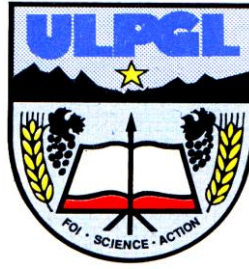


**UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**



BP. 368 GOMA

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

**FACULTÉ DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

**ÉTUDE COMPARATIVE DES PROPRIÉTÉS DU BÉTON  
FORMULÉ PAR LA MÉTHODE ACI ET LA MÉTHODE DE  
DREUX-GORISSE : Application au béton ordinaire**

Par **KABINDI BWANESHE Victoire**

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du  
Diplôme de Licence en Sciences de l'Ingénieur

**Directeur** : CT Msc. Ir **MASIKA MUHIWA Grace**

**Encadreur** : Ing. **BAHATI KAHASHI Yvan**

**Avril 2025**

## EPIGRAPHE

*« Un béton performant commence par une formulation rigoureuse et une compréhension fine de ses constituants. »*

**Adam Neville**

## **DEDICACE**

À nos chers parents, KINYERE BWANESHE Pascal et FURAHA MULAGO Françoise.

KABINDI BWANESHE Victoire

## REMERCIEMENTS

Notre profonde gratitude revient en premier lieu au Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé le souffle de vie et la santé au quotidien. Que son nom soit glorifié à jamais et pour l'éternité.

Nous exprimons également notre reconnaissance au CT. Msc. Ir MASIKA MUHIWA Grace, qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a bien voulu diriger ce travail.

Nos sincères remerciements vont à notre encadreur, l'ingénieur BAHATI KAHASHI Yvan, pour ses précieuses orientations et son accompagnement constant, malgré ses multiples occupations. Ses observations constructives ont considérablement enrichi ce travail.

Nous adressons nos vifs remerciements au corps administratif de l'Université Libre des Pays des Grands Lacs, et plus particulièrement au corps professoral de la Faculté des Sciences et Technologies (FST), qui déploie de grands efforts afin d'offrir à leurs étudiants une formation actualisée, pour leur engagement dans la transmission du savoir, ainsi que pour la qualité et la richesse de leur enseignement.

À nos chers parents, KINYERE BWANESHE Pascal et FURAHA MULAGO Françoise, nous témoignons notre profonde gratitude pour les nombreux sacrifices consentis tout au long de nos études. Nous remercions également toute notre famille pour son soutien moral et ses encouragements.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à nos amis et camarades qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont soutenus et accompagnés dans l'accomplissement de ce travail.

KABINDI BWANESHE Victoire

## RESUME

Cette étude compare la formulation du béton selon les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI afin de déterminer laquelle permet d'obtenir un béton conciliant bonne ouvrabilité, résistance mécanique satisfaisante et coût de production réduit. Deux bétons ont été formulés : l'un suivant la méthode de Dreux-Gorisse, avec un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment et un affaissement de 7,3 cm, donnant un béton plastique avec une résistance à la compression de 12,7 MPa après 28 jours ; l'autre selon la méthode ACI, avec un dosage de 293,3 kg/m<sup>3</sup> et un affaissement de 7,4 cm, aboutissant à une résistance de 8,7 MPa au même âge. Les résultats montrent qu'aucune des deux méthodes n'a permis d'atteindre la plage de résistances courantes recommandée (20 à 40 MPa), ce qui s'explique par un rapport E/C élevé lors de la confection, en raison de la recherche de l'affaissement souhaité. En termes de performances, la méthode ACI offre une meilleure ouvrabilité et un coût de production plus faible (86,57 \$). La méthode de Dreux-Gorisse, bien que plus coûteuse (97,33 \$), permet d'obtenir une résistance mécanique supérieure. Cette étude, appliquée au béton ordinaire à base de granulats concassés, ouvre la voie à de futures recherches. Il serait pertinent de comparer ces méthodes avec d'autres types de ciments (notamment de classe commerciale 42,5 MPa) et d'analyser l'impact de différents granulats (tout-venant et concassés) sur les performances du béton.

**Mots-clés** : Formulation, Méthode ACI, Méthode de Dreux-Gorisse, Béton ordinaire

## ABSTRACT

This study compares concrete mix design using the Dreux-Gorisse and ACI methods to determine which one achieves a balance between good workability, satisfactory mechanical strength, and reduced production costs. Two concrete mixes were designed: one following the Dreux-Gorisse method, with a cement dosage of 350 kg/m<sup>3</sup> and a slump of 7.3 cm, resulting in plastic concrete with a compressive strength of 12.7 MPa after 28 days; the other following the ACI method, with a cement dosage of 293.3 kg/m<sup>3</sup> and a slump of 7.4 cm, achieving a compressive strength of 8.7 MPa at the same age. The results show that neither method achieved the recommended common strength range (20 to 40 MPa), which can be attributed to a high water-to-cement ratio during mixing due to the need to reach the desired slump. In terms of performance, the ACI method provides better workability and lower production costs (\$86.57). The Dreux-Gorisse method, although more expensive (\$97.33), results in higher mechanical strength. This study, applied to ordinary concrete made with crushed aggregates, paves the way for future research. It would be relevant to compare these methods using other types of cement (notably the 42.5 MPa commercial grade) and to analyze the impact of different aggregates (all-in and crushed) on concrete performance.

**Keywords:** Mix design, ACI method, Dreux-Gorisse method, Ordinary concrete

## SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>%</b>	: Pourcentage
<b>ACI</b>	: American Concrete Institute
<b>AFNOR</b>	: Association Française de Normalisation
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>C</b>	: Dosage en ciment
<b>C/E</b>	: Rapport ciment sur eau
<b>cm</b>	: Centimètre
<b>CPA</b>	: Ciment Portland Artificiel
<b>CPJ</b>	: Ciment Portland Composé
<b>Cu</b>	: Coefficient d'uniformité
<b>Cz</b>	: Coefficient de courbure
<b>Dmax</b>	: Diamètre du plus gros granulat
<b>E</b>	: Dosage en eau
<b>EN</b>	: Norme Européenne
<b>G</b>	: Dosage des graviers
<b>Kg</b>	: Kilogramme
<b>MF</b>	: Module de finesse
<b>mm</b>	: Millimètre
<b>Mpa</b>	: Méga pascal
<b>NF</b>	: Norme Française
<b>S</b>	: Dosage en sable

## SOMMAIRE

EPIGRAPHE .....	i
DEDICACE .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RESUME .....	iv
ABSTRACT .....	v
SIGLES ET ABREVIATIONS .....	vi
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	xii
LISTE DES FIGURES .....	xiv
LISTE DES ANNEXES .....	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
0.1. Contexte.....	1
0.2. Identification et formulation du problème .....	2
0.3. Questions de recherche .....	3
0.4. Formulation des hypothèses.....	3
0.5. Justification du choix du sujet et motivations.....	3
0.6. Énoncé des objectifs de recherche .....	4
0.6.1. L'objectif général.....	4
0.6.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques .....	4
0.7. Méthodologie et délimitation du travail.....	5
0.8. Structure du mémoire.....	5

---

Chapitre I. GÉNÉRALITÉS SUR LE BÉTON.....	6
I.1. INTRODUCTION.....	6
I.2. LES CONSTITUANTS DU BÉTON.....	6
I.2.1. Le ciment.....	6
I.2.2. L'eau de gâchage.....	8
I.2.3. Les granulats.....	8
I.2.4. Les adjuvants.....	13
I.3. QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON.....	13
I.3.1. Méthode de Dreux - Gorisse .....	14
I.3.2. Méthode de Bolomey .....	14
I.3.3. Méthode de Faury.....	15
I.3.4. Méthode d'Abrams.....	15
I.3.5. Méthode de Caquot .....	15
I.3.6. Méthode de Valette .....	16
I.3.7. Méthode de Joisel.....	16
I.3.8. Méthode américaine (ACI 211) [11].....	16
I.4. PROPRIÉTÉS DU BÉTON .....	17
I.4.1. Propriétés à l'état frais.....	17
I.4.2. Propriétés à l'état durci.....	18
I.5. LES TYPES DE BÉTON .....	19
I.5.1. Bétons légers .....	19
I.5.2. Bétons lourds.....	19

I.5.3. Le béton armé.....	20
I.5.4. Le béton précontraint.....	20
I.5.5. Le béton projeté.....	20
I.5.6. Les bétons à hautes performances (BHP).....	20
I.5.7. Les bétons autoplaçants (BAP) .....	21
I.5.8. Les bétons fibrés.....	21
I.5.9. Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).....	21
I.5.10. Béton compacté au rouleau (BCR).....	22
I.6. PATHOLOGIES DU BÉTON .....	22
I.6.1. Les pathologies physico-chimiques : .....	22
I.6.2. Les pathologies mécaniques :.....	23
I.7. CONCLUSION PARTIELLE .....	24
Chapitre II. MÉTHODOLOGIE.....	25
II.1. INTRODUCTION .....	25
II.2. NATURE ET ORIGINE DES MATÉRIAUX.....	25
II.2.1. Le ciment.....	25
II.2.2. L'eau de gâchage .....	25
II.2.3. Les granulats .....	25
II.3. CARACTÉRISATION DES CONSTITUANTS.....	26
II.3.1. Échantillonnage.....	26
II.3.2. L'analyse granulométrique .....	27
II.3.3. Masse volumique absolue .....	30

II.3.4. Masse volumique apparente.....	30
II.3.5. Essai d'équivalent sable .....	31
II.3.6. Taux d'absorption .....	33
II.3.7. Essai Los Angeles .....	34
II.4. FORMULATION DU BÉTON .....	36
II.4.1. Le choix des méthodes de formulation .....	36
II.4.2. La méthode de Dreux-Gorisse .....	37
II.4.3. La méthode américaine (ACI).....	45
II.5. CARACTÉRISATION DU BÉTON .....	51
II.5.1. Caractérisation à l'état frais .....	52
II.5.2. Caractérisation à l'état durci .....	53
II.6. PROGRAMME EXPERIMENTAL .....	54
II.7. CONCLUSION PARTIELLE.....	55
Chapitre III. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	56
III.1. INTRODUCTION .....	56
III.2. PRESENTATION DES CONSTITUANTS DU BETON.....	56
III.2.1. Le ciment .....	56
III.2.2. L'eau de gâchage .....	56
III.2.3. Les granulats .....	57
III.3. CARACTÉRISATION DES MATERIAUX .....	57
III.3.1. Composition granulométrique .....	57
III.3.2. Masses volumiques .....	59

III.3.3. Equivalent de sable .....	59
III.3.4. Taux d'absorption.....	60
III.3.5. Essai Los Angeles.....	60
III.4. RÉSULTATS DE LA FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE .....	60
III.4.1. RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE DREUX-GORISSE .....	60
III.4.2. RESULTATS DE LA METHODE ACI.....	62
III.4.3. RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS DE LA FORMULATION .....	64
III.5. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS D'ÉTUDE.....	65
III.5.1. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS A L'ETAT FRAIS.....	65
III.5.2. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS A L'ETAT DURCI.....	66
III.6. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE .....	71
III.7. CONCLUSION PARTIELLE .....	71
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	72
Bibliographie .....	74

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I-1 Classification des ciments selon la résistance [6].....</i>	7
<i>Tableau I-2 Classes granulaires et caractéristiques dimensionnelles [8].....</i>	9
<i>Tableau II-1 Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [15] .....</i>	33
<i>Tableau II-2 Type des graviers selon le coefficient LA [15] .....</i>	35
<i>Tableau II-3 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire [1]....</i>	36
<i>Tableau II-4 Les valeurs du coefficient granulaire G [20].....</i>	39
<i>Tableau II-5 Correction sur le dosage en eau en fonction de Dmax [2] .....</i>	40
<i>Tableau II-6 Teneur en eau des granulats courants en litre pour 1m<sup>3</sup> de matériau (en volume apparent) [19].....</i>	41
<i>Tableau II-7 Valeurs du coefficient correcteur en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats [2] .....</i>	43
<i>Tableau II-8 Valeurs du coefficient de compacité [2].....</i>	44
<i>Tableau II-9 Affaissements recommandés par divers types de construction [23].....</i>	47
<i>Tableau II-10 (métrique). Exigences approximatives en matière d'eau de gâchage et de teneur en air cible pour différents affaissements et tailles nominales maximales d'agrégats [23] .....</i>	48
<i>Tableau II-11 (métrique). Exigences approximatives en matière d'eau de gâchage et de teneur en air cible pour différents affaissements et tailles nominales maximales d'agrégats [23] .....</i>	49
<i>Tableau II-12 Rapport E/C maximal pour les bétons exposés aux conditions sévères [22] .....</i>	49
<i>Tableau II-13 Volume du gros granulat compacté à l'état sec par unité de volume du béton [23] .....</i>	50

<i>Tableau II-14 Classe de consistance des bétons [2] .....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau III-1 Coefficient d'uniformité, de courbure et Module de finesse.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau III-2 Masses volumiques absolues et apparentes du ciment, sable et des graviers...59</i>	
<i>Tableau III-3 Données de base.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau III-4 Dosage en ciment et en eau.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III-5 Coordonnées de la courbe de référence OAB.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III-6 Dosages massiques des granulats .....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III-7 Dosage en ciment, en eau et teneur en air .....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau III-8 Dosages massiques des granulats .....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau III-9 Dosages définitifs en divers constituants des bétons .....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau III-10 Valeurs d'affaissement obtenues pour toutes les méthodes .....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau III-11 Les coûts de production de chaque béton étudié.....</i>	<i>71</i>

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure II-1</i> Abaque pour l'estimation de la quantité de ciment [19] .....	40
<i>Figure III-1</i> Ciment CIMERWA 42,5N .....	56
<i>Figure III-2</i> Granulats utilisés:(1) Graviers concassés et (2) Sable du Rwanda .....	57
<i>Figure III-3</i> Courbes granulométriques des granulats .....	58
<i>Figure III-4</i> Masse volumique des bétons à l'état frais .....	66
<i>Figure III-5</i> Masse volumique des bétons à l'état durci .....	67
<i>Figure III-6</i> Résistance à la compression des bétons (méthode de Dreux-Gorisse) en fonction d'âge .....	68
<i>Figure III-7</i> Résistance à la compression des bétons (méthode ACI ) en fonction d'âge .....	69
<i>Figure III-8</i> Résistance à la compression des bétons (méthode de Dreux-Gorisse et méthode ACI) en fonction d'âge.....	70

## LISTE DES ANNEXES

<i>ANNEXE A : ESSAIS SUR LES GRANULATS</i> .....	78
<i>A.1 COMPOSITIONS GRANULOMÉTRIQUE</i> .....	78
<i>A.2 MASSES VOLUMIQUES</i> .....	79
<i>A.2.1 Masses volumiques absolues</i> .....	79
<i>A.2.2 Masses volumiques apparentes</i> .....	79
<i>A.3 ÉQUIVALENT DE SABLE</i> .....	80
<i>A.4 COEFFICIENT D'UNIFORMITE ET DE COURBURE</i> .....	80
<i>A.4.1 COEFFICIENT D'UNIFORMITE</i> .....	80
<i>A.4.2 COEFFICIENT DE COURBURE</i> .....	81
<i>A.5 LOS ANGELES</i> .....	81
<i>ANNEXE B : ESSAI SUR LE CIMENT</i> .....	81
<i>B.1 LA MASSE VOLUMIQUE DU CIMENT</i> .....	81
<i>Annexe C : ESSAIS SUR LES BÉTONS</i> .....	82
<i>C.1 ESSAIS SUR LES BÉTONS FRAIS</i> .....	82
<i>C.1.1 DENSITE</i> .....	82
<i>C.2 ESSAIS SUR LES BÉTONS DURCI</i> .....	82
<i>C.2.1 DENSITE</i> .....	82
<i>C.2.2 RÉSISTANCE EN COMPRESSION</i> .....	83
<i>ANNEXE D : PHOTOS DES RESISTANCES MECANIQUES OBTENUES POUR CHAQUE METHODE</i> .....	83
<i>D.1 Méthode de Dreux-Gorisse</i> .....	83
<i>D.2 Méthode ACI</i> .....	85

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 0.1. Contexte

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Il se présente ainsi comme un matériau incontournable dans le domaine du génie civil grâce à ses performances et surtout à son moindre coût de production par rapport aux autres matériaux de construction [1]. On le retrouve dans tous les domaines de la construction, spécialement dans les infrastructures telles que les bâtiments, les ouvrages d'art, les routes, etc. [1].

Le béton est défini comme une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau, de granulats, et éventuellement des adjuvants sélectionnés de manière stratégique. Dans les bétons ordinaires, les granulats comprennent des grains de pierre, de sable, de gravier, de cailloux, tandis que le liant est généralement du ciment, souvent du ciment Portland. Si le mélange ne contient pas de gravier, on l'appelle du mortier [2].

Techniquement, « formuler un béton » revient à déterminer les proportions des différents éléments qui le constituent, à savoir le ciment, les granulats, l'eau et les autres éléments amélioratifs [1]. Il existe diverses méthodes de formulation du béton, parmi lesquelles la méthode de Bolomey, la méthode de Faury, la méthode de Joisel, la méthode d'Abrams, la méthode de Valette et celle de Dreux-Gorisse [3].

La formulation du béton est dite bonne si elle tient compte de tous les paramètres qui peuvent influencer les caractéristiques du béton, dont les plus recherchées sont l'ouvrabilité et la résistance [1].

Plusieurs travaux ont été menés sur ce sujet, parmi lesquels nous pouvons citer ces deux travaux :

Le premier est celui de Mme. KAKASHI MUTOMBO Fallope, qui a particulièrement retenu notre attention. Son étude s'est concentrée sur une étude comparative des méthodes de formulation du béton, notamment celles de Dreux-Gorisse, Scramtaiev et Baron Olivier. Elle a constaté que la résistance à 28 jours attendue n'a pas été atteinte pour aucune de ces trois méthodes. En particulier, la faible résistance obtenue avec la méthode de Scramtaiev est attribuée à un malaxage manuel et à une classe vraie du ciment qui ne dépasse pas 42.5 MPa, limitant ainsi la qualité du béton. Pour les méthodes de Dreux-Gorisse et de Baron Olivier,

les résistances insuffisantes à 28 jours sont également dues à une classe vraie du ciment qui ne parvient pas à atteindre 42.5 MPa, affectant ainsi la performance du béton [4].

Le deuxième travail est celui présenté par GADI Abdel Kader, MEGA Haider Ali, BACI Mohammed Ali et NECIB Djaber, dans lequel l'étude comparative des différentes méthodes de formulation du béton révèle que la méthode de Faury, avec un coefficient granulaire de 1.78, donne une résistance à la compression de 24.75 MPa à 28 jours, ce qui est significatif par rapport aux bétons courants. En revanche, la méthode de Dreux-Gorisse, avec un coefficient granulaire de 1.95, donne une résistance de 30.08 MPa à 28 jours, dépassant ainsi la résistance cible de 25 MPa. Après une majoration de 15% selon cette méthode, la résistance estimée serait de 28.75 MPa, bien que la valeur expérimentale observée soit supérieure. En comparant les deux méthodes, il a été observé que la résistance obtenue avec la méthode de Faury est inférieure de 8% à celle de la méthode de Dreux-Gorisse, probablement en raison des différences dans la structure granulaire [1].

En ce qui concerne notre propre travail, il s'agit d'une étude comparative des propriétés du béton formulé selon la méthode ACI et la méthode de Dreux-Gorisse, avec une application spécifique au béton ordinaire à base de granulats concassés.

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

La République démocratique du Congo, qui est en plein développement de ses infrastructures, a un grand besoin de matériaux de construction, notamment de béton. Malgré le respect des normes mondiales par les ateliers et chantiers de construction en RDC, les séismes révèlent souvent des défauts qui suscitent des discussions sur la qualité du béton. Les professionnels du béton disposent aujourd'hui de suffisamment de connaissances et de résultats d'essais pour prédire la résistance du béton avant son utilisation. Le choix du type de béton est désormais basé sur les besoins spécifiques de chaque projet de construction et sur l'environnement où l'ouvrage sera construit. La composition et la méthode de formulation du béton sont donc au cœur de notre problématique, compte tenu de la forte demande en matériau béton dans notre pays en pleine croissance.

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

Dans cette étude, nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Comment varient les quantités et les propriétés des constituants comme le ciment et les granulats selon les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI dans la formulation du béton ?
2. Quelles sont les différences dans les propriétés finales des bétons obtenus en utilisant les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI, en termes d'ouvrabilité, de résistance ?
3. Quelle est la différence de coût de production entre les bétons formulés selon les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI, en tenant compte des matériaux ?

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

En se référant aux questions de recherche susmentionnées, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

1. Il pourrait exister des variations dans les quantités des constituants tels que le ciment et les granulats selon les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI pour la formulation du béton. Ces variations seront déterminées après la procédure expérimentale.
2. Les bétons produits selon les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI pourraient présenter des différences d'ouvrabilité, de résistance.
3. Il est envisageable qu'il y ait une différence de coût dans la production de béton entre les méthodes de Dreux-Gorisse et de l'ACI, en tenant compte des matériaux utilisés.

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

Cette étude compare deux méthodes de formulation du béton, ACI et Dreux-Gorisse, pour mieux comprendre comment leur approche influence la résistance et l'optimisation du matériau. L'objectif est de trouver la meilleure façon d'améliorer les performances du béton tout en maîtrisant les coûts. Sur le plan technique, ces deux méthodes sont largement utilisées, mais dans des contextes différents : l'ACI est courante aux États-Unis, tandis que Dreux-Gorisse est plus répandue en Europe.

Comparer leurs résultats permet de savoir laquelle est la plus adaptée aux matériaux et aux conditions locales, ce qui aide les ingénieurs à choisir la meilleure option pour chaque projet.

D'un point de vue économique et social, mieux maîtriser la formulation du béton peut faire baisser les coûts de construction, rendre les infrastructures plus accessibles et encourager l'innovation dans le secteur. En optimisant l'utilisation des ressources, cette étude contribue aussi à une approche plus durable du bâtiment.

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

### **0.6.1. L'objectif général**

L'objectif général poursuivi dans cette étude est celui de comparer les propriétés des bétons formulés par la méthode ACI et celle de Dreux-Gorisse en vue d'en dégager l'usage.

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

En vue d'atteindre l'objectif général, nous avons poursuivi les objectifs spécifiques ci-après :

- Caractériser les différents matériaux nécessaires dans la formulation du béton,
- Formuler un béton par la méthode de Dreux-Gorisse,
- Formuler un béton par la méthode ACI,
- Comparer les propriétés des bétons obtenus notamment à l'état frais et à l'état durci et en dégager l'usage,
- Evaluer le coût de production des bétons obtenus

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

Afin de mener à bon port ce travail de fin d'étude, certaines méthodes et techniques de recherche ont été utilisés notamment :

- ❖ La technique documentaire sera utilisée pour rassembler la documentation nécessaire à notre recherche ;
- ❖ La méthode expérimentale orientera nos activités en laboratoire durant toute la durée de notre étude ;
- ❖ Les méthodes statistiques serviront à analyser les résultats obtenus et guideront nos décisions et conclusions.

## **0.8. Structure du mémoire**

Excepté l'introduction générale et la conclusion générale, ce travail est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre porte sur les généralités sur les bétons. Le deuxième chapitre traitera des matériaux, équipements et méthodes utilisés, ainsi que des procédures expérimentales en laboratoire. Le troisième chapitre se concentrera sur la présentation et l'analyse des résultats.

# Chapitre I. GÉNÉRALITÉS SUR LE BÉTON

## I.1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau composé de ciment, d'eau, de sable, de graviers et, éventuellement, d'adjuvants. Ce chapitre aborde les notions générales sur le béton. Il y sera question de présenter les composants du béton, les méthodes de formulation, les propriétés du matériau, les différents types de béton, ainsi que les pathologies associées.

## I.2. LES CONSTITUANTS DU BÉTON

Le béton est un matériau fait de plusieurs éléments. Ses caractéristiques dépendent de la qualité et de la quantité de ces éléments. Les principaux composants du béton sont le ciment, l'eau et les granulats.

En plus de ces trois éléments de base, on peut ajouter d'autres produits appelés adjuvants pour améliorer certaines propriétés du béton, selon les besoins.

### I.2.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durci par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

La majorité des propriétés du béton sont liées à la nature du ciment et à sa composition : rhéologie, résistance mécanique, résistance aux agressions chimiques, durabilité, aspect, ... d'où l'intérêt de connaître les caractéristiques de ses composants.

#### I.2.1.1. Types de ciments

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

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

- ❖ **CEM I** : Ciment Portland
- ❖ **CEM II** : Ciment Portland composé
- ❖ **CEM III** : Ciment de Haut Fourneau

- ❖ **CEM IV** : Ciment pouzzolanique
- ❖ **CEM V** : Ciment composé

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

D'autres normes existent concernant soit des propriétés particulières (prise mer : PM, résistance aux eaux sulfatées : ES, ...) soit des ciments ayant des normes entièrement spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel [5].

### I.2.1.2. Les classes de résistance

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

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

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm<sup>2</sup> (1 N/mm<sup>2</sup> = 1 Mpa = 10 daN/cm<sup>2</sup> = 10 bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée et est donnée dans le tableau I.1 [5].

*Tableau I-1 Classification des ciments selon la résistance [6]*

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

### **I.2.2. L'eau de gâchage**

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

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

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

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

Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est grâce à l'eau que le béton peut être manipulé [7].

### **I.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 en réalité ce terme signifie tout simplement une réunion de substances diverses formant un tout non homogène [8]. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent des propriétés des granulats utilisés.

En effet, les granulats se distinguent par leurs nature (origine), leur répartition granulométrique, leur masse volumique etc [2].

### I.2.3.1. Classification selon la provenance

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

- ❖ Les granulats naturels qu'on tire des carrières, des gravières ou des sablières ;
- ❖ Les granulats recyclés qui proviennent de déchets de démolition (bétons de ciment portland, enrobés bitumineux, verre broyé, matière vitrifiée ;
- ❖ Les granulats artificiels qu'on peut fabriquer pour des usages particuliers, comme les granulats légers pour béton. On trouve aussi des sous-produits d'origine industrielle comme les laitiers de haut fourneau, les scories, les cendres volantes et les résidus de mines [9].

### I.2.3.2. Classification selon la grosseur

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres. On appelle « tamisât » la partie qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis. Le terme « granulat d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments.

La norme XP P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles comme nous pouvons le voir au niveau du Tableau I-2 [8].

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

<b>Classes</b>	<b>Dimensions</b>	<b>Caractéristiques</b>
<b>Fillers</b>	0/D	D < 2mm et ayant au moins 70% de grains passant au tamis de 0,63mm
<b>Sablons</b>	0/D	D ≤ 1mm et avec au moins 70% de grains passant au tamis de 0,63mm
<b>Sables</b>	0/D	D est tel que 1mm < D ≤ 6,3mm
<b>Graves</b>	0/D	D > 6,3mm
<b>Gravillons</b>	d/D	d ≥ 1mm et D ≤ 125mm
<b>Ballasts</b>	d/D	d ≥ 25mm et D ≤ 50mm

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

### **I.2.3.3. Classification selon la destination**

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

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

### **I.2.3.4. Caractéristiques des granulats**

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

#### **i. Caractéristiques géométriques**

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

##### **1) La forme**

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

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

## **2) Le coefficient d'aplatissement**

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

## **3) L'angularité**

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

### **ii. Caractéristiques physiques**

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

#### **1) La masse volumique**

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

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

La masse volumique absolue d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci, sans tenir compte des vides le constituant. La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats secs [6].

#### **2) La porosité**

La porosité d'un granulat se définit comme le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de celui-ci. La présence de pores internes dans les sables est en rapport direct avec la densité de ceux-ci. Certains pores sont

complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface. La porosité d'un sable est liée au processus de formation de sa roche mère [2].

### **3) La teneur en eau**

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

### **4) Le taux d'absorption d'eau**

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

### **5) La propreté des granulats**

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

### **iii. Caractéristiques mécaniques**

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

Nous distinguons entre autres la résistance à la fragmentation déterminée par l'essai Los Angeles suivant les normes NF P 18-573, XP P 18-540 et ASTM C-33 ainsi que la résistance à l'attrition et à l'usure qui à son tour est déterminée par l'essai Micro-Deval suivant les normes NF P 18-577, NF EN 1097-1 et XP P 18-540 [6].

#### **I.2.4. Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci. Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides. Certains adjuvants existent en poudre, en fin de réduire leur coût de transport.

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

Selon les normes européennes, on distingue : les plastifiants, les super plastifiants, les rétenteurs d'eau, les entraîneurs d'air, les accélérateurs et retardateurs de prise, les accélérateurs de durcissement et les hydrofuges [8].

### **I.3. QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON**

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

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

### I.3.1. Méthode de Dreux - Gorisse

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

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

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

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

### I.3.2. 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 I.1 :

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

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

D : est le diamètre des plus gros grains ;

A : la valeur de A dépendra de :

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

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

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

### I.3.3. Méthode de Faury

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

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

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

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

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

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

### I.3.4. Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduit au minimum [8].

### I.3.5. Méthode de Caquot

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

### I.3.6. 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 ravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment [8].

### I.3.7. Méthode de Joisel

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

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

Comme pour les méthodes Faury et Valette, le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement, sur le plan granulométrique, à la compacité maximale ; ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200Kg/m<sup>3</sup>) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400Kg/m<sup>3</sup> dans la plupart des cas). Une correction doit donc être apportée dans ce sens [8].

### I.3.8. Méthode américaine (ACI 211) [11]

Cette méthode (ACI 211) est probablement l'une des plus populaires monde. Elle est basée essentiellement sur les travaux de chercheurs américains (ABRAMS et POWERS) est applique huit étapes. Cette méthode composée le béton sur la base des étapes suivants :

- ✓ Etape 1 : choix de l'affaissement.
- ✓ Etape 2 : choix de taille maximale des granulats (Dmax).
- ✓ Etape 3 : estimation de la quantité d'eau et l'air. L'eau est déterminée par Dmax et par l'affaissement requis alors que l'air dépend Dmax.

- ✓ Etape 4 : sélection du rapport eau / ciment, ce rapport est choisi en tenant compte de durabilité (valeur maximale spécifiée) et de la résistance à la compression, pour cette dernière, une table est donnée pour trouver le rapport eau/ciment en fonction de la résistance requise.
- ✓ Etape 5 : calcul de la quantité de ciment ce calcul est simplement fait à partir de la quantité d'eau et du rapport eau/ciment déterminé précédemment.
- ✓ Etape 6 : estimation de la quantité gravillon. La masse volumique on vrac du gravillon, mesurée selon une méthode normalisée (piquage à sec), est déterminée en premier. Elle est alors multipliée par un coefficient tabulé, qui dépend de la taille maximale du granulat et de module de finesse du sable
- ✓ Etape 7 : calcul de la quantité de sable. Cette quantité est calculée par différence entre le volume unité du gâchage et les autres volumes calculés précédemment.
- ✓ Etape 8 : ajustements finaux.

## **I.4. PROPRIÉTÉS DU BÉTON**

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

### **I.4.1. Propriétés à l'état frais**

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

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : nature et dosage en ciment, forme et dimensions des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau puisse être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances et par un phénomène de ressuage, qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité, d'hydratation du ciment et de respect des spécifications liées à la classe d'exposition à laquelle est soumis l'ouvrage.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur le chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou "slump test", qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique (norme d'essai NF EN 12350-2). L'ouvrabilité d'un béton est sa capacité à maintenir, durant un temps déterminé, une fluidité compatible avec les caractéristiques du coffrage ou du moule et les moyens de mise en place prévus [5].

## **I.4.2. Propriétés à l'état durci**

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

De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres propriétés telles que la perméabilité, la porosité etc. Pour maximiser la résistance du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat [12].

### **I.4.2.1. Cure humide**

En présence d'une humidité relative ( $HR \geq 80\%$ ) et tant qu'il y a des grains de ciment non encore hydratés, le béton continuera à durcir dans le temps. Lorsque  $HR < 80\%$ , l'hydratation peut s'arrêter. Si par contre, on sature le béton de nouveau, l'hydratation reprendra. Il est toutefois conseillé d'assurer un bon murissement du béton dès le jeune âge d'une manière continue jusqu'à atteindre les performances voulues [12].

### **I.4.2.2. La résistance à la compression**

La résistance mécanique du béton est caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton et du rapport E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment). La contrainte maximale en compression est évaluée par un test de compression uniaxial sur une éprouvette cylindrique de longueur L et de diamètre  $\emptyset$ .

Le choix de réaliser le test à 28 jours d'âge n'est que purement normatif [12].

### **I.4.2.3. La masse volumique du béton durci**

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

### **I.4.2.4. La porosité**

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

- i.** L'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés ;
- ii.** L'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité [12].

## **I.5. LES TYPES DE BÉTON**

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

### **I.5.1. Bétons légers**

La norme NF EN 206-1 définit les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2000 kg/m<sup>3</sup>, parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction.

### **I.5.2. Bétons lourds**

C'est un béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m<sup>3</sup>, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celle des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau.

### **I.5.3. Le béton armé**

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

### **I.5.4. Le béton précontraint**

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

### **I.5.5. Le béton projeté**

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

### **I.5.6. Les bétons à hautes performances (BHP)**

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

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

Ils présentent une micro texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs. La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité.

### **I.5.7. Les bétons autoplaçants (BAP)**

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

### **I.5.8. Les bétons fibrés**

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

On distingue trois grandes familles de fibres.

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

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, bi ondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m<sup>3</sup> de béton.

### **I.5.9. Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)**

Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP), derniers nés de cette génération de bétons, sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250 Mpa.

Leur formulation fait appel à des adjuvants super plastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques ou organiques).

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- ❖ Une très grande ouvrabilité ;
- ❖ Une compacité très importante ;

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

### **I.5.10. Béton compacté au rouleau (BCR)**

Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux (cendres volantes, fibres calcaires, résidus miniers etc...). Il est utilisé pour la construction de barrages en raison de sa faible chaleur d'hydratation initiale (béton de masse) et aussi très utilisé au Canada dans la construction des routes [13].

## **I.6. PATHOLOGIES DU BÉTON**

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

Nous allons subdiviser ces pathologies en deux catégories [14] :

### **I.6.1. Les pathologies physico-chimiques :**

**I.6.1.1. La carbonatation :** le portlandite du ciment hydraté réagit petit à petit avec le CO<sub>2</sub> de l'air. Cette réaction réduit donc le pH du béton de 13 à 9 environ. Il se fait remarquer par la corrosion des armatures entraînant le gonflement voire l'éclatement du béton.

**Traitement :** utilisation des bétons peu poreux, avec un ciment composé générant peu de portlandite (ciment au laitier, aux cendres, fumée de silice, etc.) [14].

**I.6.1.2. Attaque par les ions chlorures :** les ions chlorures peuvent pénétrer à travers les réseaux poreux du béton et provoquer l'amorce de la corrosion. Il se fait remarquer par la corrosion des armatures avec présence des fissures dans le béton, réduction de la section des

aciers, éclatement local du béton et apparition des rouilles à la surface du béton sous forme de tache non esthétique.

**Traitement** : utilisation de mortier de réparation après brossage des aciers, rajout d'armatures par scellement ou soudage. Mais pour prévenir, nous pouvons aussi choisir un béton compact, d'un enrobage conforme aux règles de l'art et d'un ciment adapté, utilisation d'armatures en acier galvanisé ou en inox [14].

**I.6.1.3. Alkali-réaction** : il provient de l'incompatibilité entre les granulats et le ciment. Il se fait voir par l'apparition des réseaux des fissures multidirectionnelles et gonflement pouvant affecter la structure et générant d'autres pathologies.

**Traitement** : limiter la teneur en alcalin du béton [14].

**I.6.1.4. Réaction sulfatique interne(RSI)** : elle est dû à l'élévation de la température au-delà de 65°C d'un béton à base de constituants non adaptés, traitement thermique non approprié, à l'industrie de préfabrication ou certaines conditions de forte alcalinité, humidité et température. Pour les symptômes, ils sont les même que l'alcali-réaction en termes de fissurations et déformation.

**Traitement** : pas réellement de solution directe mais pour ralentir le phénomène, réduire les apports d'eau exogènes. Nous pouvons prévenir en limitant la température du béton avec l'utilisation de ciments peu exothermiques, eau froide, de granulats refroidies à la glace, etc [14].

**I.6.1.5. Gel et dégel** : les cycles gel et dégel fragilisent le béton. Si l'eau pénètre dans le réseau des fissures et de pores du béton pour favoriser le processus (état de saturation favorable). Il se fait observer par des fissurations internes dues à un gonflement du béton à cœur, écaillage du béton à sa surface sous l'effet du gel avec de déverglaçage.

**Traitement** : utilisation d'isolants pour éviter au béton de subir les températures inférieures à zéro. Pour prévenir, on utilise des granulats non gélifs et entraîneurs d'air [14].

## **I.6.2. Les pathologies mécaniques :**

**I.6.2.1. Désordre structurel lié à l'action des charges supérieures aux charges de service** : provient d'une mauvaise conception ou mise en œuvre déficiente. Il se manifeste par des fissures de retrait, de déformation de poinçonnement, de compression, de flexion, d'effort tranchant [14].

---

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

**I.6.2.2. Désordre structurel lié à un sinistre :** provient d'un incendie, dégât des eaux ou catastrophe naturelle de type action du vent ou séisme. Il se manifeste par des fissures mécaniques ou de retrait, de flexion, d'effort tranchant suite à des surcharges ou actions mécaniques supérieures à celles de la capacité portante.

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

Il est à noter que la meilleure protection contre ces pathologies se situe en amont de la construction, dans le choix, la qualité et la formulation des matériaux et dans leur mise en œuvre [14].

## **I.7. CONCLUSION PARTIELLE**

Ce chapitre a couvert les aspects généraux du béton. Nous y avons examiné divers éléments constituant du béton, abordé plusieurs méthodes de formulation, et décrit certaines propriétés courantes ainsi que les différentes typologies du béton. Nous terminons ce chapitre par une discussion sur les pathologies courantes du béton et les traitements associés.

Le chapitre suivant se concentrera sur la présentation des matériaux et des méthodes employées pour l'expérimentation.

## Chapitre II. MÉTHODOLOGIE

### II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre de notre travail, nous allons aborder la nature et l'origine des constituants, en déterminant certaines de leurs caractéristiques à travers divers essais, notamment l'analyse granulométrique par tamisage et les tests visant à évaluer les propriétés physiques des granulats (leurs caractéristiques intrinsèques). En plus de cela, nous exposerons les méthodes de formulation étudiées dans ce travail, ainsi que certains tests permettant de caractériser qualitativement et quantitativement les bétons, tels que l'essai d'affaissement au cône d'Abrahams et la mesure de la résistance à la compression. Enfin, nous détaillerons les modes opératoires des différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de la Faculté de Sciences et Technologies Appliquées de l'ULPGL/Goma.

### II.2. NATURE ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

Les constituants utilisés dans la confection des bétons sont de diverses natures et origines. Dans cette section, nous allons respectivement présenter la nature et l'origine du ciment, des granulats (du sable, des graviers concassés), et de l'eau de gâchage.

#### II.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans notre travail est le **ciment CIMERWA (CEM II/A-P 42,5N)** de couleur grise, produit au **RWANDA**, de classe commerciale 42,5Mpa et d'une masse volumique égale à 3,01 g/cm<sup>3</sup>.

#### II.2.2. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage employée est de qualité potable et provient de la Régie de distribution d'eau (REGIDESO). Elle est recueillie directement au robinet et est exemptée d'impuretés telles que les matières organiques ou chimiques qui pourraient altérer la qualité du béton.

#### II.2.3. Les granulats

Les granulats utilisés dans notre travail sont des concassés ainsi que des roulés, le sable est roulé et provient du **RWANDA** ; les graviers (8/25) sont issus du concassage de la roche volcanique de Goma, ils sont produits par l'entreprise **CARRIGO Sarl**.

## II.3. CARACTÉRISATION DES CONSTITUANTS

La détermination de certaines caractéristiques des granulats entrant dans les bétons est effectuée à travers des essais normalisés notamment, l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable, l'essai de masse volumique apparente, l'essai de masse volumique absolue, l'essai Los Angeles et l'essai d'absorption d'eau [15].

### II.3.1. Échantillonnage

Prélever un échantillon d'un matériau consiste à isoler une portion de celui-ci pour effectuer des essais, en veillant à ce que cette portion représente fidèlement l'ensemble du matériau dont on souhaite déterminer les caractéristiques. Autrement dit, la fraction prélevée doit avoir les mêmes propriétés que la partie restante. L'échantillon destiné au laboratoire correspond à la quantité de matériau requise pour réaliser les essais dans des conditions optimales. Cette quantité doit impérativement être au moins deux fois supérieure à la masse nécessaire pour les essais prévus.

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

#### II.3.1.1. Techniques d'échantillonnage [16]

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

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

## **II.3.2. L'analyse granulométrique**

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

### **II.3.2.1. But de l'essai**

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

### **II.3.2.2. Principe de l'essai**

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

### **II.3.2.3. Mode opératoire**

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

- Nettoyer Les tamis à l'aide d'une brosse métallique
- Constituer la colonne de tamis en respectant l'ordre des ouvertures des mailles en fonction du matériau
- Introduire l'échantillon de Masse  $M_s$  sur le tamis de la colonne, après l'avoir lavé et passé à l'étuve pendant 24 heures à  $105^\circ\text{C}$  ;
- Mettre en place le couvercle ;
- Fixer la colonne des tamis sur le vibrotamis ;
- Tamiser de manière discontinue ;
- Peser les refus cumulés des tamis, en commençant par celui du tamis supérieur ;
- Exprimer les refus cumulés par rapport à la masse initiale  $M_s$ , et déduction des pourcentages des tamisât cumulés.

### II.3.2.4. Expression des résultats

Les masses des différents refus ont été rapportées à la masse initiale du matériau et ont été exprimées en pourcentage. Ces pourcentages ont servi dans le traçage de la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D en abscisse.

### II.3.2.5. Caractéristiques liées à la granulométrie

Les caractéristiques associées à la granulométrie sont utilisées pour caractériser les granulats en fonction de leur taille de grains. Parmi ces caractéristiques, on trouve le module de finesse, le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure.

#### i. Module de finesse

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

La relation (II.1) permet de déterminer le module de finesse :

$$MF = \frac{1}{100} \sum Refus\ cumulés\ en\ \% des\ tamis \quad (II.1)$$

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

Le module de finesse (**2,8 < MF < 3,2**) correspond à des sables à utiliser dans la recherche de résistances élevées, avec comme conséquence une moindre ouvrabilité et des risques de ségrégation [2].

## ii. Coefficient d'uniformité (Cu)

La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité appelé aussi coefficient de HAZEN [2].

Il est déterminé à l'aide de la formule II.2.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (II. 2)$$

Avec :

- ❖  $D_{60}$  : dimension du tamis correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖  $D_{10}$  : dimension du tamis correspondant à 10% de tamisât.
- La granulométrie est dite **serrée (ou uniforme)** si Cu est inférieur ou égal à 2
- La granulométrie est dite **étalée (ou variée)** si Cu est supérieur à 2.

## iii. Coefficient de courbure (Cz)

Ce coefficient permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres D10 et D60. Il est déterminé à l'aide de la formule II.3.

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (II. 3)$$

Avec :

- ❖  $D_{60}$  : dimension du tamis correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖  $D_{30}$  : dimension du tamis correspondant à 30% de tamisât ;
- ❖  $D_{10}$  : dimension du tamis 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  $D_{10}$  et  $D_{60}$  et on dit que **la granulométrie est mal graduée**.

### II.3.3. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains [7]. L'essai de la masse volumique absolue s'est effectué par la méthode de l'éprouvette graduée conformément à la norme NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour le sable [7].

Le mode opératoire pour cet essai est le suivant :

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

La masse volumique absolue  $\rho$  sera ainsi déterminée à partir de la relation II.5.

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_s}{v_2 - v_1} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$M_s$  : Masse d'eau dans l'éprouvette

$V_2$  : Volume d'eau avec les granulats

$V_1$  : Volume d'eau dans l'éprouvette gradué

### II.3.4. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente c'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains [7]. L'essai de la masse volumique apparente s'est effectué selon les normes NF P 18-544 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables [7].

Il consiste au remplissage d'un récipient vide de volume ( $V$ ) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule II.6.

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_s}{V} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- ❖  $\rho_{app}$  : la masse volumique apparente,
- ❖  $V$  : le volume du récipient
- ❖  $M_s$  : la masse sèche du matériau.

### **II.3.5. Essai d'équivalent sable**

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer le degré de propreté d'un sable. Les impuretés dans le sable sont de trois formes. Ils peuvent être des matières organiques, de l'argile et les matériaux fins (issus du concassage ou du broyage des roches). Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai de l'équivalent sable selon la norme NF P 18-598.

Dans cette section nous présentons respectivement le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que l'expression des résultats [15].

#### **II.3.5.1. But de l'essai**

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

#### **II.3.5.2. Principe**

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

#### **II.3.5.3. Mode opératoire**

L'essai d'équivalent de sable s'effectue sur un échantillon de sable sec d'une masse sèche équivalent à 120g afin d'éviter les pertes des fines particules suivant les prescriptions de la norme NF EN 933-8 (1999). La procédure suivie est :

- Remplissage de deux éprouvettes par la solution lavante jusqu'au premier repère, suivit du versement de la quantité de sable tarée sujet de l'essai ;
- Elimination des bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main suivi d'un repos de 10 minutes ;
- Bouchage des éprouvettes suivit de l'agitation à l'agitateur faisant un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes) ;

- Lavage et remplissage des éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface ;
- Fermeture du robinet au deuxième trait de jauge (supérieur) et on sort le tube laveur ;
- Repos des éprouvettes pendant 20 minutes en évitant toute vibration ;
- Mesure à vue des hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  ( $h_2$  est entachée d'incertitude)
- Mesure à piston de la hauteur  $h'_2$ , pour plus précision ;

#### II.3.5.4. Expression des résultats

Les résultats de l'équivalent de sable s'expriment en pourcentage. Ils se calculent à partir de la relation II.4.

$$ES = \frac{H_2}{H_1} * 100 \quad (II. 4)$$

Avec :

- ❖  $H_2$  : Hauteur du dépôt de sable visible (cm) ;
- ❖  $H_1$  : Hauteur totale (sable + flocculats) (cm) ;
- ❖  $ES$  : Equivalent de sable (%).

#### II.3.5.5. Interprétation des résultats

À l'issue des résultats de l'essai d'équivalent de sable, celui-ci est classifié selon le degré de propreté qui par la suite règlemente son domaine d'utilisation selon le Tableau I-1 [15].

*Tableau II-1 Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [15]*

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

### II.3.6. Taux d'absorption

L'absorption d'eau ( $Ab$  %) des sables est par définition le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Plus les sables sont plus denses, moins ils sont poreux étant donné qu'ils ont des surfaces plus lisses.

L'absorption d'eau, importante et variable des sables a toujours été considérée comme une grosse difficulté au chantier dans la quantification d'eau nécessaire pour gâcher un béton étant donné qu'elle joue sur la plasticité des bétons. Le taux d'absorption des graviers est déterminé par un essai normalisé (NF P 18 - 555, Décembre 1990).

L'essai consiste à exprimer le rapport d'augmentation de la masse de l'échantillon de gravier en pourcentage après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon [2].

Le mode opératoire employé dans la détermination du coefficient d'absorption d'eau conforme à la norme NF P 18- 555 (1990) se présente comme suit [2]:

- Immersion de l'échantillon pendant 24 heures à 20°C à la pression atmosphérique ;
- Etalage de l'échantillon sur une surface plane non absorbante ;

- Élimination de l'eau de surface avec un tissu ;
- Pesage de la masse  $M_a$  ;
- Séchage de la masse  $M_a$  pendant 24 heures à  $105^{\circ}\text{C}\pm 5$  pour obtenir la masse  $M_s$ .

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des graviers s'expriment en pourcentage et se calculent à partir de la relation II.7.

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} * 100 (\%) \quad (II.7)$$

Avec :

- ❖  $M_a$  en (g) : la masse humide
- ❖  $M_s$  en (g) : la masse sèche

## II.3.7. Essai Los Angeles

### II.3.7.1. But de l'essai

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat [2].

### II.3.7.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

### II.3.7.3. Mode opératoire

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

La procédure pour la mise en œuvre de cet essai est la suivante [17]:

- Choisir les tamis pour évaluer la classe des granulats ;
- Évaluer la masse de l'échantillon (masse sèche) à utiliser, selon la classe choisie ;
- Trouver le nombre de boules équivalent à la classe choisie (Tableau II.3)
- Déposer l'échantillon ainsi que les boules dans la machine Los Angeles ;

- Fermer la machine et calibrer le nombre de tours que celle-ci fera ;
- Lancer l'opération et attendre que la machine s'arrête ;
- Une fois l'essai terminer, ouvrir la machine et récupérer les fragments de graviers ;
- Passer les fragments au tamis de 1,6mm et évaluer la masse de tamisât ;
- Passer aux calculs et déterminer le coefficient Los Angeles.

#### II.3.7.4. Expression des résultats

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. La résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques est calculée à l'aide de la relation II.8.

$$C_{LA} = \frac{p}{P} * 100 \quad (II.8)$$

Avec :

- ❖ P : poids de matériau soumis à l'essai
- ❖ p : poids des éléments inférieurs à 1,6 mm (tamisât du tamis 1,6 mm)

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, "coefficient Los Angeles" du matériau. Plus le coefficient Los Angeles « LA » est faible, plus le granulat est résistant à la fragmentation par chocs.

#### II.3.7.5. Interprétation des résultats

Les valeurs de coefficient Los Angeles indiquent la nature du gravier et permettent d'apprécier leur qualité pour composer un béton comme présente le tableau II-2 [15].

*Tableau II-2 Type des graviers selon le coefficient LA [15]*

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

Le coefficient de Los Angeles ne doit pas excéder 45 pour les granulats pour béton. Les granulats utilisés dans la construction de chemin de fer doivent avoir un coefficient de Los Angeles compris entre 15 et 25. Les granulats utilisés dans la construction routière quant à eux, doivent avoir un coefficient de Los Angeles compris entre 25 et 35.

*Tableau II-3 Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire [1]*

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 – 6,3		7	3080 ± 20	5000 ± 2
6,3 – 10		9	3960 ± 25	5000 ± 2
10 – 14		11	4840 ± 25	5000 ± 2
10-25	10-16	11	4840 ± 25	3000
	16-25	11	4840 ± 25	2000
16 -31,5	16 – 25	12	5280 ± 25	3000
	25 – 31,5	12	5280 ± 25	2000
25 - 50	25 – 40	12	5280 ± 25	3000
	40 – 50	12	5280 ± 25	2000

## II.4. FORMULATION DU BÉTON

Formuler ou étudier la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage [4].

Dans cette section nous présentons les méthodes de formulation utilisées dans cette étude qui est notamment la méthode de Dreux-Gorisse et la méthode ACI.

### II.4.1. Le choix des méthodes de formulation

Le choix des méthodes **Dreux-Gorisse** et **ACI** dans ce travail repose sur leur facilité d'application et leur influence sur les propriétés du béton.

- ❖ Le choix de l'utilisation de la méthode de Dreux Gorisse dans notre travail a été guidé non seulement par sa facilité de mise en application mais aussi par la grande proportion de graviers qui entre dans sa formulation. La méthode de Dreux Gorisse permet une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction.
- ❖ Elle est aussi très simple d'utilisation par le fait qu'elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Elle permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulats et ciment) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges [18].
- ❖ **ACI** : Méthode plus technique, basée sur des calculs précis, garantissant une résistance et une durabilité maximales, avec une maniabilité adaptée aux exigences spécifiques du projet.

Ces deux méthodes, qui se complètent, répondent à des besoins différents en termes de performance et d'application.

#### **II.4.2. La 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 [19].

En effet, la méthode de Dreux- Gorisse a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est aussi très simple d'utilisation par le fait qu'elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Elle permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulats et ciment) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges [2].

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

Ces étapes sont les suivantes [2] :

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

#### II.4.2.1. Données de base

La dimension maximale des granulats, la résistance souhaitée et la consistance désirée sont les données de base dans la formulation du béton par la méthode de Dreux-Gorisse [2].

##### i. Dimension maximale des granulats

La dimension maximale des granulats est importante dans la composition du béton. En effet, un béton tire du granulat une bonne part de la résistance et plus particulièrement du gros granulat. Outre la Résistance, le dosage en ciment est d'autant moins élevé que les grains sont plus gros. L'emploi des granulats de qualité et de dimension D suffisante doit rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre [2].

##### ii. La résistance souhaitée

La résistance souhaitée est en général définie par la résistance en compression sur éprouvette cylindrique à 28 jours. C'est elle qui conduit directement vers le choix du dosage approximatif en ciment. Les résistances nominales à 28 jours sont majorées de 15% compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique [2].

La résistance en compression désirée est déterminée à l'aide de la relation II.9.

$$f_c = f_{c28} + 15\% \quad (II.9)$$

Avec :

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

### iii. La consistance désirée

Elle est fonction de l'élément à bétonner (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams [2].

#### II.4.2.2. Détermination du dosage en ciment et en eau

La détermination du dosage en eau et en ciment passe par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne en compression désirée et nécessite l'utilisation de la relation II.10 dite de Bolomey [2].

$$f_c = G * F_{CE} * \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (II.10)$$

Avec :

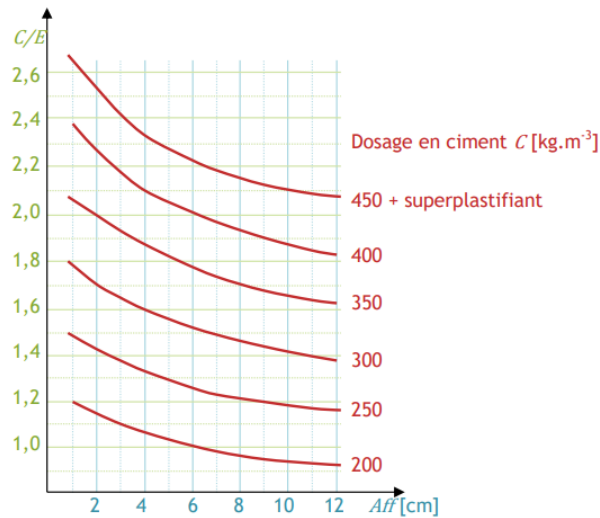
- ❖  $f_c$  : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en Mpa ;
- ❖  $F_{CE}$  : classe vraie du ciment (à 28 jours) en Mpa ;
- ❖  $C$  : dosage en ciment (en Kg/m<sup>3</sup>) ;
- ❖  $E$  : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1m<sup>3</sup>) ;
- ❖  $G$  : coefficient granulaire.

Le coefficient granulaire « G » est fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats. Le tableau II.4 donne les différentes valeurs du coefficient granulaire.

*Tableau II-4 Les valeurs du coefficient granulaire G [20]*

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

A partir de la valeur C/E calculée, la figure II.1 permet en fonction de l'affaissement au cône désiré (ouvrabilité désiré), d'obtenir le dosage en ciment nécessaire. Le rapport C/E étant déterminé en amont, la connaissance de C permet de déterminer E [2].



*Figure II-1 Abaque pour l'estimation de la quantité de ciment [19]*

Une première estimation de la quantité d'eau E est ensuite déduite du rapport C/E et de la quantité de ciment C identifiée à partir de la figure II.1. Cette quantité est ensuite corrigée en fonction de la taille des plus gros granulats  $D_{max}$  à l'aide du tableau II.5 afin de prendre en compte l'influence de la surface spécifique des granulats [20].

*Tableau II-5 Correction sur le dosage en eau en fonction de  $D_{max}$  [2]*

Dimension maximale des plus gros granulats $D_{max}$ [mm]	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63	80 à 100
Correction sur le dosage en eau E [%]	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Par ailleurs, dans la détermination de la quantité en eau pratique in situ, il est impérieux de prendre en considération la quantité en eau qu'apportent les granulats s'ils ne sont pas secs [2].

#### **i. Dosage en eau réel**

La quantité d'eau totale (sur matériaux supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, on obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant

l'eau d'apport (contenue dans les granulats), à l'aide des indications approximatives du Tableau II.6 (à défaut de mesures plus précises de la teneur en eau des granulats) [19].

*Tableau II-6 Teneur en eau des granulats courants en litre pour 1m<sup>3</sup> de matériau (en volume apparent) [19]*

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

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

En effet, il ne s'agit pas d'une simple correction plus ou moins négligeable. Si l'on emploie des granulats sortant du laveur ou ayant longtemps séjourné sous la pluie, cet apport peut atteindre une cinquantaine de litres pour 400 litres de sable et presque autant pour 800 litres de gravier soit près de la moitié de l'eau totale. Alors que si l'on emploie le dessus d'un tas de granulats stockés depuis longtemps sous le soleil en saison sèche, l'eau d'apport devient négligeable [19].

#### II.4.2.3. Détermination du dosage en granulats

La détermination du dosage en granulats d'un béton passe par le tracé de la courbe de référence, la détermination des proportions en volume des granulats, la détermination du coefficient de compacité du béton afin d'aboutir à la composition théorique du béton. Le tracé des courbes granulaires s'effectue sur un graphique normalisé AFNOR comprenant en abscisse une graduation logarithmique des tamis et en ordonné les tamisât en pourcentage. La courbe de référence se trace sur le graphique des courbes granulaires [2].

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  $XA = \frac{D_{max}}{2}$  si  $D_{max} \leq 20\text{mm}$  ;
  - Abscisse  $X_A$  située au milieu du segment gravier limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à  $D_{max}$ , si  $D_{max} > 20\text{mm}$  ;
  - L'ordonnée  $Y_A$  s'obtient à partir de la relation II.11 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.

$$YA = 50 - \sqrt{1,25D} + K' \quad \text{où } K' = K + Ks + Kp \quad (II.11)$$

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) ;
- $Kp$  : (correction supplémentaire si le béton est pompable) :  $Kp = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.
- $Ks$  : correction supplémentaire dépendant du module de finesse du sable obtenu par la relation II.12.

$$Ks = 6MF - 15 \quad (II.12)$$

Le coefficient correcteur  $K$  est fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats. Ses différentes valeurs sont présentées dans le Tableau II.7.

*Tableau II-7 Valeurs du coefficient correcteur en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats [2]*

Vibration		Faible		Normal		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (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 1 :** Correction supplémentaire  $K_s$  : si le Module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur  $K_s=6M_f-15$  ( $M_f$  étant le Module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

**Nota 2 :** Correction supplémentaire  $K_p$  : SI la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur  $K_p=+5$  à +10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

La détermination des proportions en volume se fait sur le graphique des courbes granulaires. Les lignes de partages se tracent entre chacun de granulats en joignant le point 95% de la courbe granulaire du premier au point de 5% du suivant. Le pourcentage en volume absolu des granulats correspond au point de croisement de la droite de partage et la courbe de référence OAB [2].

#### II.4.2.4 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. Il se détermine par lecture directe du Tableau II.8 qui est fonction de la consistance du béton, du serrage ainsi que de la dimension du plus gros granulat D [2].

*Tableau II-8 Valeurs du coefficient de compacité [2]*

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

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

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

La composition théorique s'établit en fonction du dosage en ciment, en granulat et du coefficient de compacité [2].

Le volume absolu des granulats est donné par la relation II.13.

$$V = \gamma - \frac{C}{\rho_c} \quad (II.13)$$

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 II.14 ci-dessous.

$$\begin{cases} V_S = \%S * V \\ V_G = \%G * V \end{cases} \quad (II.14)$$

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

Connaissant les masses volumiques spécifiques  $\rho_S$  et  $\rho_G$ , respectivement masse spécifique du sable et du gravier, on déduit les masses  $m_S$  et  $m_G$ , respectivement masse du sable et du gravier, à partir des relations II.15.

$$\begin{cases} m_S = V_S * \rho_S \\ m_G = V_G * \rho_G \end{cases} \quad (II.15)$$

### II.4.3. La méthode américaine (ACI)

La méthode ACI de conception du mélange du béton est basée sur le poids estimé du béton par unité de volume. Cette méthode prend en considération les exigences de cohérence, d'ouvrabilité, de résistance et de durabilité [21].

### II.4.3.1. Données de base pour le calcul des mélanges de béton [22]

Afin de réussir le dosage du mélange de béton, certaines données de base sont nécessaires avant de commencer la formulation :

1. Analyse granulométriques des granulats,
2. Masse volumique du gros granulat,
3. Masse volumique absolue et la capacité d'absorption des granulats,
4. Eau de gâchage requise,
5. Relation entre la résistance et le rapport E/C.

Certaines spécifications peuvent dicter le calcul des dosages des bétons :

6. Rapport E/C maximum (du point de vue résistance et/ou durabilité),
7. Dosage en ciment minimum,
8. Teneur en air (pour la résistance au gel-dégel),
9. Affaissement,
10. Taille maximale des granulats ( $D_{max}$ ),
11. Résistance du béton,
12. Adjuvants ou types de ciments spéciaux à utiliser.

### II.4.3.2. Les étapes

#### i. Etape 1 : Choix de l'affaissement [22]

Généralement, l'affaissement sera spécifié pour un travail particulier, afin de prendre en compte les méthodes prévues de malaxage et de mise en place du béton. Cependant, lorsque l'affaissement n'a pas été spécifié, des valeurs appropriées peuvent être choisies dans le Tableau II.9, qui s'applique lorsque le béton doit être consolidé par vibration. En règle générale, l'affaissement le plus bas qui permettra un placement adéquat doit être sélectionné

*Tableau II-9 Affaissements recommandés par divers types de construction [23]*

Construction en béton	Affaissement, mm(in)	
	Maximum	Minimum
Murs de fondation renforcés et semelles	75(3)	25(1)
Semelles simples, caissons et murs de sous-structure	75(3)	25(1)
Poutres et murs renforcés	100(4)	25(1)
Colonnes de bâtiment	100(4)	25(1)
Pavages et dalles	75(3)	25(1)
Béton de masse	75(3)	25(1)

**ii. Etape 2 : Choix du diamètre maximal ( $D_{max}$ ) des gros granulats [22]**

La grosseur maximale utilisable dépend à la fois des dimensions et de la forme de l'élément à couler et de la disposition des armatures et de l'épaisseur des dalles. La granulométrie influence aussi l'ouvrabilité. La taille maximale des granulats :

1. Pour le béton armé ou précontraint, le diamètre maximal ne devrait pas dépasser le un - cinquième ( $1/5$ ) de la dimension minimale entre les formes ( $D_{max} \leq d/5$ ), les trois-quarts ( $3/4$ ) de l'espacement entre les armatures,
2. Pour les dalles, la taille maximale ne devrait pas excéder le un-tiers ( $1/3$ ) de l'épaisseur de la dalle,
3. En plus de ces limitations, il a été déterminé expérimentalement que, lorsque le diamètre maximal des granulats excède 40 mm, la résistance du béton diminue en raison de la diminution de la force de liaison (adhérence) entre le granulat et la matrice.

**iii. Etape 3 : Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air [22]**

L'ouvrabilité du béton dépend premièrement de la teneur en pâte du béton, de la quantité de l'air entraîné, du diamètre maximal, de la granulométrie et de la forme des granulats.

Une estimation de la quantité de l'eau requise pour produire différents affaissements pour le béton à air entraîné et non entraîné peut être obtenue à partir du Tableau II.10.

*Tableau II-10 (métrique). Exigences approximatives en matière d'eau de gâchage et de teneur en air cible pour différents affaissements et tailles nominales maximales d'agrégats*

[23]

Affaissement, mm	Eau, kg/m <sup>3</sup> du béton pour D <sub>max</sub> du granulat donné							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	70 mm	150 mm
	<b>Béton sans air entraîné</b>							
25-50	207	199	190	179	166	154	130	113
75-100	228	216	205	193	181	169	145	124
150-175	243	228	216	202	190	178	160	-
Quantité d'air approximative (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	<b>Béton à air entraîné</b>							
25-50	181	175	168	160	150	142	122	107
75-100	202	193	184	175	165	157	133	119
150-175	216	205	197	184	174	166	154	-
Teneur en air totale moyenne recommandée pour (%) :								
Exposition légère	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposition modérée	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposition extrême	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

#### iv. Etape 4 : Choix du rapport eau/ciment (E/C) [22]

La sélection du rapport E/C approprié est guidée par les exigences de résistance ou de durabilité.

1. **Résistance** : La résistance est inversement proportionnelle au rapport E/C : dans un béton bien compacté fabriqué avec des granulats sains et propres, la résistance et les autres propriétés, sont, dans des conditions de chantier données, déterminées par la quantité d'eau de gâchage par unité de ciment (Abrams, 1918). Pour un rapport E/C constant, la résistance peut varier en fonction de la grosseur, la teneur, la texture des granulats ainsi que le type et le dosage de ciment. En l'absence des données sur la

relation entre la résistance et le rapport E/C, il est possible d'estimer la résistance à la compression à 28 jours en utilisant le Tableau II.11.

*Tableau II-11 (métrique). Exigences approximatives en matière d'eau de gâchage et de teneur en air cible pour différents affaissements et tailles nominales maximales d'agrégats [23]*

Résistance à la compression à 28 jours, Mpa	Rapport masse-eau-matériaux cimentaires	
	Béton sans air entrainé	Béton à air entrainé
45	0.38	0.30
40	0.42	0.34
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

La résistance est basée sur des cylindres durcis à l'humidité pendant 28 jours conformément à la norme ASTM C31 (AASHTO T 23). La relation suppose une taille nominale maximale d'agrégat d'environ 19 à 25 mm [22]. Adapté de ACI 211.1 et ACI 211.3.

- Durabilité** : S'il y a des conditions sévères d'expositions telles que gel-dégel, ou l'exposition à l'eau de mer ou sulfates, le tableau II.12 pourra être utilisé pour estimer le rapport E/C.

*Tableau II-12 Rapport E/C maximal pour les bétons exposés aux conditions sévères [22]*

Type de structure	Structure constamment ou fréquemment mouillée et exposée au gel et au dégel	Structure exposée à l'eau de mer ou aux sulfates
Sections minces et sections avec moins de 3cm de recouvrement sur l'armature	0.45	0.4*
Toutes les autres sections	0.5	0.45*

Le béton doit être à air entrainé, \* Si le ciment résistant aux sulfates est utilisé, le rapport E/C devra être majoré de 0.05.

**v. Etape 5 : Calcul du dosage en ciment [22]**

Une fois que l'eau de gâchage et le rapport E/C sont déterminés, la quantité de ciment par unité de volume de béton est déterminée simplement en divisant la teneur en eau par le rapport E/C.

**vi. Etape 6 : Estimation de la teneur en gros granulat [22]**

Pour une même ouvrabilité, le volume du gros granulat dépend de son diamètre maximal et du module de finesse de granulat fin. La masse à l'état sec du gros granulat requis par m<sup>3</sup> du béton est simplement égale à la valeur du Tableau II.13 multipliée par la masse volumique compactée du granulat en kg/m<sup>3</sup>.

**vii. Etape 7 : Estimation de la teneur en granulat fin [22]**

Une fois que le volume de ciment, d'eau, d'air et d'agrégat grossier est déterminé, les soustraire du volume total de béton (généralement 1 m<sup>3</sup> dans les calculs de formulation du mélange) donnera le volume d'agrégat fin. Le poids de l'agrégat fin peut alors être obtenu en multipliant ce volume par la densité de l'agrégat fin.

*Tableau II-13 Volume du gros granulat compacté à l'état sec par unité de volume du béton [23]*

Grosseur maximale des granulats mm	Volume du gros granulat compacté à l'état sec par unité de volume de béton pour différents modules de finesse de granulats fins			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81
				0.82

**Etape 8 : Ajustement pour l'humidité des granulats [22]**

La teneur réelle en humidité des agrégats affectera la teneur en eau du mélange de béton. Si l'agrégat est à l'état naturellement sec (séchage naturel à l'air), il absorbera une partie de l'eau de gâchage, réduisant ainsi le rapport E/C et l'ouvrabilité. D'un autre côté, si le granulat est à l'état saturé surface humide, l'eau à la surface des granulats contribuera à l'eau de gâchage, augmentant ainsi le rapport E/C et l'ouvrabilité mais réduisant la résistance. Par conséquent, ces effets doivent être pris en compte dans les calculs des mélanges des bétons.

**viii. Etape 9 : Ajustement de la gâchée d'essai [22]**

Après avoir estimé les proportions de tous les ingrédients, il est nécessaire de préparer une gâchée d'essai. Cette gâchée doit être testée pour l'affaissement, le poids volumique, le rendement et la teneur en air, ainsi que l'observation des tendances de ségrégation et des caractéristiques de finition. Des ajustements devront être effectués (ce qui est généralement le cas) si les proportions de la gâchée ne satisfont pas aux estimations originales.

1. Si l'affaissement est incorrect, une nouvelle quantité de l'eau de gâchage devra être estimée à partir de l'observation qu'une augmentation ou une diminution d'environ 2 kg/m<sup>3</sup> d'eau augmentera ou diminuera l'affaissement d'environ 10mm.
2. Si la quantité désirée d'air entraîné n'est pas atteinte, la quantité d'agent entraîneur d'air doit être réestimée. La teneur en eau de gâchage doit alors être augmentée ou diminuée de 2 kg/m<sup>3</sup> pour chaque augmentation ou diminution de 1% d'air entraîné, en raison de l'influence d'air entraîné sur l'ouvrabilité.
3. Tout ajustement modifiera le rendement et, par conséquent, de nouvelles quantités des composants d'une gâchée doivent être calculées, en suivant la procédure à partir de l'étape 3.

**II.5. CARACTÉRISATION DU BÉTON**

Pour ce qui est de la caractérisation du béton, il s'agit ici d'apprécier les différents comportements que présente notre béton. Pour cela, nous avons évalué ses caractéristiques à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Les principales caractéristiques du béton sont l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité [2].

## II.5.1. Caractérisation à l'état frais

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

### II.5.1.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. Elle doit être donc telle, que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. L'ouvrabilité est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de bétons classiques, elle est principalement influencée par la nature et le dosage du liant, la forme des granulats et la granulométrie et le dosage en eau [2].

L'ouvrabilité s'évalue à l'aide d'un « cône d'Abrams ». L'essai s'appelle « essais d'affaissement au cône d'Abrams » [2]. L'essai s'effectue dans un moule tronconique d'après la norme NFP 18-451 [24], 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 [2]:

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

Après démoulage et stabilisation, on mesure l'affaissement et l'interprétation des résultats se fait à partir du Tableau II.14.

Tableau II-14 Classe de consistance des bétons [2]

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

Lorsque l'affaissement est trop élevé et se trouve en dehors de la zone de tolérance, il y a risque de ségrégation (c'est-à-dire que les gros éléments de gravier risquent de descendre pour s'agglomérer vers le bas) [2].

## II.5.2. Caractérisation à l'état durci

Dans cette section, nous présentons l'essai effectué sur le béton à l'état durci, à savoir la détermination de la résistance à la compression.

### II.5.2.1. Essai de compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 12390-7 [25]. La presse que nous avons utilisée est électrique à doubles manomètres et grands plateaux.

Les résultats ont été obtenus par la relation II.16.

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (II.16)$$

Avec :

- ❖ **R<sub>cj</sub>** : la résistance à la compression à j jours en Mpa ou en N /mm<sup>2</sup> ;
- ❖ **F** : la force qui agit sur l'éprouvette en Newton(N) ;
- ❖ **A** : la section de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>.

## II.6. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Dans cette partie, nous présentons le programme expérimental qui détaille la procédure utilisée pour mener une étude comparative des propriétés du béton formulé selon la méthode ACI et la méthode de Dreux-Gorisse, avec une application spécifique au béton ordinaire à base de granulats concassés.

Pour notre étude, un béton binaire sera confectionné en se basant sur la composition du béton ordinaire et en utilisant différentes méthodes de formulation afin d'étudier les propriétés du béton pour une résistance visée de 20 MPa.

Pour la composition des bétons expérimentaux, à base de ciment Cimerwa (CEM II/A-P 42,5 N), nous utilisons un sable roulé du Rwanda avec une taille maximale de 5 mm et un gravier unique de classe 8/25. Ces granulats ont été soumis à des analyses granulométriques conformément à la norme NF EN 933-1 par voie sèche, dans le but de composer le squelette granulaire des bétons selon la méthode graphique de Dreux-Gorisse.

Dans le cadre des essais sur béton frais, nous mesurons l'affaissement avec le cône d'Abrams pour évaluer l'ouvrabilité, tout en vérifiant la densité. Les éprouvettes sont conservées en immersion dans un bac d'eau à température 20°C.

Nous procédons à des essais mécaniques en effectuant des tests de compression à chaque âge prévu (3, 7, 14 et 28 jours) afin de déterminer la résistance du béton. La densité apparente de chaque éprouvette est également mesurée avant les essais pour assurer la précision des analyses. Nous confectionnerons un béton en fonction de ces deux méthodes de formulation, à différents âges : 3, 7, 14 et 28 jours.

Au total, 24 éprouvettes seront confectionnées, réparties comme suit : 12 éprouvettes pour la méthode ACI (3 éprouvettes par âge) et 12 autres pour la méthode de Dreux-Gorisse (également 3 éprouvettes par âge).

## **II.7. CONCLUSION PARTIELLE**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux ainsi que la méthodologie employée pour obtenir les différents résultats de l'étude. Tout au long de celui-ci, nous avons donné un aperçu de la nature et de l'origine des constituants utilisés pour confectionner notre béton. Ensuite, nous avons présenté les essais effectués au laboratoire pour la caractérisation des matériaux, et enfin, nous avons décrit les méthodes de formulation utilisées, notamment la méthode de Dreux-Gorisse et celle de l'ACI, ainsi que quelques essais de caractérisation du béton et le programme expérimental.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation et à l'interprétation des différents résultats obtenus.

# Chapitre III. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

## III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à la présentation et à l'interprétation des résultats des essais effectués en laboratoire. Nous commencerons par la présentation des constituants du béton et les résultats de la caractérisation des matériaux, tels que le sable, le ciment et les graviers. Ensuite, nous exposerons les résultats des formulations de nos bétons ainsi que des essais réalisés sur ces derniers.

## III.2. PRESENTATION DES CONSTITUANTS DU BETON

Les constituants utilisés dans la confection du béton sont variés. Dans cette section, nous présenterons le ciment, les granulats (sable et graviers concassés) ainsi que l'eau de gâchage.

### III.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans notre travail est le **ciment CIMERWA (CEM II/A-P 42,5N)** de couleur grise, produit au **RWANDA**, de classe commerciale 42,5Mpa et d'une masse volumique égale à  $3,01 \text{ g/cm}^3$ .



*Figure III-1 Ciment CIMERWA 42,5N*

### III.2.2. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage employée est de qualité potable et provient de la Régie de distribution d'eau (REGIDESO). Elle est recueillie directement au robinet et est exemptée

d'impuretés telles que les matières organiques ou chimiques qui pourraient altérer la qualité du béton.

### III.2.3. Les granulats

Les granulats utilisés dans notre travail sont des concassés ainsi que des roulés, le sable est roulé et provient du **RWANDA** ; les graviers (8/25) sont issus du concassage de la roche volcanique de Goma, ils sont produits par l'entreprise **CARRIGO Sarl**.



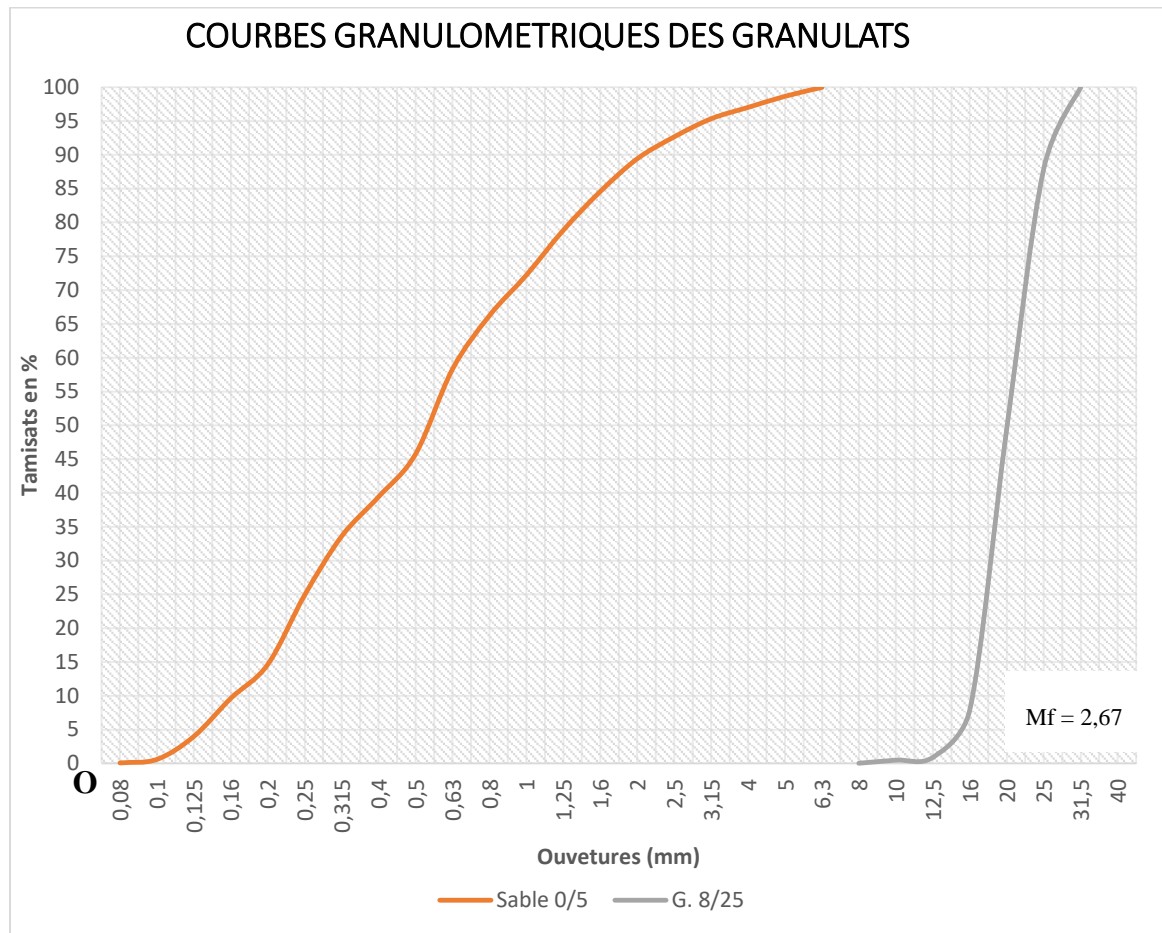
*Figure III-2 Granulats utilisés: (1) Gravier concassés et (2) Sable du Rwanda*

## III.3. CARACTÉRISATION DES MATERIAUX

Dans cette section nous présentons les résultats de la composition granulométrique, le module de finesse, le degré de propreté du sable, les masses volumiques (absolue et apparente), le taux d'absorption d'eau, ainsi que l'essai Los Angeles.

### III.3.1. Composition granulométrique

La Figure III.3 présente le graphique des courbes granulométriques du sable roulé et des graviers concassés. L'axe des abscisses reprend les différents modules des tamis (en mm) utilisés et celui des ordonnées les pourcentages cumulés des passants.



*Figure III-3 Courbes granulométriques des granulats*

La Figure III.3 présente les courbes granulométriques du sable roulé 0/5 et des graviers 8/25 ; l'allure de la courbe granulométrique du sable montre que le sable présentait une granulométrie plus ou moins préférentielle puisque la courbe est presque en S, d'où le sable n'était ni trop fin ni trop grossier.

### III.3.1.1. Coefficient d'uniformité $C_u$ , de courbure $C_z$ et Module de finesse

Le tableau III.1 présente les différentes valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure, ainsi que le module de finesse pour le sable et les graviers concassés.

*Tableau III-1 Coefficient d'uniformité, de courbure et Module de finesse*

Désignation	$C_u$	$C_z$	Mf
Sable	4,15	0,769	2,67
Graviers concassés	1,375	0,941	----

Nous remarquons que le coefficient d'uniformité des graviers est inférieur à 2, ce qui signifie que leur granulométrie est serrée ou uniforme.

En ce qui concerne le sable, ce coefficient est supérieur à 2, indiquant une granulométrie étalée ou variée. Pour le coefficient de courbure, on observe que la valeur de  $C_z$  est inférieure à 1 aussi bien pour les graviers que pour le sable, ce qui montre que dans les deux cas, la granulométrie est mal graduée.

Le sable du Rwanda utilisé présente un module de finesse de 2,67. Comme cette valeur se trouve entre 2,2 et 2,8, on peut en conclure que ce sable est parfaitement adapté pour la formulation du béton.

### III.3.2. Masses volumiques

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

*Tableau III-2 Masses volumiques absolues et apparentes du ciment, sable et des graviers*

Désignation	Ciment	Sable	Graviers
Masse volumique absolue en $g/cm^3$	3,01	2,536	2,273
Masse volumique apparente en $g/cm^3$	----	1,45	1

Comme indiqué dans le tableau III.2, la masse volumique du ciment utilisé, qui est de 3,01  $g/cm^3$ , est proche de la valeur de référence de 3,1  $g/cm^3$ .

Les masses volumiques absolues des granulats se situent entre 2  $g/cm^3$  et 3  $g/cm^3$ , ce qui les classe parmi les granulats courants.

### III.3.3. Equivalent de sable

Le degré de propreté de sable utilisé dans cette étude est de 81,656 %. Cette valeur étant supérieure à 80%, ce sable est propre et convient pour la confection du béton.

### III.3.4. Taux d'absorption

Le taux d'absorption des graviers obtenu est de 2,77 %. Cette valeur représente la quantité d'eau que ces graviers peuvent absorber.

### III.3.5. Essai Los Angeles

La valeur obtenue à l'essai de Los Angeles est de 28,16 % (graviers assez durs car elle se situe dans l'intervalle de 25 % à 30 %). Étant inférieure à 45 %, cette valeur indique que les granulats sont adaptés à la confection du béton.

## III.4. RÉSULTATS DE LA FORMULATION DES BÉTONS D'ÉTUDE

Dans cette section, les résultats de la formulation sont présentés, d'abord pour la méthode de Dreux-Gorisse, puis pour la méthode de l'ACI.

### III.4.1. RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE DREUX-GORISSE

Dans cette section sont présentés les résultats de la formulation par la méthode de Dreux-Gorisse en présentant notamment les données de base de la formulation et les différents dosages des constituants.

#### III.4.1.1. Données de base

Le tableau III.3 présente les données de base qui ont servi dans cette étude.

*Tableau III-3 Données de base*

Données	Valeurs
Classe vraie du ciment	38 Mpa
Affaissement désiré	7,5 cm
Résistance visée à 28jours	20 Mpa
Dimension du plus gros granulat (Dmax)	25mm

### III.4.1.2. Calcul des dosages

Dans cette section, sont présentés les résultats des calculs des dosages des éléments constitutifs du béton, tels que le ciment, l'eau et les granulats.

#### a. Dosage en ciment et en eau

La formule de Bolomey (II.10) et la figure (II.3) nous ont permis de déterminer le dosage en ciment et celui en eau pour un m<sup>3</sup> de béton. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau III.4.

*Tableau III-4 Dosage en ciment et en eau*

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	350
Dosage en eau (kg)	207,1

#### b. Dosage en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide des proportions du sable et graviers obtenues à partir de la courbe de référence OAB. Dans le tableau III.5 sont reprises les coordonnées de la courbe de référence.

*Tableau III-5 Coordonnées de la courbe de référence OAB*

Désignation	O	A	B
X (mm)	0	11,25	25
Y (%)	0	47,429	100

Il advient donc que le sable entre dans la composition à 44% et les graviers à 56%. Ces pourcentages sont exprimés en fonction de 100% des granulats. De ce fait les dosages massiques des granulats pour un m<sup>3</sup> de béton sont repris dans le tableau III.6.

*Tableau III-6 Dosages massiques des granulats*

Désignation	Dosages massiques (kg/m <sup>3</sup> )
Graviers	771,23
Sable	676,1

Il ressort du tableau III.6 que pour un mètre cube de béton, le dosage en sable était de 676,1 kg et le dosage en graviers de 771,23 kg.

### III.4.2. RESULTATS DE LA METHODE ACI

Dans cette section sont présentés les résultats de la formulation par la méthode ACI en présentant notamment les données de base de la formulation et les différents dosages des constituants.

#### III.4.2.1. Données de base

Les données de base qui ont servi dans cette étude sont :

- **Ciment** : CEM II (ciment Portland composé), masse volumique absolue =  $3,01 \text{ g/cm}^3$
  
- **Gros granulat (Gravier)** :
  - Capacité d'absorption = 2,77 %
  - Masse volumique absolue =  $2,273 \text{ g/cm}^3$
  - Masse volumique apparente =  $1000 \text{ kg/m}^3$
  - Dimension du plus gros granulat ( $D_{\max}$ ) = 25 mm
  
- **Granulat fin (Sable)** :
  - Masse volumique absolue =  $2,536 \text{ g/cm}^3$
  - Module de finesse = 2.67
  
- **Affaissement désiré** : 7,5 cm

#### III.4.2.2. Calcul des dosages

Dans cette section, sont présentés les résultats des calculs des dosages des éléments constitutifs du béton, tels que le ciment, l'eau, la teneur en air et les granulats.

##### a. Dosage en ciment, en eau et teneur en air

Détermination du rapport E/C : A partir du Tableau III.11, le rapport E/C requis pour donner une résistance à la compression de 28 jours de 23 MPa est estimé à **0.658** (après interpolation).

### ❖ Dosages en eau et en teneur en air

Puisque le béton ne sera exposé au cycle de gel-dégel, il doit être à air non entraîné. D'après le tableau II.10, la teneur en air recommandée est de **1,5 %**, l'eau de gâchage estimée est de **193 kg/m<sup>3</sup>**.

### ❖ Dosage en ciment

Calcul du dosage en ciment : À partir des résultats obtenus du rapport E/C et de l'eau de gâchage, le dosage en ciment requis est de **193/0.658 = 293,3 kg/m<sup>3</sup>**.

*Tableau III-7 Dosage en ciment, en eau et teneur en air*

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	293,3
Dosage en eau (kg)	193
Dosage en air (%)	1,5

### b. Dosage en granulats

#### ❖ Estimation de la teneur en gros granulat (gravier)

En faisant l'interpolation dans le tableau III.13 pour le module de finesse du granulat fin de 2.67, le volume du gros granulat compacté à sec par unité de volume de béton est de **0,683**. Par conséquent, le poids sec du gros granulat (à l'état sec) est de **0,683 x 1000 = 683 kg/m<sup>3</sup>**.

#### ❖ Estimation de la teneur en granulat fin (sable)

Connaissant le poids et la masse volumique absolue de l'eau, du ciment et du gros granulat et connaissant aussi le volume de l'air dans le mélange, le volume par m<sup>3</sup> occupé par différents ingrédients peut être déterminé comme suit :

- ❖ Eau de gâchage :  $193/1000 = 0,193 \text{ m}^3$
- ❖ Ciment :  $293,3 / (1000 \times 3,01) = 0,097 \text{ m}^3$
- ❖ Gros granulat :  $683 / (1000 \times 2,273) = 0,3 \text{ m}^3$
- ❖ Air :  $= 0,015 \text{ m}^3$

Total :  $= 0,605 \text{ m}^3$

Ainsi, le granulat fin devra occuper un volume de  $1 - 0,605 = 0,395 \text{ m}^3$

Le poids du granulat fin équivaut à :  $0,395 \times 2,536 \times 1000 = 1001,72 \text{ kg/m}^3$ .

*Tableau III-8 Dosages massiques des granulats*

Désignation	Dosages massiques (kg/m <sup>3</sup> )
Graviers	683
Sable	1001,72

### III.4.3. RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS DE LA FORMULATION

Les résultats de la formulation ont présenté les dosages en divers éléments pour chaque méthode utilisée, notamment la méthode de Dreux-Gorisse, celle d'ACI.

Dans cette section sont récapitulés ces différents dosages pour un m<sup>3</sup> de béton et leurs équivalents pour remplir 3 éprouvettes cylindriques (16x32). Le tableau III.9 en est l'illustration.

*Tableau III-9 Dosages définitifs en divers constituants des bétons*

	Désignations		Dosages massiques (kg)	
	Méthode de formulation	Constituants	Pour 1m <sup>3</sup>	Pour 3 éprouvettes (V=0,01930m <sup>3</sup> )
<b>Béton binaire</b>	Dreux-Gorisse	Ciment	350	8,1
		Sable 0/5	676,1	15,7
		Gravier 8/25	771,23	17,9
		Eau	207,1	4,8
<b>Béton binaire</b>	ACI	Ciment	293,3	6,8
		Sable 0/5	1001,72	23,2
		Gravier 8/25	683	15,8
		Eau	193	4,5

## III.5. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS D'ÉTUDE

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

### III.5.1. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS A L'ETAT FRAIS

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

#### III.5.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

Tel que préconisé par la norme NF EN 12350-2, nous avons essayé l'étalement au cône d'Abrams. Le tableau III.10 illustre les différentes valeurs d'affaissement obtenues pour toutes les méthodes.

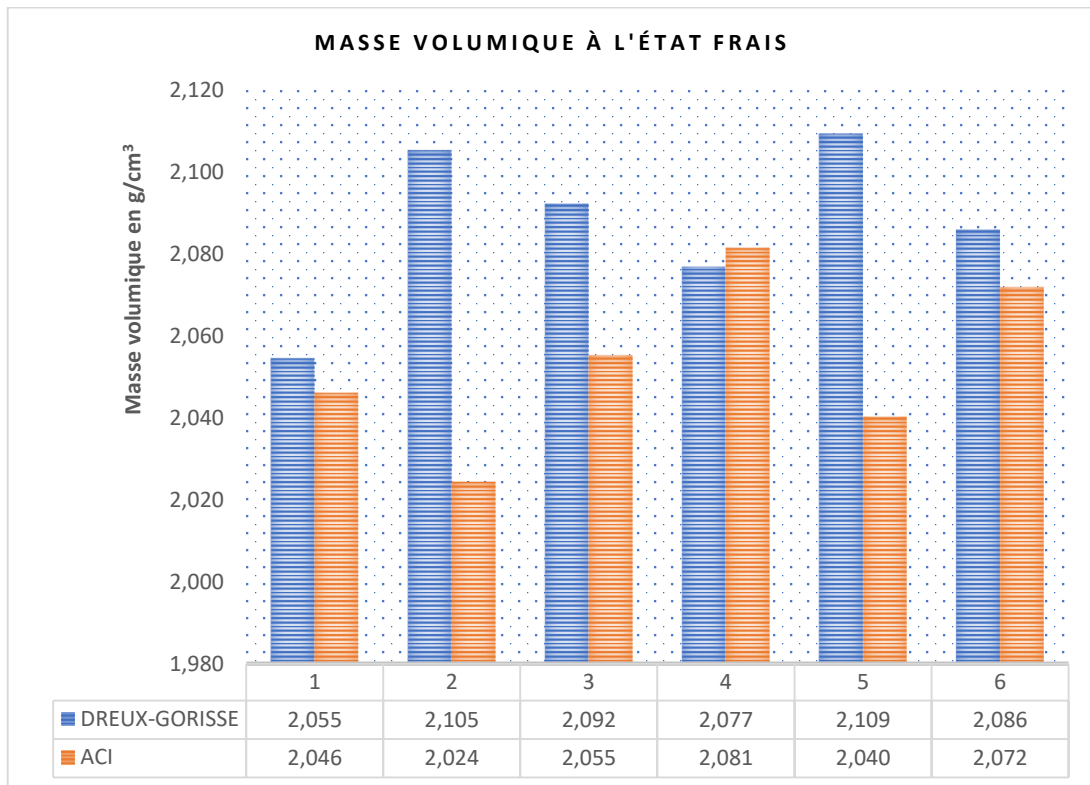
*Tableau III-10 Valeurs d'affaissement obtenues pour toutes les méthodes*

Méthodes	Affaissement (cm)	Utilisations
Dreux-Gorisse	7,3	Semelle coffrée, mur de soutènement, plancher, dallage, poutre, poteau, voile
ACI	7,4	

Il est important de souligner ici que ces valeurs d'affaissement ont été obtenues en ajoutant respectivement 37,5% de la quantité d'eau calculée pour la méthode de Dreux-Gorisse et 48,88% pour la méthode ACI.

#### III.5.1.2. Masse volumique du béton

L'histogramme de la figure III.4 présente les différentes masses volumiques de nos bétons à l'état frais.



*Figure III-4 Masse volumique des bétons à l'état frais*

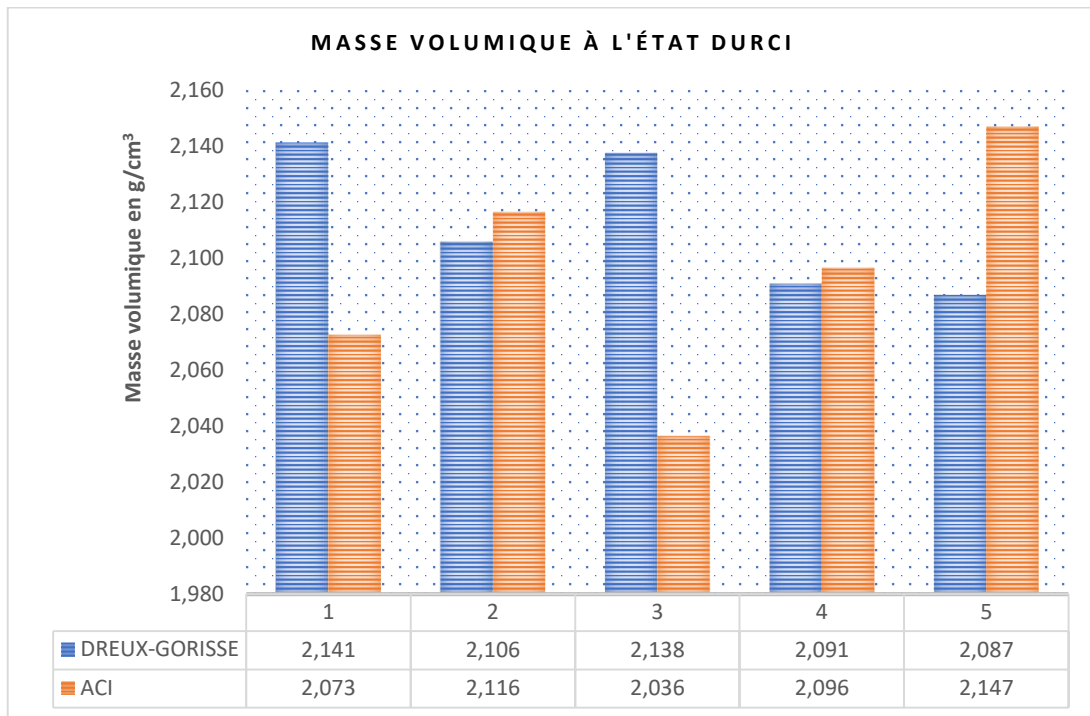
La figure III.4 renseigne que tous les bétons confectionnés ont une masse volumique comprise entre 1,8 et 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Tenant compte des valeurs obtenues, nous pouvons dire que nos bétons sont classés parmi les bétons lourds. Le diagramme présente des variations de masse volumique selon les différentes formulations. Ces différences s'expliquent par la composition des bétons, notamment par la quantité de gravier utilisée dans chaque méthode de formulation.

### III.5.2. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS A L'ETAT DURCI

Dans cette section, nous présentons les résultats sur l'essai de la détermination de la masse volumique du béton à l'état durci ainsi que les différentes résistances en compression obtenues sur les éprouvettes cylindriques 16\*32cm confectionnées dans cette étude par les deux méthodes, après 3,7,14 et 28 jours d'immersion dans l'eau.

#### III.5.2.1 Masse volumique du béton

L'histogramme de la figure III.5 présente les différentes masses volumiques de nos bétons à l'état durci.

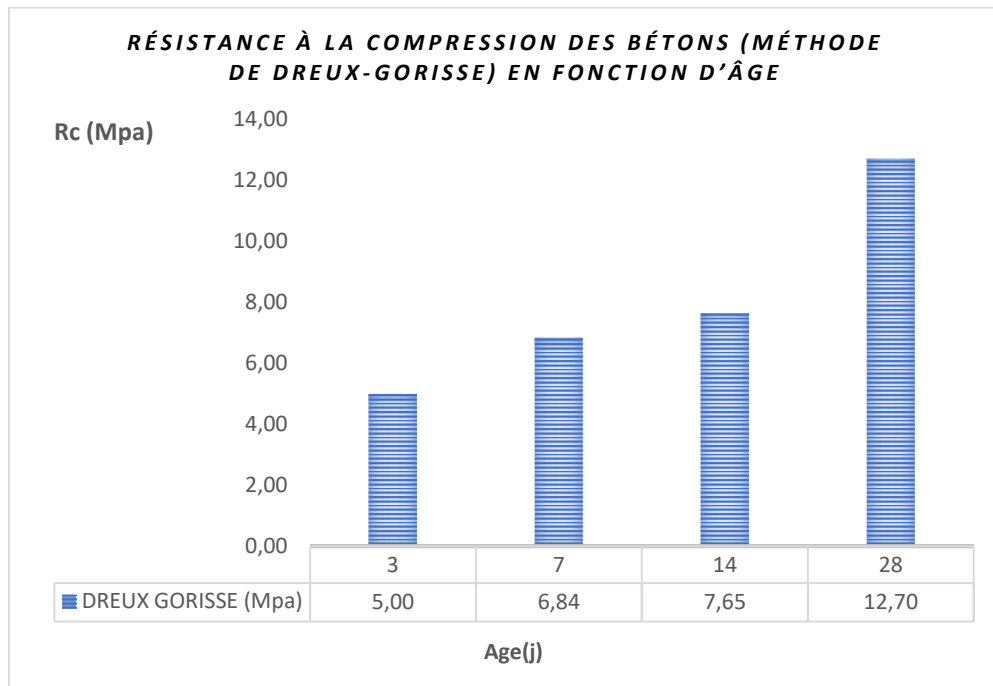


*Figure III-5 Masse volumique des bétons à l'état durci*

La figure III.5 renseigne que tous les bétons confectionnés ont une masse volumique comprise entre 1,8 et 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Tenant compte des valeurs obtenues, nous pouvons dire que nos bétons sont classés parmi les bétons lourds. Le diagramme présente des variations de masse volumique selon les différentes formulations. Ces différences s'expliquent par la composition des bétons, notamment par la quantité de gravier utilisée dans chaque méthode de formulation.

### III.5.2.2 Résistance à la compression du béton formulé par la méthode de Dreux-Gorisse

La figure III.6 présente les résultats de l'essai de la résistance à la compression du béton formulé à partir de la méthode de Dreux-Gorisse.

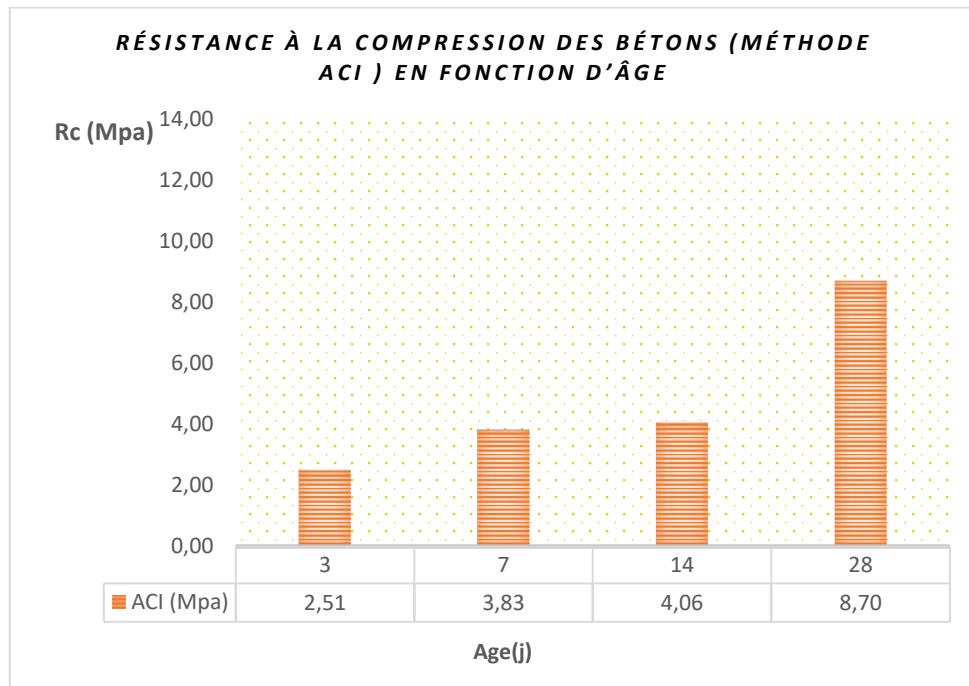


*Figure III-6 Résistance à la compression des bétons (méthode de Dreux-Gorisse) en fonction d'âge*

La figure III.6 montre que le béton formulé à partir de la méthode de Dreux-Gorisse a atteint une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 12,7 MPa, soit 63,5 % de la résistance escomptée qui était de 20 MPa. Cette faible résistance serait due au rapport E/C élevé, soit E/C égal à 0,81, ainsi qu'à la répartition granulométrique des granulats, qui pourrait ne pas être optimale pour assurer une meilleure cohésion du mélange.

### **III.5.2.3 Résistance à la compression du béton formulé par la méthode de Dreux-Gorisse**

La figure III.7 présente les résultats de l'essai de la résistance à la compression du béton formulé à partir de la méthode ACI.

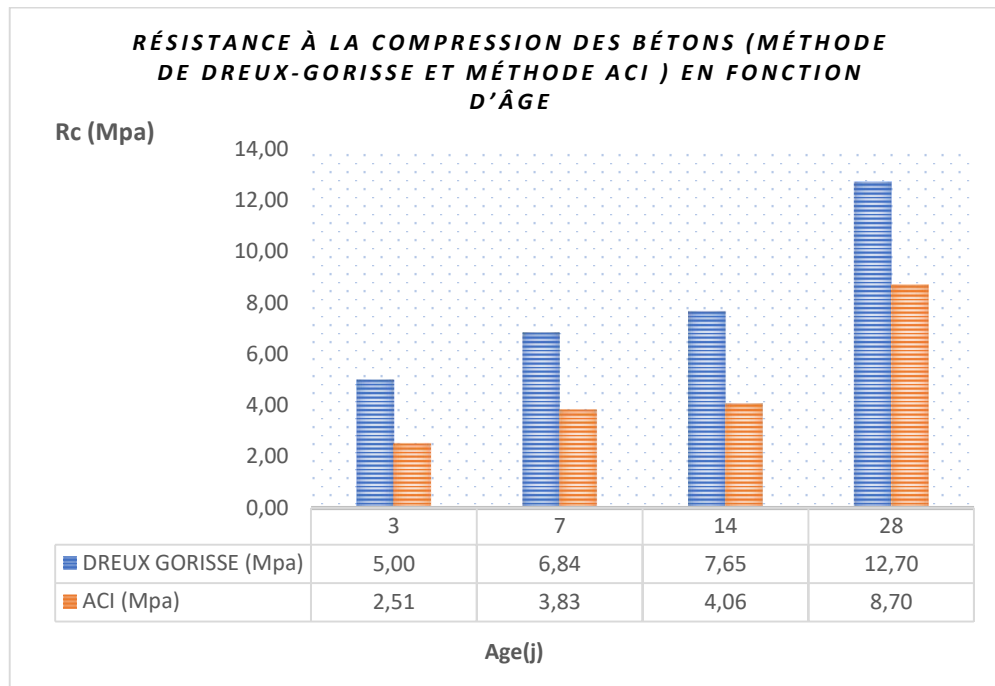


*Figure III-7 Résistance à la compression des bétons (méthode ACI) en fonction d'âge*

La figure III.7 montre que le béton formulé à partir de la méthode ACI a atteint une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 8,70 MPa, soit 43,5 % de la résistance escomptée qui était de 20 MPa. Cette faible résistance serait due au rapport E/C élevé, soit E/C égal à 0,98, ainsi qu'à la répartition granulométrique des granulats, qui pourrait ne pas être optimale pour assurer une meilleure cohésion du mélange.

#### **III.5.2.4 Résistance à la compression du béton formulé par la méthode de Dreux-Gorisse et par la méthode ACI**

La figure III.8 présente les résultats de l'essai de résistance à la compression du béton formulé selon la méthode de Dreux-Gorisse et la méthode ACI.



*Figure III-8 Résistance à la compression des bétons (méthode de Dreux-Gorisse et méthode ACI) en fonction d'âge*

La figure III.8 illustre l'évolution de la résistance à la compression du béton au fil du temps selon la méthode de formulation adoptée. À 3 jours, le béton atteint respectivement 5,00 MPa avec la méthode Dreux-Gorisse et 2,51 MPa avec la méthode ACI. À 7 jours, les valeurs enregistrées sont de 6,84 MPa pour Dreux-Gorisse et 3,83 MPa pour ACI. À 14 jours, on observe 7,65 MPa contre 4,06 MPa, et enfin, à 28 jours, 12,70 MPa contre 8,70 MPa.

Ces résultats mettent en évidence des écarts de résistance notables à chaque âge de mesure. Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, tels que le rapport eau/ciment, la granulométrie, ou encore la densité du squelette granulaire obtenu selon la méthode utilisée. Toutefois, aucune des formulations testées n'a atteint la résistance visée de 20 MPa, ce qui souligne l'importance de poursuivre l'optimisation des dosages et de mieux adapter les paramètres de formulation aux matériaux disponibles localement.

### III.6. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

Dans cette partie, nous évaluons les coûts de production pour chaque mètre cube de béton étudié. Cette évaluation prend en compte la composition volumétrique ou massique de chacun des constituants, en se basant sur les quantités obtenues lors de la formulation selon les deux méthodes. Le coût de transport des différents matériaux n'est pas pris en compte.

Le tableau III.11 illustre les différents prix.

*Tableau III-11 Les coûts de production de chaque béton étudié*

	Constituants	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total	Prix 1m <sup>3</sup>
<b>FORMULATION DREUX-GORISSE</b>	Ciment	350	kg	\$0,22	\$77,00	\$97,33
	Sable	0,266592	m <sup>3</sup>	\$25,00	\$6,66	
	Gravier	0,33929896	m <sup>3</sup>	\$35,00	\$11,88	
	Eau	207,1	litre	\$0,01	\$1,79	
<b>FORMULATION ACI</b>	Ciment	293,3	kg	\$0,22	\$64,53	\$86,57
	Sable	0,395	m <sup>3</sup>	\$25,00	\$9,88	
	Gravier	0,3	m <sup>3</sup>	\$35,00	\$10,50	
	Eau	193	litre	\$0,01	\$1,66	

Il ressort du tableau III.11 que les méthodes ACI et Dreux-Gorisse présentent un coût de production différent pour 1 m<sup>3</sup> de béton.

### III.7. CONCLUSION PARTIELLE

Dans le présent chapitre, les résultats de cette étude sont présentés et analysés. Il s'agit de décrire les caractéristiques des matériaux utilisés, les résultats des formulations et les propriétés des bétons confectionnés. Il a été observé que le béton formulé selon la méthode de Dreux-Gorisse présente une résistance à la compression de 12,70 MPa, une valeur faible et largement inférieure à la résistance minimale recommandée pour le béton à usage courant. Par ailleurs, le béton formulé selon la méthode ACI affiche une résistance à la compression à 28 jours de 8,7 MPa, également faible et nettement inférieure à la plage de résistance recommandée, comprise entre 20 et 40 MPa. Ces faibles résistances s'expliquent par un rapport E/C élevé, paramètre qui a permis d'atteindre l'affaissement souhaité, ainsi qu'à la répartition granulométrique des granulats, qui pourrait ne pas être optimale pour assurer une meilleure cohésion du mélange.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans une démarche visant à comparer les bétons ordinaires formulés selon la méthode de Dreux-Gorisse et la méthode ACI, afin de déterminer laquelle permet d'obtenir un béton à la fois bien ouvrable et plus résistant. Ce que nous avons désigné dans cette étude comme le « béton idéal ».

Pour y parvenir, nous avons suivi deux grandes étapes :

1. L'étude des matériaux constituant les bétons testés.
2. La formulation des bétons selon les deux méthodes étudiées.

Notre analyse a révélé que les caractéristiques du béton dépendent de plusieurs paramètres, notamment le diamètre maximal des grains  $D$  et le rapport  $C/E$ . La détermination de ces paramètres exige une connaissance approfondie des propriétés des matériaux, comme la classe vraie du ciment, la granulométrie, la finesse, ainsi que les masses volumiques apparentes et absolues des granulats. C'est pourquoi des essais de laboratoire sont indispensables. Toutefois, ces connaissances restent insuffisantes sans une méthode de formulation rigoureuse permettant d'établir la composition optimale du béton.

Dans notre étude, nous avons comparé les méthodes de Dreux-Gorisse et ACI. Leurs principes généraux n'étant pas identiques, nous avons constaté des différences notables, notamment dans la manière de doser les divers composants du béton.

Des éprouvettes cylindriques de  $16 \times 32$  cm ont été confectionnées et testées après 3, 7, 14 et 28 jours d'immersion dans l'eau. Les résultats obtenus montrent des résistances relativement faibles pour les deux méthodes :

- 12,7 MPa à 28 jours pour le béton formulé par la méthode de Dreux-Gorisse, avec une consistance de 7,3 cm.
- 8,7 MPa à 28 jours pour le béton formulé par la méthode ACI, avec une consistance de 7,4 cm.

La résistance relativement faible du béton formulé selon la méthode ACI pourrait être expliquée par le rapport  $E/C$  élevé, ainsi qu'à la répartition granulométrique des granulats,

qui pourrait ne pas être optimale pour assurer une meilleure cohésion du mélange. De même, la résistance obtenue avec la méthode de Dreux-Gorisse, bien que meilleure, reste inférieure aux attentes pour la même raison.

Les résultats obtenus confirment les hypothèses de départ :

1. Il existe bien des variations dans les quantités des constituants (ciment et granulats) selon la méthode utilisée.
2. Les bétons produits présentent des différences en termes d'ouvrabilité et de résistance.
3. Une différence de coût existe également entre les deux méthodes.

Ce travail s'est limité à une étude comparative des propriétés du béton formulé par la méthode ACI et la méthode de Dreux-Gorisse, avec une application au béton ordinaire à base de granulats concassés. Cette étude ouvre la voie à de futures recherches, notamment en comparant ces méthodes avec d'autres types de ciments, comme ceux de classe commerciale 42,5 MPa, et en analysant l'impact de différents types de graviers (tout-venant et concassé) afin de mieux comprendre les performances des bétons. L'objectif serait d'optimiser les conditions de fabrication pour obtenir de meilleurs résultats. Le respect strict du processus de fabrication reste essentiel pour garantir la fiabilité des performances.

## Bibliographie

- [1] G. A. Kader, M. H. Ali , B. M. Ali et N. Djacer, « ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTS METHODES DE FORMULATION DU BETON », Juin 2022.
- [2] A. ALINABIWE, « Support de cours de physique et technologie du béton,» 2021.
- [3] F. NGAPGUE, « Cours de physique et technologie du béton, Faculté de sciences et technologies appliquées, ULPGL,» 2018.
- [4] KAKASHI MUTOMBO Fallope, « Etude comparative des méthodes de formulation du béton : cas des méthodes de Dreux, de Scramtaiev et de Baron Olivier,» 2021-2022.
- [5] CIMBETON, Bétons et Ouvrages D'art Tome 1,chez Les ponts courants en béton.
- [6] A. C. AKEZA, «Etude de l'optimisation des propriétés des bétons issus des granulats,» 2020.
- [7] BAHATI JOEL Joe, «Étude mécanique et économique du béton aux graviers concassés et du béton aux graviers tout-venants confectionnés à Goma», 2022-2023.
- [8] F. Jean et D. Georges, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition éd.,EYROLLES, 1998.
- [9] Pierre-Claude Aïtcin, Frédéric Généreux ,Guy Jolicoeur ,Yolette Maurice, Technologie des granulats, 4ème édition,MODULO, 2018.
- [10] F. GHOMARI, «Cours de Matériaux de Construction,» Faculté de Technologie.
- [11] Kouao Abd Alhakim, « détermination de modèles prédictifs des caractéristiques essentielles de béton de la région de Msila », minoune magister publiquement 1 université« Mohamed Boudiaf » de M'sila le 24-10-21.

- [12] S-Laldji, cours Béton ETS, Hiver 2015.
- [13] A. BOUTIBA, «Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci,», Boumerdes, Algérie.
- [14] G. Ginger et I. ECLAIREE, «Classification des pathologies du béton,», 16 Novembre 2017.
- [15] Msc. MASIKA MUHIWA Grace, LABORATOIRE DES MATERIAUX, 2023.
- [16] H. Kabbab, « Les essais de laboratoire sur les matériaux de construction, » Laboratoire national de l'habitat et de la construction, Algérie.
- [17] ABDALA MBEKU Laurent, AHADI BIRIMWIRAGI Martha, AMISI MULENDE Shekinah, AMISI WANGAYA Gloire, Arsène FIKIRI MAYANGE, ASIFIWE BAJOJE Agnès, AWEZA MUVUNYI Moïse, BAHATI JOEL Joe, BAHATI KOKO Eddy, BANABOSE KABASHA Gaël, «Rapport laboratoire des matériaux,» Goma, 2022.
- [18] P. Badesire, «Cours de physique et technologie du béton,» Faculté des sciences appliquées, UCS, Goma, 2021-2022.
- [19] Dreux, G. et Festa, J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, Paris, France. ISBN-13 : 978-2212102314. 1, 3, 4, 6, 7..
- [20] Hélène HORSIN MOLINARO - Xavier JOURDAIN, «Formulation d'un béton ordinaire,» 15/10/2018.
- [21] Aci method pdf- Béton.
- [22] Dr Ir HATUNGIMANA Daniel, Syllabus du cours de technologie du béton, 2023-2024.
- [23] Design and Control of Concretes Mixtures (PCA,2003).

[24] N. P18-451, « Béton - Détermination de l'ouvrabilité - Essai au cône d'Abrams », AFNOR, France, 1995.

[25] NF EN12390-7, «Essais de compression des éprouvettes en béton durci -partie 7: Essai à la compression axiale des éprouvettes cylindriques,», AFNOR, France, 2019.

# ANNEXES

## ANNEXE A : ESSAIS SUR LES GRANULATS

### A.1 COMPOSITIONS GRANULOMÉTRIQUE

A.1.1 Sable 0/5							
Prise d'essai = 2500 g							
N° TAMIS		OUVERTURE (mm)		Refus	Refus cum		Tamisât
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	(g)	%	%
1/4"	39	6.35	6.3	0	0	0,00	100,00
3/16"	38	4.76	5	33	33	1,32	98,68
5	37	4	4	41	74	2,96	97,04
6	36	3.36	3.15	42	116	4,64	95,36
8	35	2.38	2.5	67	183	7,32	92,68
10	34	2	2	81	264	10,56	89,44
12	33	1.68	1.6	121	385	15,40	84,60
16	32	1.19	1.25	143	528	21,12	78,88
18	31	1	1	166	694	27,76	72,24
20	30	0.84	0.8	150	844	33,76	66,24
30	29	0.59	0.63	198	1042	41,68	58,32
35	28	0.5	0.5	314	1356	54,24	45,76
40	27	0.4	0.4	158	1514	60,56	39,44
50	26	0.315	0.315	146	1660	66,40	33,60
60	25	0.25	0.25	217	1877	75,08	24,92
70	24	0.2	0.2	257	2134	85,36	14,64
100	23	0.16	0.16	125	2259	90,36	9,64
120	22	0.125	0.125	141	2400	96,00	4,00
140	21	0.1	0.1	85	2485	99,40	0,60
200	21	0.08	0.08	13	2498	99,92	0,08
<b>MF=(1/100)*SOMME Refus cum % au tamis de (4-2-1-0,5-0,25-0,125)</b>							
<b>Module de finesse</b>				2,67			
A.1.2 Gravier Concassés 8/25							
Prise d'essai = 5000 g							
N° TAMIS		OUVERTURE (mm)		Refus	Refus cum		Tamisât
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	(g)	%	%
3"	50	76.2	80				
12/2"	49	63.5	63				
2"	48	50.8	50				
11/2"	47	38.1	40				
11/4"	46	31.7	31.5				
1"	45	25.4	25	605	605	12,10	87,90
3/4"	44	19.1	20	1923	2528	50,56	49,44
2/3"	43	16.9	16	2080	4608	92,16	7,84
1/2"	42	12.7	12.5	349	4957	99,14	0,86
3/8"	41	9.52	10	10	4967	99,34	0,66

## A.2 MASSES VOLUMIQUES

### A.2.1 Masses volumiques absolues

A.2.1.1. Sable roulé 0/5		
ESSAI 1	Masse sèche(g)	300
	V1(ml)	350
	V2(ml)	470
ESSAI 2	Masse sèche(g)	300
	V1(ml)	200
	V2(ml)	315
ESSAI 3	Masse sèche(g)	300
	V1(ml)	240
	V2(ml)	360
<b>Masse Volumique absolue en g/cm<sup>3</sup></b>		2,536
A.2.1.2. Grapiers Concassés 8/25		
ESSAI 1	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	600
	V2(ml)	820
ESSAI 2	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	500
	V2(ml)	720
ESSAI 3	Masse sèche(g)	500
	V1(ml)	450
	V2(ml)	670
<b>Masse Volumique absolue en g/cm<sup>3</sup></b>		2,273

### A.2.2 Masses volumiques apparentes

A.2.2.1 Sable roulé 0/5		
RECIPIENT 1	Masse du récipient (g)	4325
	Masse (g)	5751
	Volume (cm <sup>3</sup> )	955,55538
RECIPIENT 2	Masse du récipient (g)	4325
	Masse (g)	5703
	Volume (cm <sup>3</sup> )	955,55538
RECIPIENT 3	Masse du récipient (g)	4325
	Masse (g)	5674
	Volume (cm <sup>3</sup> )	955,55538
<b>Masse Volumique apparente en g/cm<sup>3</sup></b>		1,45

<b>A.2.1.2 Grapiers Concassés 8/25</b>		
RECIPIENT 1	Masse du récipient (g)	4325
	Masse (g)	5321
	Volume (cm <sup>3</sup> )	955,55538
RECIPIENT 2	Masse du récipient (g)	4325
	Masse (g)	5287
	Volume (cm <sup>3</sup> )	955,55538
RECIPIENT 3	Masse du récipient (g)	4325
	Masse (g)	5240
	Volume (cm <sup>3</sup> )	955,55538
<b>Masse Volumique apparente en g/cm<sup>3</sup></b>		<b>1</b>

### A.3 ÉQUIVALENT DE SABLE

<b>Prise d'essai = 120 g</b>				
<b>Désignation</b>		<b>Eprouvette 1</b>	<b>Eprouvette 2</b>	<b>Moyenne</b>
Lecture visuelle	H <sub>1</sub> (cm)	9,2	9,9	
	H <sub>2</sub> (cm)	11,1	11,7	
Lecture à piston	H <sub>1</sub> ' (cm)	8,65	9,5	
<b>ESV (%)</b>		82,883	84,615	83,749
<b>ESP (%)</b>		77,928	81,197	79,562

### A.4 COEFFICIENT D'UNIFORMITE ET DE COURBURE

#### A.4.1 COEFFICIENT D'UNIFORMITE

<b>A.4.1.1 Sable roulé 0/5</b>		
D60	0,664	
D10	0,16	
<b>CU</b>		4,15
<b>A.4.1.2 Grapiers Concassés 8/25</b>		
D60	22	
D10	16	
<b>CU</b>		1,375

## A.4.2 COEFFICIENT DE COURBURE

A.4.2.1 Sable roulé 0/5		
D60	0,664	
D30	0,28575	
D10	0,16	
<b>CZ</b>		0,769
A.4.2.2 Gravier Concassés 8/25		
D60	22	
D30	18,2	
D10	16	
<b>CZ</b>		0,941

## A.5 LOS ANGELES

A.5.1 Gravier Concassés 10/25	
Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	12
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	1408
<b>Coefficient LA trouvé</b>	28,16

## ANNEXE B : ESSAI SUR LE CIMENT

### B.1 LA MASSE VOLUMIQUE DU CIMENT

Masse volumique du Ciment	
Masse pycnomètre sans échantillon de ciment (en g) $M_1$	168,8
Volume initiale du pétrole $V_1$ (en ml)	0
Masse pycnomètre avec échantillon de ciment (en g) $M_2$	217
Volume final du pétrole $V_2$ (en ml)	16
<b>Masse volumique du ciment (en g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>3,01</b>

## Annexe C : ESSAIS SUR LES BÉTONS

### C.1 ESSAIS SUR LES BÉTONS FRAIS

#### C.1.1 DENSITE

Désignation	Masse (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	Densité	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
DRE1	13,212	0,00643072	1000	2,0545	2054,513
DRE2	13,539	0,00643072	1000	2,1054	2105,363
DRE3	13,455	0,00643072	1000	2,0923	2092,301
DRE4	13,356	0,00643072	1000	2,0769	2076,906
DRE5	13,565	0,00643072	1000	2,1094	2109,406
DRE6	13,414	0,00643072	1000	2,0859	2085,925
ACI 1	13,158	0,00643072	1000	2,0461	2046,116
ACI 2	13,018	0,00643072	1000	2,0243	2024,346
ACI 3	13,216	0,00643072	1000	2,0551	2055,135
ACI 4	13,385	0,00643072	1000	2,0814	2081,415
ACI 5	13,12	0,00643072	1000	2,0402	2040,207
ACI 6	13,323	0,00643072	1000	2,0718	2071,774

### C.2 ESSAIS SUR LES BÉTONS DURCI

#### C.2.1 DENSITE

Désignation	Masse (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	Densité	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
DRE1	13,77	0,00643072	1000	2,1413	2141,284
DRE2	13,542	0,00643072	1000	2,1058	2105,830
DRE3	13,746	0,00643072	1000	2,1376	2137,552
DRE4	13,446	0,00643072	1000	2,0909	2090,901
DRE5	13,61	0,00643072	1000	2,1164	2116,404
DRE6	13,42	0,00643072	1000	2,0869	2086,858
ACI 1	13,328	0,00643072	1000	2,0726	2072,552
ACI 2	13,61	0,00643072	1000	2,1164	2116,404
ACI 3	13,096	0,00643072	1000	2,0365	2036,475
ACI 4	13,482	0,00643072	1000	2,0965	2096,499
ACI 5	13,498	0,00643072	1000	2,0990	2098,987
ACI 6	13,806	0,00643072	1000	2,1469	2146,882

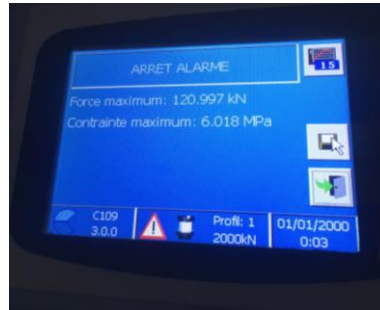
## C.2.2 RÉSISTANCE EN COMPRESSION

Age(j)	Bétons	Désignations	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
3 Jours	DRE 3	Force (kN)	78,523	120,997	101,918	100,48
		Rc (Mpa)	3,905	6,018	5,069	5,00
	ACI 3	Force (kN)	48,226	41,898	61,553	50,56
		Rc (Mpa)	2,399	2,084	3,061	2,51
7 Jours	DRE 7	Force (kN)	130,777	147,172	134,372	137,44
		Rc (Mpa)	6,504	7,32	6,683	6,84
	ACI 7	Force (kN)	79,886	79,818	61,553	73,75
		Rc (Mpa)	3,972	3,97	3,548	3,83
14 Jours	DRE 14	Force (kN)	133,461	149,569	178,14	153,72
		Rc (Mpa)	6,638	7,439	8,86	7,65
	ACI 14	Force (kN)	81,4	80,441	83,317	81,72
		Rc (Mpa)	4,048	4,001	4,144	4,06
28 Jours	DRE 28	Force (kN)	236,325	250,453	278,998	255,26
		Rc (Mpa)	11,754	12,457	13,876	12,70
	ACI 28	Force (kN)	157,574	175,935	191,275	174,93
		Rc (Mpa)	7,837	8,75	9,513	8,70

## ANNEXE D : PHOTOS DES RESISTANCES MECANIQUES OBTENUES POUR CHAQUE METHODE

### D.1 Méthode de Dreux-Gorisse

- 3 jours



- 7 jours



- 14 jours

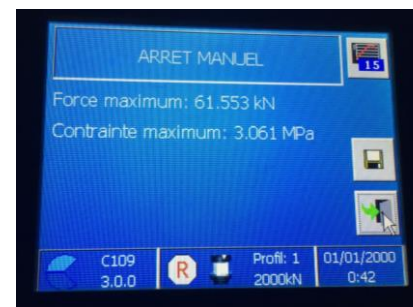


- 28 jours



## D.2 Méthode ACI

- 3 jours



- 7 jours



- 14 jours



- 28 jours

