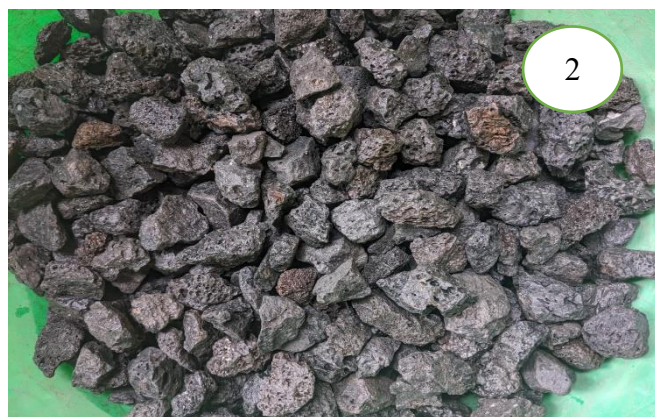
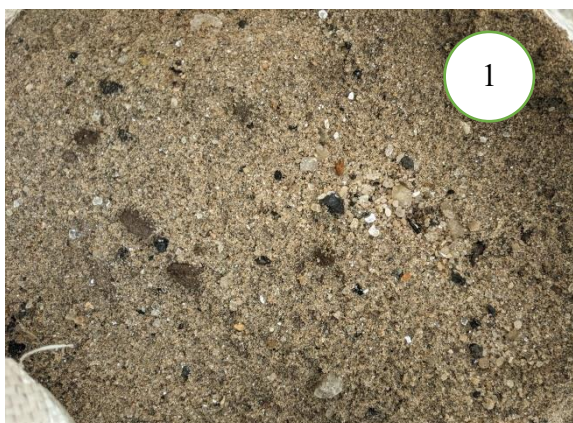
*Figure 2.1 Ciment CIMERWA 42.5N*

### **2.2.2 L'eau de gâchage**

L'eau de gâchage utilisée est potable, est cette dernière est tiré dans le lac Kivu, d'où elle ne contient pas d'impuretés qui peuvent nuire à la qualité du béton

### **2.2.3 Les granulats**

Parlant des granulats, nous allons distinguer le sable ainsi que les graviers. Le sable (0/4) est roulé provenant du Rwanda. Dans la rubrique des graviers nous auront les graviers roulés provenant du Rwanda, les gravier tout-venant issue du ramassage à la surface sur le site du camp Katindo de Goma, ainsi que les graviers concassés produit par l'entreprise CARRIGO.





*Figure 2.2 Granulats utilisés : (1) Sable de Rwanda, (2) Grapiers concassés, (3) Grapiers tout-venants, (4) Grapiers roulés*

### **2.3 CARACTERISATION 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.

Dans le cadre de cette étude, les graviers tout-venant ont été assimilés à des graviers concassés en raison de la prédominance visuelle de grains anguleux, pour la détermination des paramètres de formulation du béton, notamment le coefficient correcteur.

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 coefficient de forme, l'indice d'aplatissement des graviers, le degré de propreté du sable, taux d'absorption d'eau, la consistance normale du ciment, l'essai Los Angeles ainsi que la détermination des masses volumiques absolues et apparentes du sable et des graviers.

Il importe de préciser qu'avant la réalisation des différents essais, une opération d'échantillonnage a été effectuée, celle-ci représentant une étape essentielle pour la poursuite des travaux expérimentaux.

### **2.3.1 Échantillonnage**

Les essais de laboratoire s'effectuent sur des quantités limitées de matériaux ; celle-ci doivent néanmoins permettre l'évaluation des paramètres caractéristiques de l'ensemble du lot concerné. À cet effet, l'échantillon prélevé doit être rigoureusement représentatif du matériau global.

### **2.3.2 Analyse granulométrique**

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique qui est normalisé NF EN 933-1 (2012) [27]. Dans cette section nous présentons le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

#### **A. But**

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

#### **B. Principe**

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

#### **C. Mode Opératoire**

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

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R1 la masse de ce refus ;
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ;
- Les masses des différents refus cumulés R1 sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m1 ;
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai, Le pourcentage des tamisât cumulés sera déduit.

#### **D. Appareillage**

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

- Le tamis en mm (20-16,5-10-8-6,3-5-1—0,2-0,8) ;

- La balance ;
- Des récipients ;
- Le vibreur de tamis.



*Figure 2.3 Appareillage de l'essai d'analyse granulométrique*

#### **E. Expression des résultats**

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

De ces données :

- On trace une courbe appelée courbe granulométrique : avec les masses des différents refus rapportée à la masse initiale du matériau et exprimée en pourcentage. Nous procédons au traçage du courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des refus et les maille D en abscisse.
- On trouve le module de finesse, pour le sable, qui est déterminé par la relation 2.1.

$$Mf = \frac{1}{100} \sum Rc(\%) \quad (2.1)$$

Avec :

- **Rc** : Refus cumulé en pourcentage
- **Mf** : Module de finesse

Lorsque le module de finesse est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est majorité de grains fins ;

- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel ;
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniabiles.

Dans le cas où la valeur du module de finesse ne répond pas aux exigences, une correction de cette dernière est envisageable. Cette correction est exprimée par les relations 2.2.

$$S1 = \frac{MF - MF2}{MF1 - MF2} \text{ ET } S2 = \frac{MF1 - MF}{MF1 - MF2} \quad (2.2)$$

Avec :

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

#### a. Coefficient d'uniformité (Cu)

La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité appelé aussi coefficient de HAZEN. Il est déterminé à l'aide de la formule 2.3.

$$Cu = \frac{D60}{D10} \quad (2.3)$$

Avec :

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

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

#### b. Coefficient de courbure (Cz)

Ce coefficient permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre le diamètre D10 et D60. Il est déterminé à l'aide de la formule 2.4.

$$Cz = \frac{D30^2}{D10 * D60} \quad (2.4)$$

Avec :

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

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

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

### **2.3.3 L'indice d'aplatissement**

L'essai d'indice d'aplatissement est réalisé en s'inspirant de la norme EN 933-3 :2012 [14]. En l'absence de tamis à barres normalisés l'épaisseur des grains est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse afin d'identifier les particules considérées comme aplaties (épaisseur  $< D/2$ ).

Cette adaptation méthodologique a été appliquée de manière uniforme à l'ensemble des échantillons afin d'assurer la cohérence des résultats.

#### **A. But de l'essai**

L'essai d'indice d'aplatissement mesure la proportion de particules plates (épaisseur très faible) dans l'échantillon. Cet essai s'applique aux granulats naturels, artificiels ou recyclés de 4mm à 100mm.

#### **B. Principe**

L'essai repose sur l'identification des particules dont l'épaisseur est inférieure à la moitié de la dimension nominale supérieure de la fraction ( $D/2$ ). Les particules répondant à ce critère sont considérées comme aplaties. L'épaisseur est mesurée directement au pied à coulisse pour chaque grain de l'échantillon.

### C. Mode opératoire

- Préparer une portion représentative de l'échantillon et la sécher à  $105 \pm 5$  °C jusqu'à masse constante ;
- Tamiser l'échantillon pour isoler la fraction cible ;
- Mesurer la plus petite épaisseur réelle de chaque grain à l'aide d'un pied à coulisse ;
- Identifier les particules dont l'épaisseur est inférieure à  $D/2$  ;
- Séparer ces particules et peser leur masse pour le calcul final.

### D. Appareillage

L'appareillage utiliser dans la réalisation de l'essai de l'indice d'aplatissement est constituer de :

- Des tamis normalisés pour la séparation granulométrique ;
- Un pied à coulisse ;
- Une balance de précision ;
- Etuve ventilée ( $105 \pm 5$  °C) ;
- Un plateau ou trémie pour le tri des grains

### E. Expression des résultats

Les résultats de l'indice d'aplatissement s'expriment en pourcentage. Ils se calcul à partir de la relation 2.5.

$$FI = \frac{M2}{M1} * 100 \quad (2.5)$$

Avec :

- $M_1$  : masse totale de l'échantillon ;
- $M_2$  : masse des particules aplaties.

### F. Interprétation des résultats

L'interprétation de l'indice d'aplatissement se fait en se basant aux donnés du *tableau 2.1*.

**Tableau 2.1** *interprétation de l'indice d'aplatissement*

<b>Intervalle FI (%)</b>	<b>Classe FI</b>	<b>Appréciation morphologique</b>	<b>Aptitude au béton</b>
FI ≤ 15	FI15	Grains peu aplatis	Très favorable
15 < FI ≤ 20	FI20	Forme acceptable	Favorable
20 < FI ≤ 25	FI25	Forme moyenne	Acceptable
25 < FI ≤ 35	FI35	Grains aplatis	Limité
FI > 35	-	Grains très aplatis	Défavorable

### **2.3.4 Coefficients de forme des graviers**

L'essai de coefficient de forme s'effectue suivant la norme NF EN 993-4 [11].

#### **A. But de l'essai**

Le but poursuivi par cet essai est la détermination de l'indice de forme enfin d'apprécier la forme des graviers.

#### **B. Principe**

L'essai consiste à mesurer les dimensions principales (longueur et épaisseur) d'un échantillon représentatif de granulats (100 graviers) afin de calculer l'indice de forme.

#### **C. Mode opératoire**

- Prélever un échantillon de 100 graviers (les graviers sont choisis arbitrairement) ;
- Préparer le pied à coulisse ;
- Evaluer l'épaisseur ainsi que la longueur de chacun de 100 graviers et noter les résultats dans un tableau ;
- Faire la somme des épaisseurs ainsi que celle des longueurs et passer au calcul de l'indice de forme.

#### **D. Appareillage**

L'outil utiliser pour cet essai est le pied à coulisse.

### E. Expression des résultats

Les résultats du coefficient de forme se calcul à partir de la relation 2.6.

$$\text{Indice de forme } (I_g) = \frac{\sum \text{Epaisseurs}}{\sum \text{Longueurs}} \quad (2.6)$$

### F. Interprétation des résultats

L'interprétation de l'indice de forme ce fait en se basant aux données du *tableau 2.2*.

*Tableau 2.2 Tableau 2.2 Interprétation de l'indice de forme*

<b>Dmax</b>	<b>≤ 20mm</b>	<b>&gt;20mm</b>
Concassé ordinaire	0,275 ≤ I <sub>g</sub> < 0,400	0,350 ≤ I <sub>g</sub> < 0,425
Ré concassé	0,400 ≤ I <sub>g</sub> < 0,450	0,425 ≤ I <sub>g</sub> < 0,485
Ré concassé cubique	0,450 ≤ I <sub>g</sub>	0,485 ≤ I <sub>g</sub>

## 2.3.5 Le degré de propreté de sable

Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai de l'équivalent de sable selon la norme NF EN 933-8 (1999). Dans cette partie nous présentons le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que l'expression des résultats et l'interprétation des résultats [11].

### A. But de l'essai

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

### B. Principe

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

### **C. Mode opératoire**

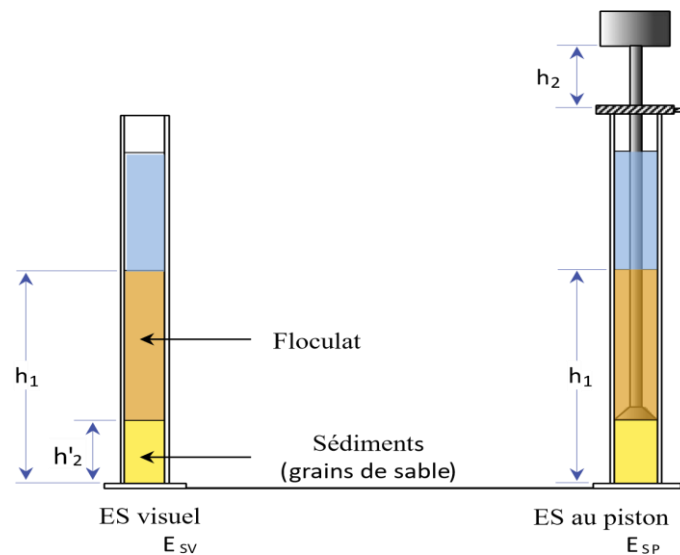
- Préparer l'échantillon ;
- Faire la mise au point de l'appareil ;
- Remplir deux éprouvettes par la solution lavante jusqu'au premier trait repère ;
- Verser la quantité de sable nécessaire pour l'essai ;
- Eliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main ;
- Laisser reposer pendant 10 minutes ;
- Boucher les éprouvettes et agiter à l'agitateur (faisant un mouvement rectiligne sinusoïdal horizontal de 20cm d'amplitude :90 aller et retour en 30 seconde);
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais ;
- Ôter le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant
- Enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette ;
- Laver et remplir les éprouvettes à l'aide du tube laveur jusqu'au dernier trait repère ;
- Laisser reposer pendant 20 minutes ;
- Mesurer à l'aide du réglet la hauteur  $h_1$  au niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette ;
- Mesurer également, si possible, la hauteur  $h_2$  du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au font de l'éprouvette. (Les hauteur  $h_1$  et  $h_2$  sont arrondies au millimètre le plus proche) ;
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu' à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appuie sur l'éprouvette ;
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire la règle dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston ;
- Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon. Arrondir la hauteur  $h_2$  au millimètre le plus proche.

### **D. Appareillage**

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

- Les éprouvettes en plexiglass (ayant chacun deux traits repère) et leurs bouchons ;

- L'entonnoir pour l'introduction du sable ;
- La bombonne de 5l 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.



**Figure 2.4** *Figure 2.4 Appareillage de l'équivalent de sable*

### E. Expression des résultats

Les résultats de l'équivalent de sable s'expriment en pourcentage. Ils se calculent à partir de la relation 2.7.

$$ES = \frac{h1}{h2} * 100 \quad (2.7)$$

Avec :

- **ES** : équivalent de sable (%) ;
- **h1** : la hauteur du dépôt du sable visible (cm) ;
- **h2** : la hauteur totale y compris le floculant (cm).

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont interprétés et exprimés sous forme de pourcentage suivant le *tableau 2.3*.

**Tableau 2.3 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable**

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

### **2.3.6 Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente est déterminée selon les normes NF P 18-554 [28] pour les graviers et NF P 18-555 [29] pour les sables. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

#### **A. But**

Souvent appelé improprement densité apparente, la masse volumique apparente a pour but d'exprimer la masse d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

#### **B. Principe**

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

### **C. Appareillage**

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

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

### **D. Mode opératoire**

Le mode opératoire poursuivi dans l'exécution de l'essai de masse volumique apparente est conforme à la norme NF P 18-554 [28] et la norme NF P 18-555 [29] :

- Savoir le volume du moule à utiliser ;
- Peser le moule pour avoir la masse M1
- Verser lentement le sable ou le gravier entre les deux mains à une distance de 10cm au-dessus du moule ;
- Araser avec la spatule ;
- Prendre le poids de l'échantillon dans le moule pour avoir la masse M2 et en déduire la masse M de l'échantillon ;
- Puis calculer avec la relation.

### **E. Expression des résultats**

Les résultats de l'essai de la masse volumique apparente se sont exprimés en  $\text{g/cm}^3$  et se calculent à partir de la relation 2.8.

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (2.8)$$

Avec :

- **M** : Masse sèche de l'échantillon (en g) ;
- **V** : volume du récipient (en  $\text{cm}^3$ ).

## **2.3.7 Masse volumique absolue**

L'essai de la masse volumique absolue s'est effectué par la méthode de l'éprouvette graduée conformément à la norme NF P 18-554 [28] pour les gravier et NF P 18-555 [29] pour le sable. Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

### **A. But**

Le but de l'essai de la masse volumique absolue est d'exprimer la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulats sans tenir compte des vides le constituant [11].

### **B. Principe**

Le volume absolue d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide (en général de l'eau) que déplace l'introduction de ce corps.

### **C. Appareillage**

- Balance électrique ;
- Pycnomètre ou les éprouvettes graduées de même volume.

### **D. Mode opératoire**

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau ;
- Peser un échantillon sec  $M$  de granulats ;
- Introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air ;
- Saturation des granulats dans l'éprouvette (au moins 24 heures) ;
- Lire le nouveau volume  $V_2$ .

### **E. Expression des résultats**

La masse volumique absolue sera ainsi déterminée à partir de la relation 2.9 en  $\text{g/cm}^3$ .

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.9)$$

Avec :

- **M** : la masse sèche du matériau (en g) ;
- **V2** : volume d'eau avec les granulats (en  $\text{cm}^3$ ) ;
- **V1** : volume d'eau dans l'éprouvette gradué (en  $\text{cm}^3$ ).

## **2.3.8 Taux d'absorption d'eau**

Le taux d'absorption du sable ou de gravier est déterminé par un essai normalisé NF P 18-555(1990). Nous présentons dans cette section le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats [23].

### **A. But**

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

### **B. Principe**

L'essai consiste à exprimer le rapport d'augmentation de la masse de l'échantillon de gravier en pourcentage après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon.

### **C. Mode opératoire**

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

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

### **D. Expression des résultats**

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des graviers s'expriment en pourcentage et se calculent à partir de la relation 2.10.

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{M} * 100 \quad (2.10)$$

Avec :

- **Ma** : masse humide (en g) ;
- **Ms** : masse sèche (en g).

### **2.3.9 Essai Los Angeles**

Dans cette section il est présenté le but, le principe, le mode opératoire, et l'expression des résultats.

### **A. But**

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulats [20].

### **B. Principe**

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

### **C. Mode opératoire**

- Introduire soigneusement l'échantillon et les boulets d'acier dans le tambour, puis mettre en marche la machine de Los Angeles ;
- Effectuer 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tours par minute ;
- À la fin de l'essai, recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en positionnant l'ouverture du tambour juste au-dessus du bac afin d'éviter toute perte de matériau ;
- Tamiser le contenu du bac sur un tamis de 1,6 mm ;
- Peser le refus sec, la valeur obtenue correspondant à P.

### **D. Appareillage**

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

- Un jeu de tamis de dimension convenable, leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm ;

- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage ;
- Une machine Los Angeles comprenant : Des charges de boulets (constituées de boules sphériques pesant 437,4 g en acier Z 30C ( $\varnothing = 47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), un moteur d'au moins 0,75Kw assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière, un bac destiné à recueillir les matériaux après essai, un compte tour de type relatif arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulus.

### **E. Expression des résultats**

Soit P le poids total de l'échantillon et p le poids des éléments de dimension inférieure à 1,6 mm produit au cours de l'essai. La fragmentation au choc s'exprime par le coefficient Los Angeles (LA) de relation 2.11.

$$LA = \frac{p}{P} * 100 \quad (2.11)$$

Avec :

- p : poids des éléments inférieur à 1,6 mm ;
- P : poids total de l'échantillon.

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

### **2.3.10 Essai de consistance**

La consistance normale du ciment est déterminée par l'essai normalisé (NF EN 196-3, Août 1995).

#### **A. But**

Cet essai a pour but de repérer la consistance d'une pâte de liant hydraulique à l'aide de l'appareille de Vicat muni d'une sonde de consistance.

#### **B. Principe**

Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10 mm, selon la norme (NF EN 196-3, Août 1995). La pâte est composée de ciment et d'eau. On définit le rapport E/C ou C/E qui permet de définir une pâte de consistance normale, c'est-à-dire ni trop, ni trop peu d'eau. On mesure l'enfoncement d'une sonde amovible de diamètre 10 mm, fixée à la partie mobile

de l'appareil de Vicat dont la masse totale est de 300 g, dans une pâte de ciment maintenue dans un moule tronconique. L'enfoncement est fonction de la consistance de la pâte, on parle de consistance normale lorsque la sonde s'immobilise au plus tard 30 secondes après l'avoir lâchée à une distance de  $6 \pm 1$  mm du fond du moule. Si cette distance n'est pas atteinte, il convient de modifier le rapport E/C ou C/E afin d'obtenir la consistance normale [11].

### **C. Mode opératoire**

Le mode opératoire est conforme au processus suivant :

- Préparer la pâte en commençant avec 500g de ciment à tester ; 135g d'eau dans un premier temps ;
- Remplir immédiatement le moule tronconique, araser la surface ;
- Abaisser la sonde jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte ;
- Libérer les parties mobiles.

La lecture de la valeur « d » indiquée par l'index :

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

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

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

### **D. Appareillage**

Cet essai est réalisé à l'aide d'un appareil qu'on appelle VICAT et une balance de précision.

## **2.4 FORMULATION DU BETON**

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

### **2.4.1 Méthode de Dreux-Gorisse**

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique de composition de béton qui a pour seul but de permettre de prévoir les dosages de chacun des constituants du béton pour obtenir un béton

conforme ou de bonne qualité. Elle approche de façon significative les paramètres influant sur la résistance, l'ouvrabilité et le volume.

En effet, la méthode de formulation de béton selon Dreux-Gorisse a l'avantage d'être issue, d'une part, de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est apte aux exigences liées au cahier des charges ; et est très simple d'utilisation et se base sur la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Cette méthode permet, d'autre part, une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche.

## **2.4.2 Principe de formulation**

Le principe de formulation selon Dreux-Gorisse consiste à déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier des charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m<sup>3</sup>).

## **2.4.3 Etape de formulation**

Les étapes de formulation de Dreux-Gorisse ont été résumées en quatre étapes dont : les hypothèses de calcul, les données de base pour la formulation, le calcul du rapport C/E (dosage en ciment et le dosage en eau) et le dosage en granulats.

### **2.4.3.1 Hypothèses de calcul**

#### **a. Dimensions maximales 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. Dosage minimal en ciment**

La norme préconise un dosage minimal en ciment à respecter donné par la relation 2.12.

$$c \left( \frac{Kg}{m^3} \right) = \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[5]{D}} \quad (2.12)$$

Avec :

- D : Dimension du plus grand granulats en mm ;  $f_{ck}$  : classe de résistance du ciment en MPa

En milieu exposé, le dosage minimal est obtenu par la relation 2.13.

$$C_{min} \geq \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[5]{D}} \quad (2.13)$$

En milieu exposé non agressif, ce dosage minimal est obtenu par la relation 2.14.

$$C_{min} = \text{Max} \left\{ \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[5]{D}} ; \frac{550}{\sqrt[5]{D}} \right\} \quad (2.14)$$

Pour un béton précontraint et en milieu agressif, le dosage minimal est donné par la relation 2.15.

$$C_{min} = \text{Max} \left\{ \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[5]{D}} ; \frac{700}{\sqrt[5]{D}} \right\} \quad (2.15)$$

### 2.4.3.2 Données de base

Pour la formulation du béton selon la méthode de Dreux-Gorisse, nous avons besoin de savoir certain élément qui sont les inputs de la formulation. Pour le béton on a :

#### a. 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 majorée de 15% compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique. La résistance en compression désirée est déterminée à l'aide de la relation 2.16.

$$f_c = 1,15 * f_{c28} \quad (2.16)$$

**f<sub>c</sub>** : Résistance en compression désirée à 28 jours et **f<sub>c28</sub>** : résistance visée en compression à 28 jours.

#### **b. La consistance désirée**

Elle est fonction de l'élément à bétonner (plus au moins massif ou plus au 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.

Pour le ciment nous devons connaître : la classe vraie du ciment et la masse volumique du ciment. Pour les granulats nous devons connaître : la dimension maximale des granulats, les masses volumiques absolues et apparentes et éventuellement la teneur en eau.

#### **2.4.3.3 Détermination du dosage en ciment et en eau**

La détermination du dosage en ciment et en eau passe par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne en compression désirée et nécessite l'utilisation de la relation dite de Bolomey 2.17.

$$f_c = G * \sigma'_c * \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2.17)$$

Avec :

- **f<sub>c</sub>** : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa ;
- **σ'<sub>c</sub>** : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;
- **G** : coefficient granulaire (comprise entre 0,35 et 0,65) ;
- **C** : dosage en ciment (en Kg/m<sup>3</sup>) ;
- **E** : dosage en eau (en l/m<sup>3</sup>).

Le **tableau 2.4** nous donne les valeurs du coefficient granulaire G en fonction de la quantité des granulats [3].

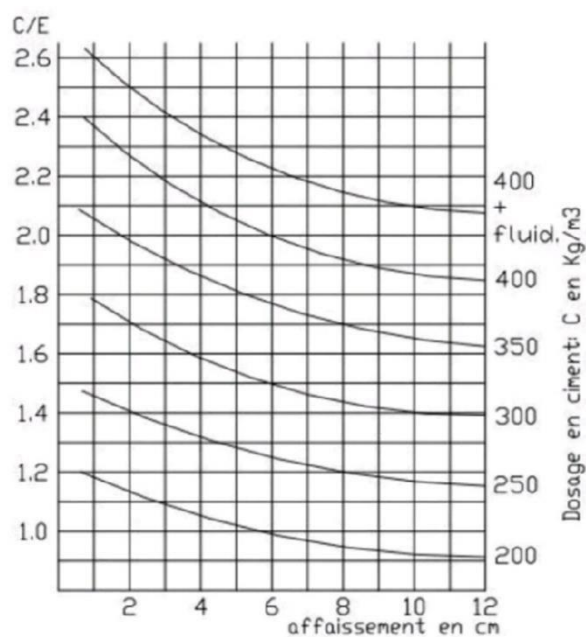
**Tableau 2.4 les valeurs du coefficient granulaire G**

Qualité des Granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ( $D \leq 16\text{mm}$ )	Moyen ( $2 \leq D \leq 40\text{mm}$ )	Gros ( $D \geq 50\text{mm}$ )
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

#### a. Dosage en ciment

Le rapport C/E nous donne accès au calcul du dosage en ciment. Sachant l'affaissement A considéré dans les données, l'abaque ci-dessous contenant en abscisse l'affaissement et en ordonné le rapport C/E permet de déterminer le dosage en ciment qui sont sous forme des courbes équipotentielles. Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante fonction de C/E et de l'affaissement.

La *figure 2.5* permet d'évaluer la quantité du dosage en ciment C, en fonction du rapport ciment en eau C/E et de la consistance exigée du béton.



**Figure 2.5 Rapport C/E en fonction de la consistance exigée du béton**

**b. Dosage en eau**

Ayant trouvé le dosage en ciment, sachant qu'ils sont liés par la valeur du rapport C/E, on en déduit la valeur du dosage en eau E, qui subira évidemment quelques ajustement selon l'affaissement prévue.

**c. Correction du dosage en eau**

Le dosage en eau est éventuellement ajusté en fonction du plus gros granulats.

En effet, si les dimensions des granulats sont supérieures ou inférieures à celle considéré hypothétiquement, la méthode de Dreux-Gorisse prévoit des corrections sur le dosage en eau en pourcentage pris soit en excès soit en défaut. Car plus les dimensions des granulats sont petites, la surface spécifique des grains augmente, et la plasticité équivalente aussi. Il faudra légèrement majorer le dosage en eau et inversement et vice-versa.

Le **tableau 2.5** nous donne les valeurs en pourcentage de la correction de E en fonction de la dimension maximale du gros granulats.

**Tableau 2.5 corrections sur le dosage en eau en fonction de Dmax**

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

Après la correction, nous retrouvons la valeur E qui prend en compte les dimensions des granulats. Par ailleurs, dans la détermination de la quantité en eau pratique in situ, il est impérieux de prendre en considération la quantité en eau qu'apportent les granulats s'ils ne sont pas secs [3].

### 2.4.3.4 Détermination du dosage en granulats

La détermination du dosage en granulats d'un béton passe par le tracé de la courbe de référence, la détermination des proportions en volume des granulats, la détermination du coefficient de compacité du béton afin d'aboutir à la composition théorique du béton.

#### a. Tracé de la courbe granulométrique de référence et de la ligne de brisure

Le tracé des courbes granulaires s'effectue sur un graphique normalisé AFNOR comprenant en abscisse une graduation logarithmique des tamis et en ordonné les tamisât en pourcentage. La courbe de référence se trace sur le graphique des courbes granulaires. Cette courbe de référence est dénommée OAB.

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

Abscisse :

Si  $D_{max} \leq 20$  ; l'abscisse est  $D_{max} / 2$  ;

Si  $D_{max} \geq 20$ ; l'abscisse est située au milieu du segment limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à  $D_{max}$

Ordonnée :

S'obtient à partir de la relation 2.18. Qui prend en compte l'influence de la forme des granulats, le dosage en ciment, la vibration, la finesse du sable et la mise en œuvre du béton.

$$Y = 50 - \sqrt{1,25D + K + K'} \quad (2.18)$$

Avec :

- **K** : le terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la puissance de vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) ;
- **K'** : correction supplémentaire dépendant du module de finesse du sable obtenu par la relation 2.19.

$$K' = 6MF - 15 \quad (2.19)$$

Le coefficient correcteur K est fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats. Ses différentes valeurs sont présentées dans le *tableau 2.6*.

**Tableau 2.6 Valeur du coefficient correcteur K**

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

NOTA : Correction supplémentaire KP : si la quantité du béton est précisée " pompable" il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de quantité "courante". On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur KP= +5 à +10 environ, selon le degré de plasticité désiré [3].

Après avoir défini la courbe granulaire, on trace la ligne de partage en reliant le point d'ordonnée 95% de la première courbe au point d'ordonnée 5% de la courbe suivante. L'ordonnée du point d'intersection entre la ligne de partage et la courbe granulaire de référence indique les proportions respectives de chaque granulat, Dans le cas d'un mélange ternaire c'est-à-dire béton à trois

granulats, le traçage d'une deuxième ligne de partage entre les deux derniers granulats s'effectue selon les mêmes processus, ce qui permet de déterminer les proportions respectives de ces derniers.

**b. Coefficient de compacité**

Le coefficient de compacité  $\gamma$  du béton représente le rapport du volume des matières solides (granulat + ciment) au volume total du béton vibré.

Le **tableau 2.7** reprend les différentes valeurs du coefficient de compacité fonction de la plasticité, du diamètre maximal et du type de vibration [3].

**Tableau 2.7 Valeurs du coefficient de compacité**

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

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

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

**c. Dosage proprement dit**

Dans cette section sont présentés les divers dosages notamment le dosage volumique, le dosage massique.

**i. Dosage volumique**

Si  $C$  est le dosage en ciment et  $\rho_c$  la masse spécifique du ciment, le volume absolu des grains de ciment est obtenu par la relation 2.20.

$$V = \gamma - \frac{C}{\rho_c} \quad (2.20)$$

Avec :

- $\gamma$  : le coefficient de compacité ;
- $C$  : le dosage en ciment ;
- $\rho_c$  : la masse volumique du ciment.

Les compositions massiques des graviers et du sable s'obtiennent respectivement par les relations 2.21.

$$\begin{cases} VS = \%S \times V \\ VG = \%G \times V \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec  $VS$  et  $VG$ , respectivement les volume absolus du sable et des gravillons ;  $\%S$  et  $\%G$ , les pourcentages du sable et des gravillon obtenus sur les compositions optimales des bétons et  $V$  le volume absolue des granulats.

**ii. Dosage massique**

Connaissant les masses volumiques spécifique  $\rho_c$  et  $\rho_g$ , respectivement masse spécifique du sable et gravier, on déduit les masses  $m_S$  et  $m_G$ , respectivement masse du sable et du gravier à partir des relations 2.22.

$$\begin{cases} m_S = VS \times \rho_s \\ m_G = VG \times \rho_g \end{cases} \quad (2.22)$$

## **2.5 CARACTERISATION DU BETON**

Pour ce qui est de la caractérisation de béton, il s'agit ici d'apprécier les différents comportements que présente notre béton. Pour cela, il est nécessaire d'étudier ses propriétés sous ses deux états, notamment à l'état frais et durci.

### **2.5.1 Caractéristique du béton à l'état frais**

La caractérisation du béton frais se fera par la connaissance de son ouvrabilité.

#### **2.5.1.1 Ouvrabilité**

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. Cette section présente le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats

##### **a. But**

Cet essai nous permet d'apprécier la maniabilité du béton.

##### **b. Principe**

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide. Elle est faite conformément à la norme NF P 18-451 [30].

##### **c. Mode opératoire**

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

- Mouiller l'intérieur du moule et la Plaque d'appui à l'aide d'une éponge ;
- Placer le moule avec la rehausse sur la plaque ;
- A l'aide d'une truelle remplir le moule de béton frais, en trois couches d'égale hauteur ;
- Compacter chaque couche par 25 coups à l'aide de piquage ;
- Retirer la rehausse, araser le dessus du moule et nettoyer le support autour du moule ;
- Araser le moule à l'aide d'une règle ;
- Le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution entre 5 et 10sec ;

- Retirer le moule verticalement avec précaution ;
- Mesurer l'affaissement du cône par rapport au point le plus haut du béton juste après le démoulage ;
- La durée totale de l'essai du début du remplissage à la mesure de l'affaissement est de 2min 30sec.

**d. Appareillage**

L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et se compose de 4 éléments :

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

**e. Expression des résultats**

Après démoulage et stabilisation, on mesure l'affaissement et l'interprétation des résultats se fait à partir du *tableau 2.8*.

**Tableau 2.8 Classes de consistance des bétons**

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

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

## **2.5.2 Caractérisation du béton à l'état durci**

### **2.5.2.1 Densité du béton durci**

La densité d'un béton durci est définie comme le rapport entre sa masse volumique et celle de l'eau.

### **A. But**

Cet essai a pour but de déterminer la masse volumique effective d'un échantillon de béton et revêt une grande importance, car il permet d'évaluer certaines de ses propriétés physique et mécanique essentielles.

### **B. Principe**

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

L'échantillon utilisé doit avoir terminé sa phase de durcissement, ce qui correspond généralement à une période de 28 jours après le coulage.

### **C. Mode opératoire**

- Préparation de l'échantillon ;
- Pesé l'échantillon pour déterminer sa masse  $m$ .

### **D. Appareillage**

L'appareillage de cet essai est juste une balance de précision.

### **E. Expression des résultats**

La densité du béton à l'état durci s'obtient par la formule 2.23.

$$d = \frac{m}{\rho_w \times V} \quad (2.23)$$

Avec :

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

### 2.5.2.2 Essai de compression

La résistance à la compression du béton est déterminée par un essai normalisé NF P 18-406 Décembre 1981 [31]. Cette section présente le but, le principe, mode opératoire, appareillage et l'expression des résultats.

#### A. But

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

#### B. Principe

L'essai consiste à placer les éprouvettes entre les plateaux d'une presse à béton. L'effort de compression est appliqué progressivement à une vitesse de  $10 \pm 4$  KN par seconde, la charge maximale atteinte avant la rupture permet de calculer la résistance à la compression.

#### C. Mode opératoire

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

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

#### D. Appareillage

Pour comprimer les éprouvettes, on utilise une presse.

#### E. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de résistance en compression du béton sont obtenus à l'aide de la relation représenté par l'expression 2.24.

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (2.24)$$

Avec :

- **R<sub>cj</sub>** : résistance à la compression à j jours en MPa ou N/mm<sup>2</sup>;
- **F** : valeur de la charge de rupture en N;
- **A** : section de l'éprouvette cylindrique en mm<sup>2</sup>.

## **2.6 PROGRAMME EXPERIMENTAL**

Dans cette partie, nous présentons le programme expérimental mis en œuvre afin d'évaluer l'influence des caractéristiques morphologiques des granulats sur les propriétés physique et mécanique du béton ordinaire.

Avant de procéder à la formulation des bétons, les granulats grossiers ont fait l'objet d'une caractérisation morphologique. Deux paramètres ont été déterminés conformément aux normes EN 933-3. Il s'agit de l'indice d'aplatissement déterminé selon la norme EN 933-3 2012 et de l'indice de forme déterminé selon la norme EN 933-4. Cependant, la détermination de l'indice d'aplatissement a été réalisée selon une méthode adaptée aux équipements disponibles au laboratoire. Ces essais permettent d'évaluer la forme des granulats et leur degré d'indice d'aplatissement, paramètres susceptibles d'influencer le comportement du béton.

Dans le cadre de cette étude, trois types de granulats grossiers de granulométrie 15/25 mm ont été utilisés afin d'analyser l'influence de leur morphologie sur les propriétés du béton. Les granulats utilisés sont des graviers concassés provenant de Goma, des graviers tout-venant provenant également de Goma et des graviers roulés provenant du Rwanda. Le sable utilisé pour la formulation des bétons est un sable provenant du Rwanda de dimension granulométrique (0/4 mm). En ce qui concerne l'eau, nous avons utilisé de l'eau potable provenant du robinet. Le ciment utilisé est le ciment cimera de classe CEM IV/B 42,5 N.

La formulation des bétons a été réalisée suivant la méthode de Dreux Gorisse, qui permet de déterminer les proportions optimales des constituants du béton. Trois types de bétons binaires ont ainsi été formulés, chacun étant caractérisé par un type de gravier différent afin d'évaluer l'influence de la morphologie des granulats sur les propriétés physique et mécanique du béton. La mise en forme des éprouvettes a été réalisée par coulage du béton frais dans des moules cylindriques avec vibration normale afin d'assurer une bonne compacité du béton. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures puis conservées en cure humide jusqu'aux âges d'essais de leur performance mécanique de 7 jours, 14 jours et 28 jours. Pour chaque type de béton et pour chaque âge d'essai, trois éprouvettes ont été confectionnées afin d'assurer la fiabilité des résultats expérimentaux. Ainsi, le nombre total d'éprouvette réalisées dans cette étude est de 27 éprouvettes cylindriques.

## **2.7 CONCLUSION PARTIELLE**

Dans ce chapitre, il a été question de décrire en détail les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie employée pour aboutir aux différents résultats de l'étude. La nature et l'origine des différents constituants du béton ont été exposées, suivies de la description des essais de caractérisation effectués en laboratoire. Ainsi chuté sur la présentation de la méthode de formulation utilisée, en l'occurrence celle de Dreux-Gorisse, accompagnée d'un aperçu des quelques essais sur la caractérisation du béton, pour afin conclure le chapitre par un programme expérimental.

Le chapitre suivant portera sur la présentation des différents résultats obtenus, ainsi que leur interprétation, afin de mieux comprendre l'influence morphologique des granulats sur les propriétés du béton ordinaire.

## **Chapitre 3. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS**

### **3.1 INTRODUCTION**

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours des essais réalisés dans le cadre de notre étude. Il vise à analyser le comportement des matériaux utilisés ainsi que leur impact sur les performances du béton à l'état frais et à l'état durci. Dans un premier temps, les résultats de la caractérisation des constituants, notamment le ciment, le sable et les graviers, seront exposés afin d'étudier comparativement les bétons formulés pour apprécier l'impact de la morphologie des granulats sur les propriétés du béton ordinaire. Ensuite, les différentes formulations de béton élaborées et les résultats des essais sur le béton confectionner.

### **3.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX**

En ce qui concerne la caractérisation des matériaux, des essais tels que, l'analyse granulométrique, l'indice d'aplatissement, le coefficient de forme, l'équivalent de sable, les masses volumique (apparente et absolue), le taux d'absorption d'eau, l'essai Los Angeles, ainsi que la consistance du ciment ont été réalisés.

#### **3.2.1 Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique a été effectuée conformément à la norme NF EN 933-1. Le but poursuivi était de déterminer la composition granulométrique des granulats ainsi que la courbe correspondant à chacun d'eux. La *figure 3.1*, *figure 3.2*, *figure 3.3* et la *figure 3.4* présentent respectivement les graphiques des courbes granulométriques de nos différents granulats ; l'axe des abscisses reprend les différents modules des tamis (en mm) utilisés et celui des ordonnées les pourcentages cumulés des passants.

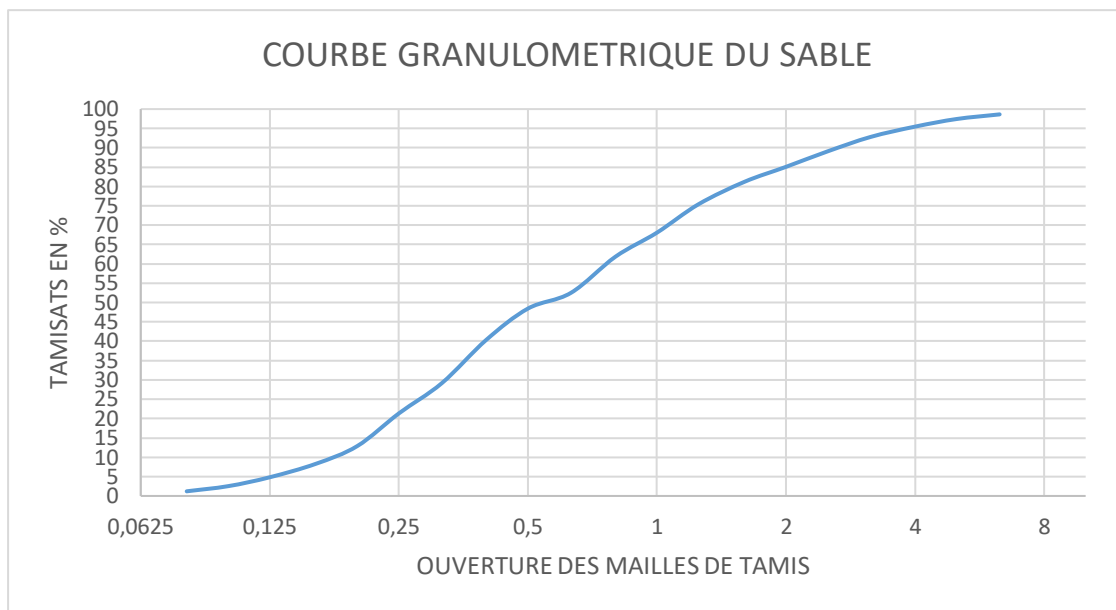


Figure 3.1 Courbe granulométrique de sable

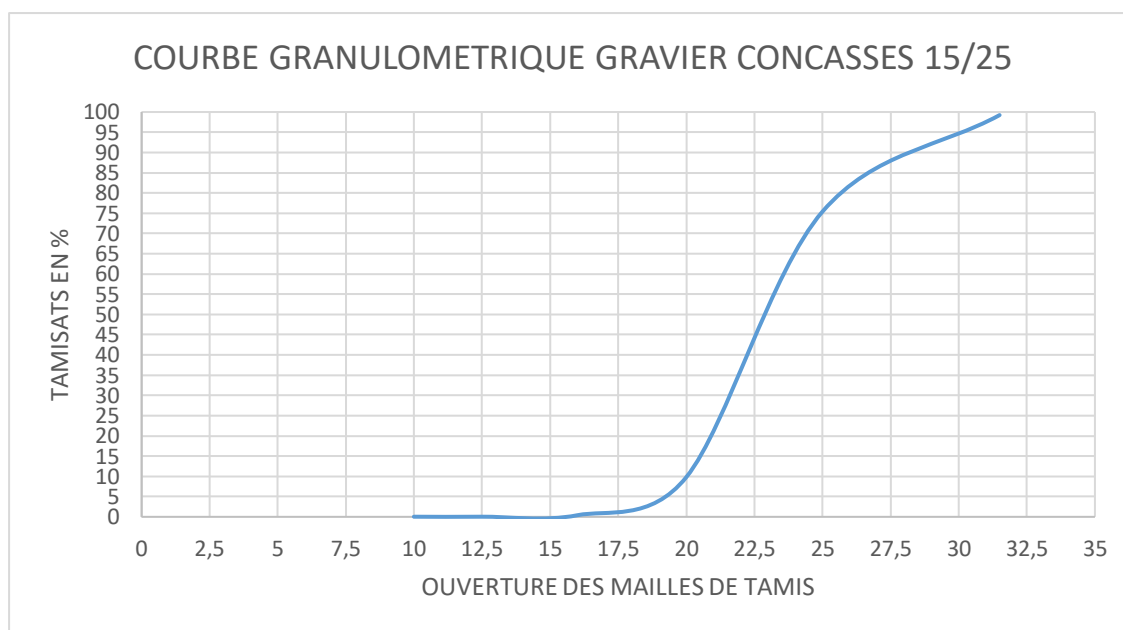
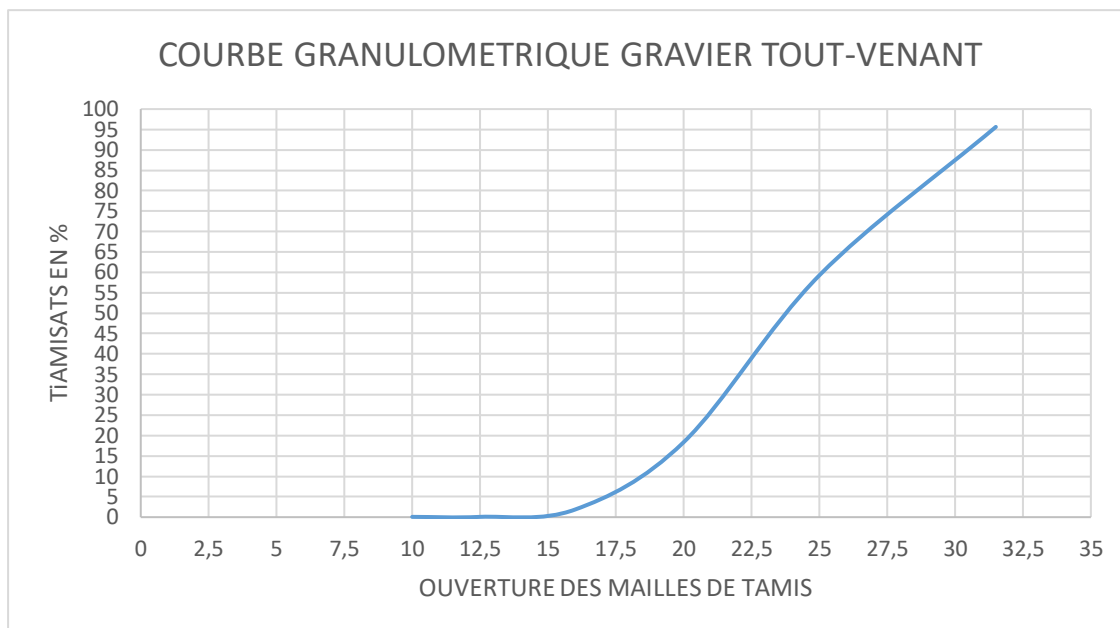
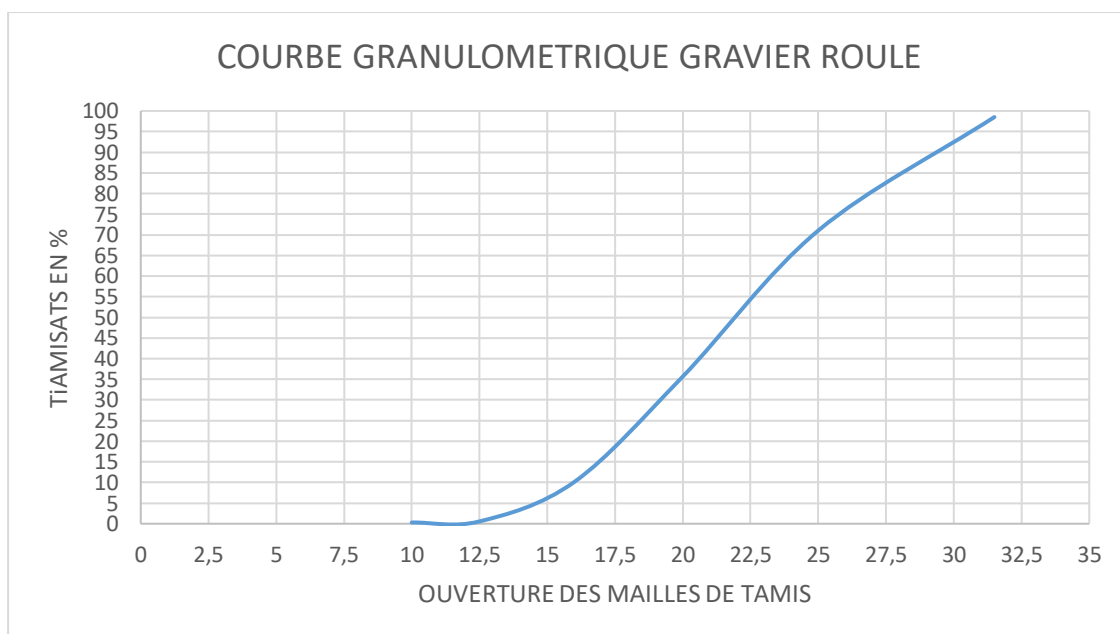


Figure 3.2 Courbe granulométrique du gravier concassé



**Figure 3.3** Courbe granulométrique du gravier tout-venant



**Figure 3.4** Courbe granulométrique du gravier roulé

L'allure de la courbe granulométrique du sable indique une distribution granulaire où les particules de différentes tailles sont présentes de même pour les graviers concassés, tout-venants et roulés de fraction 15/25.

### 3.2.2 Coefficient d'uniformité Cu et de courbure Cz

Le tableau 3.1. Présente les différentes valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure pour le sable ainsi que pour nos différents graviers.

**Tableau 3.1 Coefficient d'uniformité et de courbure**

Désignation	Coefficient d'uniformité Cu	Coefficient de courbure Cz
Sable	4,277778	0,729345
Graviers concassés	1	1
Graviers tout-venants	1,398442	1,016011
Graviers roulés	1,469592	0,976794

À la lumière du **tableau 3.1**, nous constatons que le coefficient d'uniformité pour les graviers est inférieur à 2 ce qui signifie que la granulométrie est serrée ou uniforme. Pour le sable, nous constatons que le coefficient d'uniformité est supérieur à 2 ce qui signifie que la granulométrie du sable est étalée ou varié.

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

### 3.2.3 Module de finesse

Le module de finesse obtenu pour notre sable a été de 2,481333. On constate que cette valeur est comprise entre 2,2 et 2,8, cela nous mène à conclure que le sable est bon pour la confection du béton.

### 3.2.4 Indice d'aplatissement

Le **tableau 3.2**. Présente l'indice d'aplatissement des différents types de graviers déterminé sur un échantillon de 2000g. les grains considérés aplatis sont ceux dont l'épaisseur est inférieure à 12,5mm, conformément à la norme NF EN 933-3 2012.

**Tableau 3.2** *Indice d'aplatissement des graviers*

Désignation	Masse totale de l'échantillon	Masse en g des graviers aplatis	Indice d'aplatissement en %
Graviers concassés	2000g	185g	9,25%
Graviers tout-venants	2000g	147g	7,35%
Graviers roulés	2000g	130g	6,50%

Les résultats présentés dans le **tableau 3.2** montrent une variation de l'indice d'aplatissement selon la nature des granulats étudiés. Les graviers concassés présentent un indice d'aplatissement de 9,25%, représentant la valeur la plus élevée parmi les échantillons analysés. Les graviers tout-venants affichent un indice intermédiaire de 7,35%. Les graviers roulés enregistrent l'indice d'aplatissement le plus faible avec 6,50%. Toutefois, les valeurs obtenues restent relativement faibles et se situent largement en dessous du seuil de 15%, correspondant à la classe FI15 et demeurent acceptables selon les exigences de la norme NF EN 933-3 2012. Cela montre que les granulats étudiés présentent globalement une forme convenable pour leur utilisation dans la fabrication du béton.

### 3.2.5 Coefficient de forme

Les différentes valeurs de l'indice de forme obtenu pour les graviers sont présentées au niveau du **tableau 3.2**.

**Tableau 3.3 Coefficient de forme des graviers**

Désignation	Indice de forme
Graviers concassés	0,515
Graviers tout-venants	0,518
Graviers roulés	0,578

La lecture du **tableau 3.3** montre que les graviers étudiés présentent des indices de forme respectifs de 0,515 pour les gravier concassés, 0,518 pour les graviers tout-venants et 0,578 pour les graviers roulés. Selon les critères d'interprétation pour des graviers de  $D_{max} > 20\text{mm}$ , les valeurs obtenues pour les graviers concassés et tout-venants correspondent à des graviers ré-concassés cubique, caractérisés par une forme régulière et anguleuse, favorable à une bonne adhérence avec la pâte du ciment. Les graviers roulés présentent la valeur la plus élevée (0,578), traduisant une forme globalement régulière mais arrondie en raison de son origine naturelle. Ainsi, l'ensemble des granulats étudiés présente des caractéristiques morphologiques satisfaisante pour la fabrication du béton.

### 3.2.6 Degré de propreté de sable

Le degré de propreté de sable a été déterminé à partir de la norme NF EN 993-8 et a pour valeur 93,2 %. Cette valeur étant supérieure à 80%, ce sable est très propre et convient à la formulation du béton.

### 3.2.7 Masse volumique

Le **tableau 3.4** présente les différentes masses volumiques absolues et apparentes des granulats.

**Tableau 3.4 Masse volumique absolue et apparente des granulats**

Désignation	Sable roulé	Graviers concassés	Graviers tout-venants	Graviers roulés
Masse volumique absolue en g/cm <sup>3</sup>	2,6451753	2,6201646	2,5607966	2,6571873
Masse volumique apparente en g/cm <sup>3</sup>	1,2861703	1,1058204	0,9945407	1,4131478

Les masses volumiques absolues des granulats sont comprise entre 2g/cm<sup>3</sup> et 3g/cm<sup>3</sup> ; il s'agit donc des granulats courants.

### 3.2.8 Taux d'absorption d'eau

Les différentes valeurs du taux d'absorption d'eau des graviers sont reprises dans le **tableau 3.5**.

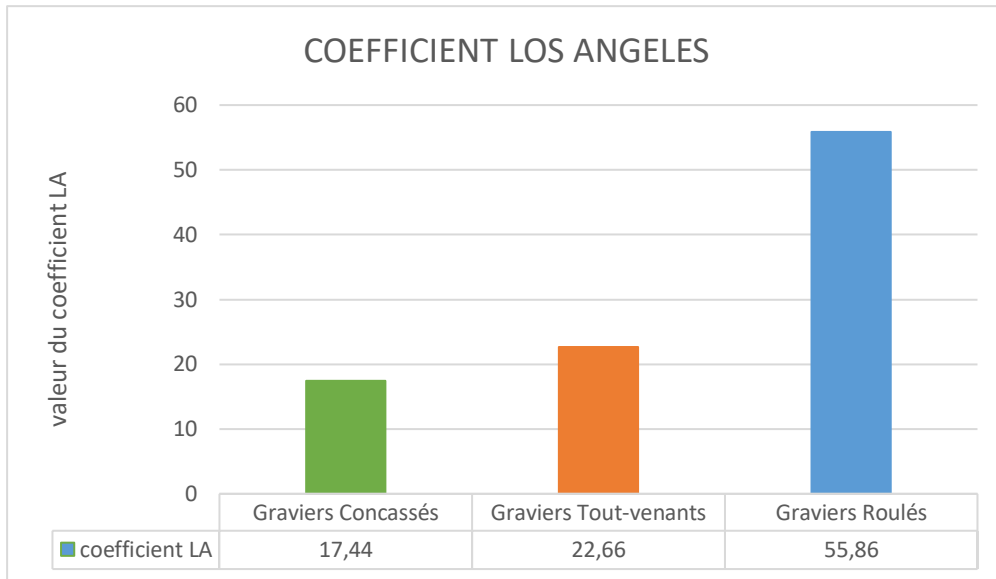
**Tableau 3.5 Absorption d'eau des graviers**

Désignation	Taux d'absorption d'eau en %
Graviers concassés	2,1
Graviers tout-venants	2,24
Graviers roulés	0,3

La lecture du **tableau 3.5** montre que les graviers tout-venants présente un taux d'absorption supérieur à celui des graviers concassés, ce qui traduit que le tout-venant renferme un peu plus de vides internes. Cette différence suggère que le gravier tout-venant peut nécessiter une quantité d'eau légèrement plus importante lors du gâchage du béton. Les graviers roulés, avec un taux d'absorption très faible, présente une structure très compacte, limitant l'absorption d'eau.

### 3.2.9 Essai Los Angeles

La **figure 3.5** présente sous forme d'histogramme les différentes valeurs des coefficient Los Angeles de nos graviers d'étude.



**Figure 3.5 Coefficient Los Angeles**

L’histogramme de la **figure 3.5** présente les valeurs du coefficient Los Angeles obtenues pour les trois types de graviers étudiés. Les graviers concassés et les graviers tout-venants affichent respectivement des coefficients de 17,44% et 22,66%, indiquant une bonne résistance à la fragmentation. Ces valeurs demeurent inférieures à la limite de 45%, qui constitue la valeur maximale recommandée pour les granulats destinés à la fabrication du béton.

En revanche, les graviers roulés présentent un coefficient Los Angeles de 55.86%, largement supérieure à la valeur admissible. Cette valeur élevée traduit une faible résistance aux chocs et à l’usure, caractérisant ainsi un granulats de qualité médiocre du point de vue mécanique. Par conséquent, ce type de gravier ne satisfait pas aux critères requis pour son utilisation dans le béton.

### **3.2.10 Essai de consistance**

Le **tableau 3.6** présente les résultats de l’essai de consistance du ciment cimera.

**Tableau 3.6 la consistance du ciment**

<b>Essais</b>	<b>Masse du ciment gr</b>	<b>W en %</b>	<b>Volume en g</b>	<b>Profondeur mm</b>
1	500	27	135	27
2	500	28	140	21
3	500	37	185	19
4	500	38	190	8
5	500	39	195	7

Comme nous pouvons bien le remarquer au niveau du **tableau 3.6**, quand le % d'eau (W) égale à 39% nous avons un enfoncement égal à 7mm, un enfoncement qui répond à l'objectif de l'essai. Nous remarquons également, quand le % d'eau (W) égale à 27% la pâte est un peu trop sèche et qu'il fallait augmente de l'eau.

### **3.3 RESULTATS DE LA FORMULATION DU BETONS**

Dans cette partie, seront présentés les résultats de la formulation des bétons. La méthode utilisée été seul de Dreux-Gorisse qui nous a permis d'obtenir le dosage en divers éléments pour une résistance caractéristique visée de 20 MPa. Il est à préciser que nous avons eu à faire trois formulations pour les trois différents types de nos graviers d'étude.

#### **3.3.1 Données de base de la formulation**

**Tableau 3.7 Données de base pour la formulation**

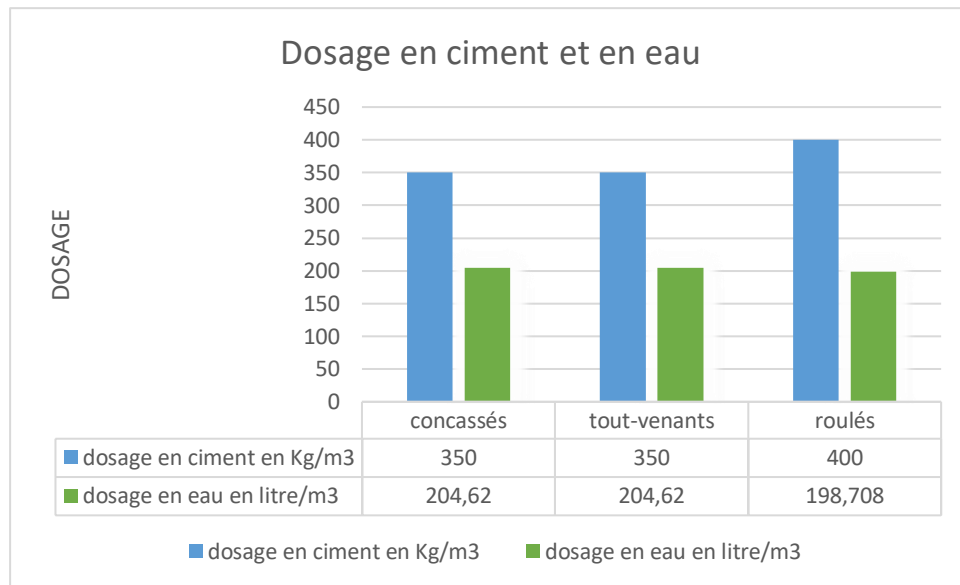
<b>FORMULATION DU BETON AU GRAVIERS CONCASSES</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Valeurs</b>
Résistance visée à 28 jours	20Mpa
Classe vraie du ciment	38Mpa
Affaissement désiré	8cm
Dimension du plus gros granulats	25mm
<b>FORMULATION DU BETON AU GRAVIERS TOUT-VENANTS</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Valeurs</b>
Résistance visée à 28 jours	20Mpa
Classe vraie du ciment	38Mpa
Affaissement désiré	8cm
Dimension du plus gros granulats	25mm
<b>FORMULATION DU BETON AU GRAVIERS ROULES</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Valeurs</b>
Résistance visée à 28 jours	20Mpa
Classe vraie du ciment	38Mpa
Affaissement désiré	6cm
Dimension du plus gros granulats	25mm

### 3.3.2 Calcul des dosages

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

#### 3.3.2.1 Dosage en eau et en ciment

L'histogramme de la *figure 3.6* présente les différentes valeurs trouvées pour chaque type de graviers et selon le niveau de la formulation. Le dosage en eau et en ciment, pour un mètre cube de béton, a été obtenu à l'aide de la *formule 2.17* dite de bolomey.



**Figure 3.6 Dosage en ciment et en eau**

Comme nous pouvons le remarquer sur cet histogramme, les graviers concassés et les tout-venants présentent les mêmes dosages, soit  $350 \text{ kg/m}^3$  de ciment et  $204,62 \text{ l/m}^3$  d'eau. Cette similitude s'explique par leur coefficient granulaire  $G = 0,5$ , présenté dans le **tableau 2.4**, ce qui les classe dans la catégorie des granulats de qualité courante à bonne. En revanche, les granulats roulés montrent une différence au niveau du dosage, avec  $400 \text{ kg/m}^3$  de ciment et  $198,708 \text{ l/m}^3$  d'eau. Cette variation est liée à leur coefficient granulaire plus faible  $G = 0,4$ , selon la **formule 2.17**, correspondant à des granulats de qualité passable.

### 3.3.2.2 Dosage en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide de la courbe de référence OAB qui nous a permis de déterminer les proportions du sable et de nos différents graviers. Le **tableau 3.8** présente les différents cordonnés de la courbe de référence.

**Tableau 3.8 Coordonnées des courbes de référence OAB**

<b>Béton avec gravier concassés</b>			
<b>Désignation</b>	<b>O</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
X (mm)	0	11,25	31,5
Y (%)	0	46,89	100
<b>Béton avec gravier tout-venants</b>			
<b>Désignation</b>	<b>O</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
X (mm)	0	11,25	31,5
Y (%)	0	46,89	100
<b>Béton avec graviers roulés</b>			
<b>Désignation</b>	<b>O</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
X (mm)	0	11,25	31,5
Y (%)	0	42,89	100

A partir des coordonnées de la courbe de référence, nous pouvons déduire les proportions pondérales des granulats ainsi que les dosages massiques des constituants entrant dans la formulation du béton. Le *tableau 3.9* présente les différents dosages massiques des constituants.

**Tableau 3.9 Dosage massique des granulats du béton**

<b>Béton avec gravier concassés</b>		
<b>Désignation</b>	<b>% des granulats</b>	<b>Dosage en Kg/m3</b>
Sable	45	831,11143
Gravier	55	1006,19823
<b>Béton avec gravier tout-venants</b>		
<b>Désignation</b>	<b>% des granulats</b>	<b>Dosage en Kg/m3</b>
Sable	44,75	826,49414
Gravier	55,25	987,86967
<b>Béton avec graviers roulés</b>		
<b>Désignation</b>	<b>% des granulats</b>	<b>Dosage en Kg/m3</b>
Sable	41	749,98655
Gravier	59	1081,96418

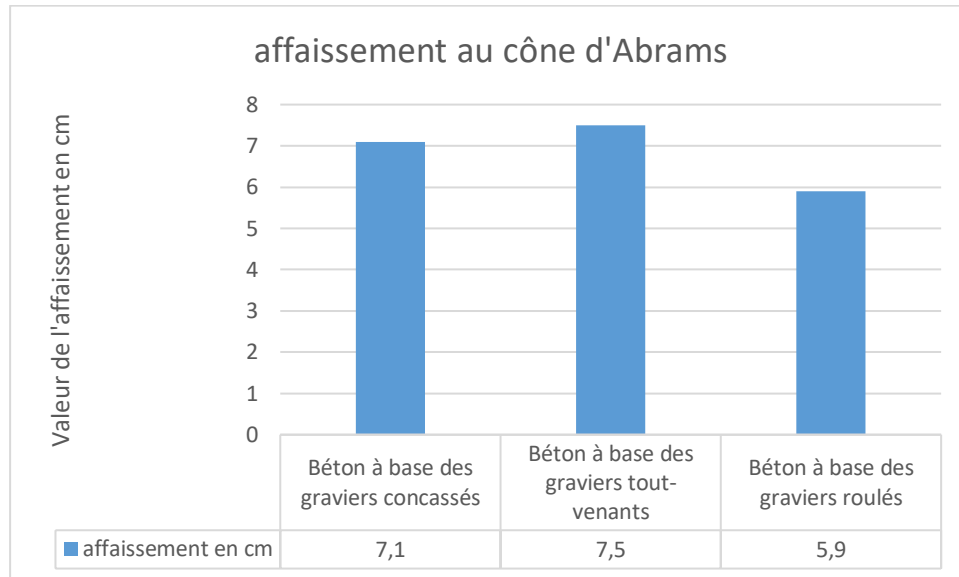
## 3.4 CARACTERISTIQUES DU BETON

### 3.4.1 Caractéristique à l'état frais

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de l'affaissement au cône d'Abrams de nos différents béton.

### 3.4.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

L'affaissement au cône d'Abrams a permis d'évaluer l'ouvrabilité des bétons confectionnés. L'historgramme de la **figure 3.7** présente les différentes valeurs d'affaissement trouvés pour nos différents bétons.



**Figure 3.7 Valeur de l'affaissement**

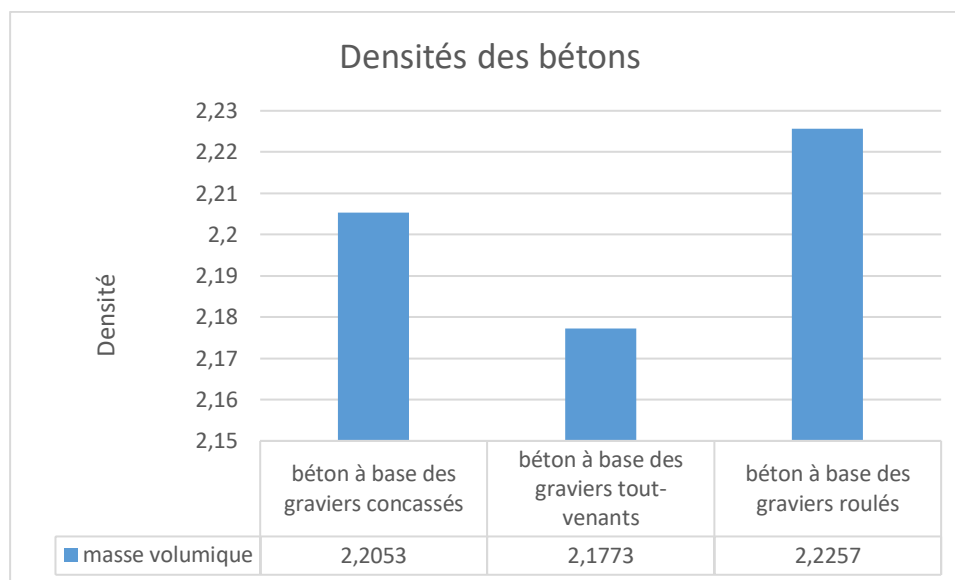
La lecture de l'historgramme de la **figure 3.7** montre que les affaissements obtenus pour les différents bétons varient selon la nature des granulats utilisés. Les valeurs obtenues sont de 7,1 cm pour le béton à base des graviers concassés, 7,5 cm pour le béton à base des graviers tout-venant et 5,9 cm pour le béton contenant des graviers roulés. Ces valeurs se situent toutes dans l'intervalle de 5 à 9 cm, correspondant à un béton plastique pouvant servir pour les semelles coffrées, mur de soutènement, plancher, dalles, poteaux et voiles.

Il est important de souligner que ces valeurs d'affaissement ont été atteints après un ajout d'eau respectif de 25% pour le béton à base des graviers concassés, 21% pour tout-venant et 14% pour le béton à base des graviers roulés. On constate que le béton à base des graviers concassés nécessite une quantité d'eau plus importante pour obtenir une bonne ouvrabilité, en raison de la forme anguleuse et de la surface rugueuse de ces granulats. En revanche, les graviers roulés permettent d'obtenir plus facilement un béton plastique avec une quantité d'eau plus faible grâce à leur forme arrondie.

### 3.4.2 Caractéristique à l'état durci

#### 3.4.2.1 Densité du béton durci

L'histogramme de la *figure 3.8* présente les différentes valeurs de densités de nos bétons d'étude à l'état durci.

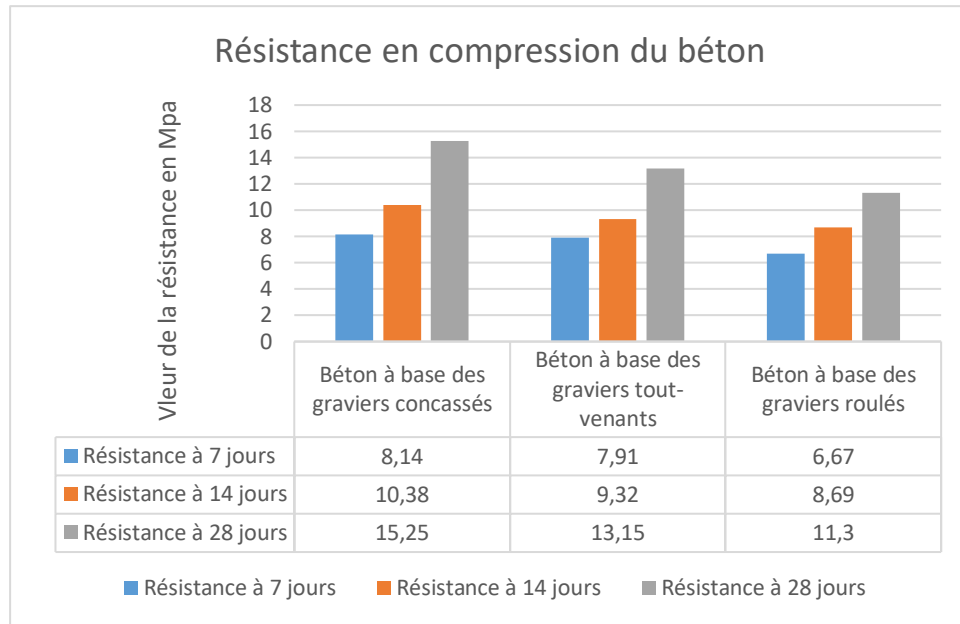


*Figure 3.8 Densités des bétons à l'état durci*

Les résultats obtenus de la densité de nos bétons montrent qu'ils sont applicables pour les poteaux, dalles, poutres, ...

#### 3.4.2.2 Résistance en compression

L'histogramme de la *figure 3.9* présente les résultats de la résistance à compression à 7 jours, 14 jours et à 28 jours afin d'apprécier l'évolution de la résistance à la compression exprimée en Mpa.



**Figure 3.9 Résistance à la compression**

L'analyse de l'histogramme de la **figure 3.9** montre que la résistance à la compression du béton augmente progressivement avec l'âge pour les trois types de granulats étudiés. À l'âge 28 jours, qui constitue l'âge de référence pour l'évaluation des performances mécaniques du béton, le béton à base de graviers concassés présente la résistance la plus élevée, soit 15,25 Mpa, suivi du béton à base de graviers tout-venant avec 13,15 Mpa, tandis que le béton à base de graviers roulés affiche la résistance la plus faible, soit 11,3 Mpa. L'analyse comparative des résultats montre que la résistance du béton à base de graviers tout-venant est inférieure de 13,77% à celle du béton à base de graviers concassés. De même, le béton à base de graviers roulés présente une résistance inférieure de 25,9% par rapport à celle obtenue avec les graviers concassés. Enfin, l'écart entre le béton à base de graviers tout-venant et celui à base de graviers roulés est d'environ 14,07%.

Ces résultats montrent que le béton fabriqué avec des graviers concassés possède de meilleures performances mécaniques, malgré un dosage en ciment identique à celui du béton à base de graviers tout-venants (350 kg/m<sup>3</sup>). En revanche, les graviers roulés, bien qu'utilisant un dosage en ciment plus élevé (400 kg/m<sup>3</sup>), présente des résistances faibles. Les différentes résistances en compression obtenues à 28 jours permettent d'estimer que le béton se situe dans l'intervalle des classes C8/10 à C12/15 selon la norme NF EN 206. Ces classes caractérisent un béton ordinaire, pouvant être utilisé pour des ouvrages peu sollicités, tel que la stabilisation des fondations, les bétons de propreté, les

revêtements de sols dans un environnement non agressif, ainsi que certains éléments structurels ou non structurels faiblement armés.

### **3.5 CONCLUSION PARTIELLE**

Le présent chapitre a porté sur la présentation et interprétation des résultats issus des essais expérimentaux réalisés en laboratoire. Il a permis de présenter les résultats de la caractérisation des matériaux ainsi que les résultats issus de la formulation des bétons étudiés. L'analyse des essais effectués a également conduit à l'évaluation des propriétés des bétons d'études, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

## CONCLUSION GENERALE

Le présent travail avait pour objectif principal d'étudier l'influence morphologique des granulats sur les propriétés de béton ordinaire. Dans le domaine du génie civil, les granulats constituent la plus grande proportion dans la composition du béton et leurs caractéristiques physiques peuvent influencer de manière significative le comportement du béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. La prise en compte des paramètres morphologiques des granulats apparaît ainsi comme un facteur essentiel pour l'optimisation des propriétés du béton.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse morphologique des granulats a été réalisée principalement à travers deux paramètres notamment l'indice d'aplatissement et l'indice de forme. Ces paramètres permettent de caractériser la géométrie des grains et d'évaluer leur influence sur les propriétés du béton. L'étude a été menée sur trois types de graviers appartenant à la classe 15/25, à savoir les graviers concassés, les graviers tout venants et les graviers roulés. Les résultats obtenus pour l'indice d'aplatissement ont montré des différences selon la nature des granulats étudiés. Les graviers concassés présentent l'indice d'aplatissement le plus élevé avec une valeur de 9,25%, suivis des graviers tout-venants avec 7,35%, tandis que les graviers roulés présentent la valeur la plus faible avec 6,5%. Cette différence s'explique essentiellement par le mode de production des granulats. Le processus de concassage provoque la fragmentation des roches suivant leurs plans de faiblesse, ce qui génère des particules anguleuses et parfois plates ou allongées, augmentant ainsi la proportion de grains aplatis. À l'inverse, les granulats roulés subissent une usure naturelle lors de leur transport dans le milieu alluvionnaire, ce qui entraîne l'élimination progressive des arêtes et des formes plates, produisant ainsi des grains plus arrondis et moins aplatis. L'étude de l'indice de forme a également permis de mettre en évidence des différences morphologiques entre les granulats étudiés. Les valeurs obtenues pour les graviers concassés et les graviers tout-venants sont respectivement de 0,515 et 0,518. Ces valeurs indiquent une forme ré concassé cubique. En revanche, les graviers roulés présentent une valeur plus élevée de l'indice de forme, égale à 0,578, traduisant une morphologie plus arrondie des grains. Cette caractéristique est généralement liée aux phénomènes d'abrasion et de polissage naturels qui se produisent lors du transport des granulats dans les cours d'eau.

L'influence de ces paramètre morphologique a également été observée à travers certaines propriétés du béton ordinaire. Les essais d'ouvrabilité ont montré que tous les bétons formulés par la méthode de Dreux Gorisse présentent un affaissement compris entre 5 et 9 cm, correspondant à une consistance plastique. Cette consistance indique que les bétons obtenus possèdent une ouvrabilité satisfaisante et peuvent être utilisés dans la réalisation d'éléments structuraux courants. Concernant la densité du béton, les résultats ont montré que le béton élaboré avec les graviers roulés présente une densité légèrement plus élevée que ceux réalisés avec les graviers concassés et tout-venants. Cette situation peut être attribuée à la forme plus arrondie des granulats roulés qui favorise un meilleur arrangement des particules et réduit les vides apparents dans le mélange.

Toutefois, malgré un dosage en ciment plus élevé de  $400 \text{ kg/m}^3$ , le béton formulé avec les graviers roulés a présenté une résistance à la compression plus faible que les bétons réalisés avec les graviers concassés et tout-venants, dosés à  $350 \text{ kg/m}^3$ . Ce résultat met en évidence l'importance de la morphologie des granulats dans l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats. Les surfaces plus rugueuses et anguleuses des granulats concassés favorisent un meilleur accrochage mécanique avec la pâte cimentaire, ce qui contribue à améliorer la résistance du béton. À l'inverse, la surface plus lisse des granulats roulé peut réduire cette adhérence, entraînant ainsi une diminution de la résistance malgré une densité plus élevée. Par ailleurs, les résistances obtenues en compression à 28 jours n'ont pas atteint la résistance cibles prévues lors de la formulation du béton. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette situation, notamment un éventuel surdosage en eau lors de la confection des bétons, ce qui peut augmenter la rapport eau/ciment et réduire la résistance du béton. De plus, la classe réelle du ciment utilisé pourrait être inférieure à la classe nominale de 42,5 Mpa, ce qui peut également influencer les performances finales du matériau. L'absence d'une classe granulaire, en particulier 8/15 dans le squelette granulaire, aurait également une incidence sur la compacité du béton et donc sur sa résistance.

De manière générale, les résultats de cette étude confirment que la morphologie des granulats constitue un facteur déterminant dans l'évaluation des propriétés de béton ordinaire. Cependant, certaines limites doivent être mentionnées dans cette étude. La caractérisation morphologique des granulats s'est limitée à deux paramètre principaux, à savoir l'indice d'aplatissement et l'indice de forme. D'autres paramètres morphologiques, tels que la rugosité de surface, l'angularité tridimensionnelle, l'indice d'allongement n'ont pas été pris en compte. De futurs chercheurs

pourraient approfondir l'analyse en intégrant ces paramètres supplémentaires et en explorant d'autres types de granulats, afin de mieux cerner leur influence sur les propriétés du béton.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] k. wang, «effets de la morphologie des particules et de la fraction volumique des granulats grossiers sur les propriétés mécanique du béton,» *frontiere de material*, vol. 10 , n° %13, pp. 1-2, 2023.
- [2] Mehta et Monteiro, structure, propriétés et béton Matériaux, New jersey: englewood cliff, 1993.
- [3] F. e. D. Georges, «nouveau guide du béton et de ses constituants,» Huitième édition, EYROLLES, 1998.
- [4] R. C. Jamkar SS, Indice de forme et de texture des particules d'agrégats grossiers comme paramètre de dosage du mélange de béton., 2004.
- [5] AFNOR (Association française de normalisation), «Recueil de normr françaises du bâtiment- Béton et constituants du béton, Tome 3 : Granultas,» AFNOR, PARIS, 1984.
- [6] A. Alinabiwe, «physique et technologie du béton,» FSTA, ULPGL, GOMA, 2021-2022.
- [7] infociment, «les constituants du ciment,» infociment (portail technique de l'industrie cimentière française), [En ligne]. Available: <https://www.infociment.fr/ciment/les-constituants-du-ciment>. [Accès le lundi le 2 mars 2026].
- [8] G. Francqueville, «La technologie du béton,» MBT France, Lisses, France, s.d.
- [9] G.Nigiri, «Technologie du béton,» faculté des science et de la technologie, université de Guelma, Algerie, 2020.
- [10] infociment, «l'eau de gâchage du béton,» infociment-portail technique de l'industrie cimentière française, [En ligne]. Available: <https://www.infociment.fr/beton/eau-de-gachage>. [Accès le 2 Mars 2026].
- [11] ir.C.G.MUHIMA, «support de cours de physique et technologie du béton,» ULPGL faculté de science et techonologie, goma, 2024.
- [12] C.A.AKEZA, «Etude et formulation d'un béton autoplaçant par la méthode de DreuxGorisse,» FSTA,ULPGL, GOMA, 2019.
- [13] F. Ngapgue, «cours de physique est technologie du béton,» FSTA, ULPGL, GOMA, 2018.

- [14] E. c. f. s. (CEN), «EN 933-3 :2012- Tests for geometrical properties of aggregates-part 3: Determination of particle shape-flakiness index,» CEN, brussels,belgium, 2012.
- [15] B. S. I. (BSI), «BS 812-105.2:1990-Testing aggregates6 part 105: Methods for determination of particle shape - section 105.2: Elongation index of coarse aggregate,» BSI, London, United Kingdom, 1990.
- [16] M. Bouchard, «Caractérisation des granulats et influence sur les propriétés du béton,» Mémoire de maîtrise, Ecole de Technologie supérieure, Montréal, Canada, 1998.
- [17] G. F. J. G. e. M. Y. A.Pierre-claude, «technologie des granulats,» 4ème édition , MODULO, 2018.
- [18] L. Bouchard, «Les granulats utilisés dans le béton,» Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, Algerie, 2009.
- [19] BRGM, «Etude technico-économique des granulats de substitution dans les bétons hydraulique,» Rapport R39261, orléans, Décembre1996.
- [20] N. K. divin, «L'amélioration des propriétés du béton confectionne a base des graviers roulés de la ville d'uvira,» GOMA, 2021-2022.
- [21] F. GHOMARI, «Cours de Matériaux de construction,» Faculté de technologie, Université ABOUBEKR BELKAID.
- [22] W. F. a. S. Thompson, «The laws of proportioning concrete,» Transaction of ASCE, Volume 59, 1907.
- [23] B. J. joe, «ETUDE MECANIQUE ET ECONOMIQUE DU BETON AUX GRAVIERS CONCASSES ET DU BETON AUX GRAVIERS TOUT-VENANTS CONFECTIONNES A GOMA,» GOMA, 2022-2023.
- [24] C. S. Marie-jeanne, «ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE BETON FAIT A BASE DES GRAVIERS TOUT-VENANTS DE GOMA ET LE BETON FAIT A BASE DES GRAVIER CONCASSES DE RUTSHURU,» GOMA, 2021-2022.
- [25] SODIAGS, «Classification des pathologie du béto : identifier, comprendre, et traiter,» SODIAGS, 11 août 2024.
- [26] SATRAS, «Tout savoir sur les pathologie du béton,» 17 juille 2025.

- [27] AFNOR/CEN, «Essai pour déterminer les caractéristique géométriques des granulats- partie 1: détermination de la granulométrie- Méthode du tamisage,» AFNOR, Paris, 2012.
- [28] N.f.N.P. 94-056, «Sols : Reconnaissance et essais-analyse granulométrique-méthode par tamis à sec après lavage,» Mars 1996.
- [29] A. Bendi-Ouis, «SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTUCTION,» 2007-2008.
- [30] AFNOR/CEN, «NF P 18-451, Béton frais : Essai d'affaissement au cône,» AFNOR, Paris, 1990.
- [31] AFNOR/CEN, «NF P 18-406, Essai de compression des éprouvettes en béton durci,» AFNOR, Paris, Décembre 1981.

# ANNEXES

## Annexe A. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRANULTAS

ANALYSE GRANULOMETRIQUE				
1. SABLE				
Prise d'essai : 3000g				
Tamis	Refus en g	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
6,3	41	41	1,36666667	98,63333333
5	36	77	2,57	97,43
4	59	136	4,53	95,47
3,15	80	216	7,2	92,8
2,5	112	328	10,93	89,07
2	120	448	14,93333333	85,06666667
1,6	116	564	18,8	81,2
1,25	174	738	24,6	75,4
1	220	958	31,93333333	68,06666667
0,8	187	1145	38,16666667	61,83333333
0,63	280	1425	47,5	52,5
0,5	122	1547	51,56666667	48,43333333
0,4	242	1789	59,63333333	40,36666667
0,315	336	2125	70,83333333	29,16666667
0,25	235	2360	78,66666667	21,33333333
0,2	253	2613	87,1	12,9
0,16	138	2751	91,7	8,3
0,125	104	2855	95,16666667	4,83333333
0,1	69	2924	97,46666667	2,53333333
0,08	40	2964	98,8	1,2
<b>MF</b>		<b>2,481333333</b>		
2. REPARTITION GRANULOMETRIQUE DES GRAVIERS				
a. GRAVIERS CONCASSES 15/25				
Masse sèche = 3000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
31,5	23	23	0,76666667	99,23
25	715	738	24,6	75,4
20	1968	2706	90,2	9,8

16	282	2988	99,6	0,4
12,5	11	2999	99,9666667	0,03
10	0	2999	99,9666667	0,03
<b>b. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25</b>				
<b>Masse sèche = 3000g</b>				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
31,5	131	131	4,37	95,63
25	1091	1222	40,7333333	59,2666667
20	1227	2449	81,6333333	18,3666667
16	495	2944	98,1333333	1,8666667
12,5	54	2998	99,9333333	0,0666667
10	0	2998	99,9333333	0,0666667
<b>c. GRAVIERS ROULES 15/25</b>				
<b>Masse sèche = 3000g</b>				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
31,5	44	44,00	1,47	98,53
25	825	869,00	28,97	71,03
20	1061	1930,00	64,33	35,67
16	766	2696,00	89,87	10,13
12,5	287	2983,00	99,43	0,57
10	8	2991	99,7	0,3

## Annexe B. EQUIVALENT DE SABLE

EQUIVALENT DE SABLE /Norme EN 933-8				
LIBELLE	EPROUVETTE 1		EPROUVETTE 2	
	H1	H2	H1	H2
Lect règle	11	11,6	10,8	11,2
Lect piston	10,53	11,6	10,17	11,2
ES règle	94,83		96,43	
ES piston	90,78		90,8	
ES Moy (%)	93,2			

## Annexe C. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES GRANULATS

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE						
<b>1. SABLE</b>						
ESSAI 1	Masse sèche(g)	400	ρ1	2,5477707	<b>MOYENNE</b>	<b>2,6451753</b>
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	557				
ESSAI 2	Masse sèche(g)	400	ρ2	2,6666667		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	550				
ESSAI 3	Masse sèche(g)	400	ρ3	2,7210884		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	547				
<b>2. GRAVIERS CONCASSES 15/25</b>						
ESSAI 1	Masse sèche(g)	400	ρ1	2,5316456	<b>MOYENNE</b>	<b>2,6201646</b>
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	558				
ESSAI 2	Masse sèche(g)	400	ρ2	2,7972028		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	543				
ESSAI 3	Masse sèche(g)	400	ρ3	2,5316456		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	558				
<b>2. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25</b>						
ESSAI 1	Masse sèche(g)	400	ρ1	2,6666667	<b>MOYENNE</b>	<b>2,5607966</b>
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	550				
ESSAI 2	Masse sèche(g)	400	ρ2	2,5157233		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	559				
ESSAI 3	Masse sèche(g)	400	ρ3	2,5		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	560				
<b>3. GRAVIERS ROULES 15/25</b>						
ESSAI 1	Masse sèche(g)	400	ρ1	2,7210884	<b>MOYENNE</b>	<b>2,5607966</b>
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	547				

ESSAI 2	Masse sèche(g)	400	$\rho_2$	2,5477707		2,6571873
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	557				
ESSAI 3	Masse sèche(g)	400	$\rho_3$	2,7027027		
	V1(ml)	400				
	V2(ml)	548				

## Annexe D MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES GRANULATS

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE						
1. SABLE						
ESSAI 1	Masse du moule (g)	4354	$\rho_1$	1,2788446	MOYENNE	
	Moule+échantillon (g)	5576				
	Masse échantillon (g)	1222				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 2	Masse du moule (g)	4354	$\rho_2$	1,299775	MOYENNE	1,2861703
	Moule+échantillon (g)	5596				
	Masse échantillon (g)	1242				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 3	Masse du moule (g)	4354	$\rho_3$	1,2798912	MOYENNE	
	Moule+échantillon (g)	5577				
	Masse échantillon (g)	1223				
	Volume du moule cm3	955,55				
2. GRAVIERS CONCASSES 15/25						
ESSAI 1	Masse du moule (g)	4354	$\rho_1$	1,1061692	MOYENNE	
	Moule+échantillon (g)	5411				
	Masse échantillon (g)	1057				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 2	Masse du moule (g)	4354	$\rho_2$	1,1103553	MOYENNE	1,1058204
	Moule+échantillon (g)	5415				
	Masse échantillon (g)	1061				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 3	Masse du moule (g)	4354	$\rho_3$		MOYENNE	
	Moule+échantillon (g)	5406				

	Masse échantillon (g)	1052		1,1009366		
	Volume du moule cm3	955,55				
<b>3. GRAVIERS TOUT-VENANTS</b>						
ESSAI 1	Masse du moule (g)	4354	$\rho_1$	0,9418659	MOYENNE	0,9945407
	Moule+échantillon (g)	5254				
	Masse échantillon (g)	900				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 2	Masse du moule (g)	4354	$\rho_2$	1,0308199		
	Moule+échantillon (g)	5339				
	Masse échantillon (g)	985				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 3	Masse du moule (g)	4354	$\rho_3$	1,0109361		
	Moule+échantillon (g)	5320				
	Masse échantillon (g)	966				
	Volume du moule cm3	955,55				
<b>4. GRAVIERS ROULES</b>						
ESSAI 1	Masse du moule (g)	4354	$\rho_1$	1,4462875	MOYENNE	1,4131478
	Moule+échantillon (g)	5736				
	Masse échantillon (g)	1382				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 2	Masse du moule (g)	4354	$\rho_2$	1,3876825		
	Moule+échantillon (g)	5680				
	Masse échantillon (g)	1326				
	Volume du moule cm3	955,55				
ESSAI 3	Masse du moule (g)	4354	$\rho_3$	1,4054733		
	Moule+échantillon (g)	5697				
	Masse échantillon (g)	1343				
	Volume du moule cm3	955,55				

## Annexe E ESSAI LOS ANGELES POUR LES GRAVIERS

### ESSAI LOS ANGELES

#### 1. GRAVIERS CONCASSES 15/25

Prise d'essai en gramme	5000
-------------------------	------

Nombre des boules utilisées	11
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	872,232

<b>Coefficient LA trouvé</b>	<b>17,44464</b>
------------------------------	-----------------

**1. GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25**

Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	11
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	1133

<b>Coefficient LA trouvé</b>	<b>22,66</b>
------------------------------	--------------

**1. GRAVIERS ROULES 15/25**

Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	11
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	2793

<b>Coefficient LA trouvé</b>	<b>55,86</b>
------------------------------	--------------

## Annexe F ABSORPTION D'EAU DES GRAVIERS

TAUX D'ABSORPTION D'EAU DES GRAVIERS	
GRAVIERS CONCASSES 15/25	
Masse sèche en (g)	1000,00
Masse humide en (g)	1021,00
<b>Abs en %</b>	<b>2,10</b>

GRAVIERS TOUT-VENANTS 15/25	
Masse sèche	1000,00
Masse humide	1026,00
<b>Abs en %</b>	<b>2,60</b>
GRAVIERS ROULES 15/25	
Masse sèche	1000,00
Masse humide	1003,00
<b>Abs en %</b>	<b>0,30</b>

## Annexe G RESULTATS DE L'ESSAI DE COMPRESSION

FORMULATIONS BETONS				
Béton à 7 jours graviers concassés				
Désignation	Masse (Kg)	Force appliquée (KN)	Résistance à 28jours (Mpa)	Résistance Moyenne (Mpa)
Éprouvette 1	14,144	141,307	7,198	<b>8,14</b>
Éprouvette 2	14,225	189,024	9,401	
Éprouvette 3	14,128	157,277	7,823	
Béton à 14 jours graviers concassés				
Éprouvette 1	14,185	198,706	9,883	<b>10,38</b>
Éprouvette 2	14,123	245,346	12,203	
Éprouvette 3	13,547	182,263	9,065	
Béton à 28 jours graviers concassés				
Éprouvette 1	14,191	302,003	15,025	<b>15,25</b>

INFLUENCE MORPHOLOGIQUE DES GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE BÉTON ORDINAIRE

Éprouvette 2	14,135	319,429	15,892	
Éprouvette 3	14,221	297,632	14,821	
<b>Béton à 7 jours graviers tout-venants</b>				
Éprouvette 1	13,951	118,342	5,887	<b>7,91</b>
Éprouvette 2	13,854	151,607	7,484	
Éprouvette 3	13,886	210,079	10,358	
<b>Béton à 14 jours graviers tout-venants</b>				
Éprouvette 1	13,964	199,185	9,554	<b>9,32</b>
Éprouvette 2	13,296	157,287	7,823	
Éprouvette 3	13,834	215,37	10,588	
<b>Béton à 28 jours graviers tout-venants</b>				
Éprouvette 1	14,025	278,888	13,875	<b>13,15</b>
Éprouvette 2	13,988	249,753	12,722	
Éprouvette 3	13,991	251,406	12,843	
<b>Béton à 7 jours graviers roulés</b>				
Éprouvette 1	14,428	170,23	8,145	<b>6,67</b>
Éprouvette 2	14,625	124,688	6,201	
Éprouvette 3	14,532	113,545	5,652	
<b>Béton à 14 jours graviers roulés</b>				
Éprouvette 1	14,629	163,758	8,145	<b>8,69</b>
Éprouvette 2	14,571	167,584	8,355	

Éprouvette 3	14,297	193,097	9,604	
<b>Béton à 28jours graviers roulés</b>				
Éprouvette 1	13,997	212,888	10,721	<b>11,3</b>
Éprouvette 2	14,56	247,924	12,331	
Éprouvette 3	14,381	217,957	10,851	

## Annexe H COEFFICIENT DE FORME ET D'APLATISSEMENT DES GRAVIERS

Coefficient de forme et aplatissement : Graviers Concassés					
Prise d'essai: 100 Graviers					
Numéro	Longueur (mm*10)	Épaisseur (mm*10)	Numéro	Longueur (mm*10)	Épaisseur (mm*10)
1	377	174	51	425	215
2	439	202	52	376	217
3	399	116	53	398	193
4	293	191	54	329	175
5	367	192	55	341	165
6	388	118	56	419	197
7	352	176	57	349	184
8	311	206	58	344	197
9	337	115	59	353	121
10	372	195	60	338	148
11	371	223	61	441	241
12	396	183	62	407	184
13	366	207	63	451	263
14	377	206	64	294	225
15	372	121	65	331	206
16	341	231	66	384	247
17	316	221	67	425	146

INFLUENCE MORPHOLOGIQUE DES GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE BÉTON ORDINAIRE

18	341	244	68	412	179
19	336	224	69	363	184
20	299	222	70	414	122
21	351	208	71	515	175
22	338	229	72	351	184
23	393	167	73	325	207
24	386	168	74	306	208
25	395	233	75	355	177
26	337	217	76	344	227
27	439	163	77	379	224
28	372	184	78	338	206
29	331	166	79	352	188
30	306	201	80	423	119
31	374	225	81	393	257
32	353	191	82	361	227
33	431	168	83	335	196
34	414	222	84	356	163
35	443	153	85	461	158
36	355	183	86	347	204
37	373	233	87	348	118
38	363	227	88	322	206
39	314	226	89	391	166
40	377	184	90	401	177
41	359	251	91	382	114
42	333	192	92	338	133
43	379	203	93	334	191
44	377	164	94	344	165
45	344	241	95	362	214
46	342	183	96	397	146
47	327	176	97	338	227
48	456	116	98	353	155
49	377	187	99	294	168
50	343	207	100	302	143
<b>S.TOTAL</b>	<b>18232</b>	<b>9635</b>	<b>S.TOTAL</b>	<b>18441</b>	<b>9252</b>
<b>TOTAL GEN. LONGUEURS (mm)</b>				<b>3667,3</b>	
<b>TOTAL GEN. EPAISSEURS (mm)</b>				<b>1888,7</b>	
<b>Coefficient de forme: Graviers Concassés</b>				<b>0,515</b>	

**Coefficient de forme et aplatissement : Graviers Tout-venants**

Prise d'essai: 100 Gravier					
Numéro	Longueur (mm*10)	Épaisseur (mm*10)	Numéro	Longueur (mm*10)	Épaisseur (mm*10)
1	338	248	51	407	234
2	421	195	52	312	113
3	487	162	53	423	179
4	526	246	54	374	221
5	405	145	55	333	197
6	424	154	56	363	191
7	394	237	57	305	121
8	392	171	58	413	154
9	457	294	59	449	216
10	425	228	60	474	186
11	426	277	61	449	243
12	413	226	62	422	206
13	427	226	63	462	205
14	435	173	64	401	202
15	453	194	65	341	219
16	427	224	66	413	246
17	486	257	67	454	192
18	418	196	68	317	185
19	382	199	69	374	118
20	395	227	70	452	214
21	355	245	71	407	258
22	398	218	72	517	218
23	332	167	73	476	265
24	383	248	74	423	274
25	358	285	75	394	122
26	489	205	76	416	245
27	429	255	77	337	244
28	422	252	78	338	188
29	427	207	79	355	244
30	454	206	80	345	163
31	482	223	81	336	197
32	383	243	82	499	226
33	355	249	83	304	172
34	418	198	84	519	228
35	406	282	85	424	193
36	444	222	86	396	202
37	376	235	87	471	236

INFLUENCE MORPHOLOGIQUE DES GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE BÉTON ORDINAIRE

38	448	246	88	412	215
39	334	121	89	336	187
40	413	257	90	334	216
41	473	225	91	325	194
42	416	174	92	362	205
43	371	254	93	465	287
44	336	204	94	324	183
45	446	120	95	353	211
46	364	254	96	443	188
47	365	173	97	385	137
48	374	115	98	426	187
49	403	269	99	363	138
50	474	226	100	323	213
<b>S.TOTAL</b>	<b>20659</b>	<b>10857</b>	<b>S.TOTAL</b>	<b>19746</b>	<b>10078</b>
<b>TOTAL GEN. LONGUEURS (mm)</b>				<b>4040,5</b>	
<b>TOTAL GEN. EPAISSEURS (mm)</b>				<b>2093,5</b>	
<b>Coefficient de forme: Grapiers Tout-venants</b>				<b>0,518</b>	

<b>Coefficient de forme et aplatissement : Grapiers roulé</b>					
<b>Prise d'essai: 100 Grapiers</b>					
<b>Numéro</b>	<b>Longueur (mm*10)</b>	<b>Épaisseur (mm*10)</b>	<b>Numéro</b>	<b>Longueur (mm*10)</b>	<b>Épaisseur (mm*10)</b>
1	433	199	51	302	117
2	233	166	52	333	208
3	339	184	53	293	175
4	386	193	54	385	205
5	367	208	55	317	216
6	359	148	56	339	226
7	266	177	57	411	135
8	347	194	58	348	194
9	308	174	59	389	188
10	278	217	60	332	217
11	283	196	61	335	248
12	233	182	62	335	119
13	306	167	63	366	178
14	301	118	64	377	166
15	348	187	65	398	219
16	352	259	66	325	248
17	343	153	67	336	249

INFLUENCE MORPHOLOGIQUE DES GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE BÉTON ORDINAIRE

18	335	188	68	388	244
19	291	181	69	312	282
20	367	163	70	337	234
21	268	207	71	361	225
22	357	175	72	334	195
23	354	155	73	353	289
24	378	243	74	377	258
25	392	205	75	368	205
26	304	195	76	335	156
27	338	121	77	362	208
28	377	226	78	375	194
29	312	219	79	411	184
30	348	237	80	362	205
31	364	183	81	355	213
32	357	231	82	288	163
33	304	183	83	287	153
34	306	224	84	275	203
35	396	254	85	394	184
36	342	186	86	354	221
37	386	216	87	316	203
38	338	243	88	319	176
39	319	175	89	368	244
40	293	218	90	407	223
41	334	121	91	336	153
42	245	217	92	386	185
43	387	164	93	298	132
44	355	183	94	392	261
45	269	161	95	325	172
46	435	224	96	327	204
47	374	126	97	359	195
48	371	202	98	296	197
49	313	196	99	355	187
50	343	246	100	277	223
<b>S.TOTAL</b>	<b>16734</b>	<b>9590</b>	<b>S.TOTAL</b>	<b>17310</b>	<b>10079</b>
<b>TOTAL GEN. LONGUEURS (mm)</b>				<b>3404,4</b>	
<b>TOTAL GEN. EPAISSEURS (mm)</b>				<b>1966,9</b>	
<b>Coefficient de forme: Graviers roulé</b>				<b>0,578</b>	

## Annexe I COURBE DE REFERENCE DES GRAVIERS

