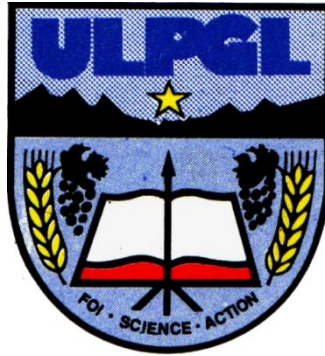


**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**  
**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



BP. 368 GOMA

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

**ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES DE FORMULATION DU  
BÉTON : Approches de Faury, ACI et DOE face aux enjeux de résistance  
mécanique et d'efficacité économique**

Par **LUKESHI KYALONDAWA Philippe**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de  
bachelor en sciences de l'ingénieur

**Option : Génie civil**

**Directeur : CT MUHIWA Grace MASIKA**

**Encadreur : Ir. KOKO pascal KATUMBI**

**Année académique : 2024-2025**

## Epigraphe

*« Le béton ne ment pas ; il révèle la précision de celui qui le formule »*

**Auteur inconnu**

## Dédicace

À mes très chers parents, John KIZILA et Ghislaine NZIGIRE ;

À mes frères et sœurs, pour leur amour et leur soutien.

**LUKESHI KYALONDAWA Philippe**

## Remerciements

Nous exprimons tout d'abord notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour la grâce, la force et la persévérance qu'Il nous a accordées tout au long de notre parcours académique.

Nous adressons ensuite notre sincère reconnaissance à notre directrice de travail, la Cheffe des Travaux MUHIWA GRACE MASIKA, pour la qualité de son encadrement, ses orientations pertinentes, sa disponibilité ainsi que son sens élevé du devoir scientifique.

Nos remerciements vont également à notre encadreur, l'Ingénieur KOKO Pascal, pour son accompagnement constant, sa patience, ses conseils avisés et ses encouragements, qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous exprimons aussi notre gratitude au Décanat de la Faculté, en particulier à Monsieur le Doyen, à Monsieur le Vice-Doyen chargé de la recherche, ainsi qu'à tous les autres membres du décanat, pour leur encadrement institutionnel, leur disponibilité et les efforts consentis en faveur de notre formation.

Nous remercions également l'ensemble de nos collègues et camarades de promotion, avec qui nous avons partagé les exigences, les défis et l'ambiance académique durant ces années d'études. Une pensée particulière va à tous ceux que nous avons eu l'honneur de représenter en tant que CP, pour leur confiance, leur collaboration et leur esprit de solidarité.

Nos pensées reconnaissantes vont aussi à nos camarades, notamment Naomi, Juliette, Elie, Yvon, Anselme, Vital, Noah, Patrick, Kethia, Chloé, ainsi qu'à tant d'autres dont les noms ne sont pas repris ici, mais qui ont contribué, de près ou de loin, à rendre ce parcours plus enrichissant.

Nous adressons enfin nos sincères remerciements à nos parents, à notre famille, à nos proches, ainsi qu'à notre binôme Ruth M., pour leur soutien moral, affectif, matériel et logistique indéfectible, ainsi que pour la confiance qu'ils ont placée en nous, parfois même plus que nous-mêmes.

À tous, nous disons merci.

**LUKESHI KYALONDAWA Philippe**

## Résumé

Ce travail porte sur une étude comparative des méthodes de formulation du béton, notamment les approches de Faury, de l'ACI et de la méthode britannique DOE, dans le but d'évaluer leur performance face aux exigences de résistance mécanique et d'efficacité économique dans le contexte local de Goma. L'objectif principal était d'identifier la méthode de formulation la plus appropriée pour produire un béton plastique, présentant un affaissement de  $7 \pm 2$  cm au cône d'Abrams et une résistance à la compression visée de 20 MPa à 28 jours, à partir de matériaux couramment disponibles dans la région.

Pour atteindre cet objectif, les formulations ont été réalisées à l'aide de sable du Rwanda, de gravier concassé, de ciment CIMERWA 42,5 N et d'eau de la REGIDESO. Des éprouvettes cylindriques de  $16 \times 32$  cm ont été confectionnées pour chacune des trois méthodes, puis soumises à des essais de compression après cure. L'étude a également pris en compte l'aspect économique des formulations, en comparant leur coût de production.

Les résultats obtenus ont montré que la méthode DOE a présenté les meilleures performances mécaniques, avec une résistance moyenne à la compression de 23,51 MPa à 28 jours, dépassant ainsi la résistance escomptée. La méthode Faury a donné une résistance moyenne de 16,27 MPa, tandis que la méthode ACI a enregistré la plus faible performance avec 14,0 MPa. Sur le plan économique, la méthode DOE s'est révélée présenter un coût intermédiaire, offrant ainsi un compromis satisfaisant entre performance mécanique et rentabilité.

Au regard de ces résultats, il ressort que la méthode DOE constitue l'approche la plus adaptée pour la formulation d'un béton performant avec les matériaux utilisés dans le contexte local de Goma. Elle se distingue non seulement par sa capacité à atteindre et dépasser la résistance visée, mais également par son équilibre entre qualité technique et efficacité économique.

**Mots-clés :** Béton, formulation, Faury, ACI, DOE, résistance à la compression, coût.

## Abstract

This study focuses on a comparative analysis of concrete mix design methods, particularly the Faury, ACI, and British Standard DOE approaches, with the aim of evaluating their performance in terms of mechanical strength and economic efficiency within the local context of Goma. The main objective was to identify the most appropriate mix design method for producing a plastic concrete, with a slump of  $7 \pm 2$  cm according to the Abrams cone test and a target compressive strength of 20 MPa at 28 days, using materials commonly available in the region.

To achieve this objective, the concrete mixes were prepared using Rwandan sand, crushed gravel, CIMERWA 42.5 N cement, and REGIDESO tap water. Cylindrical concrete specimens measuring  $16 \times 32$  cm were cast for each of the three methods and then subjected to compressive strength tests after curing. The study also considered the economic aspect of the formulations by comparing their production costs.

The results showed that the DOE method achieved the best mechanical performance, with an average compressive strength of 23,51 MPa at 28 days, thus exceeding the expected target strength. The Faury method yielded an average compressive strength of 16,27 MPa, while the ACI method recorded the lowest performance with 14.0 MPa. From an economic perspective, the DOE method was found to have an intermediate cost, thereby offering a satisfactory compromise between mechanical performance and cost-effectiveness.

In light of these findings, it can be concluded that the DOE method is the most suitable approach for designing a high-performance concrete using the materials available in the local context of Goma. It stands out not only for its ability to achieve and exceed the target strength, but also for its balance between technical quality and economic efficiency.

**Keywords:** Concrete, mix design, Faury, ACI, DOE, compressive strength, cost.

## Table des matières

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| Epigraphe.....                                                 | i   |
| Dédicace .....                                                 | ii  |
| Remerciements .....                                            | iii |
| Résumé .....                                                   | iv  |
| Table des matières .....                                       | vi  |
| Liste des abréviations.....                                    | ix  |
| Liste des tableaux .....                                       | x   |
| Liste des figures.....                                         | xi  |
| INTRODUCTION GENERALE.....                                     | 1   |
| CHAPITRE I: GENERALITES.....                                   | 4   |
| I.1 INTRODUCTION .....                                         | 4   |
| I.2 CLASSIFICATION DES BETONS .....                            | 4   |
| I.2.1. Classification des bétons selon la masse volumique..... | 4   |
| I.2.2. Classification des bétons selon leur résistance .....   | 5   |
| I.2.3. Classification des bétons selon la destination .....    | 5   |
| I.2.4. Classification des bétons selon le liant utilisé.....   | 5   |
| I.3 CONSTITUANTS DU BETON .....                                | 5   |
| I.3.1. Liant.....                                              | 6   |
| I.3.2. Granulats .....                                         | 8   |
| I.3.3. Eau de gâchage .....                                    | 10  |
| I.3.4. Adjuvants .....                                         | 10  |
| I.4 PROPRIETES DU BETON .....                                  | 10  |
| I.4.1. L'ouvrabilité .....                                     | 11  |

|                                 |                                                                   |    |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| I.4.2.                          | Résistance mécanique .....                                        | 12 |
| I.4.3.                          | Durabilité .....                                                  | 12 |
| I.5                             | METHODES DE FORMULATION DU BETON .....                            | 12 |
| I.5.1.                          | Méthode américaine (ACI) .....                                    | 13 |
| I.5.2.                          | Méthode d'Abrams .....                                            | 13 |
| I.5.3.                          | Méthode de BOLOMEY .....                                          | 13 |
| I.5.4.                          | Méthode de Faury .....                                            | 13 |
| I.5.5.                          | Méthode des abaques de Dreux .....                                | 14 |
| I.5.6.                          | Méthode britannique standard de conception de mélange (DOE) ..... | 14 |
| I.6                             | CONCLUSION PARTIELLE .....                                        | 14 |
| CHAPITRE II: METHODOLOGIE ..... |                                                                   | 15 |
| II.1                            | . INTRODUCTION PARTIELLE .....                                    | 15 |
| II.2                            | . NATURE ET ORIGINE DES MATERIAUX .....                           | 15 |
| II.2.1.                         | Ciment.....                                                       | 15 |
| II.2.2.                         | Granulats .....                                                   | 15 |
| II.2.3.                         | Eau de gâchage .....                                              | 15 |
| II.3                            | . CARACTERISATION DES MATERIAUX.....                              | 16 |
| II.3.1.                         | Echantillonnage.....                                              | 16 |
| II.3.2.                         | Le ciment .....                                                   | 16 |
| II.3.3.                         | Essais sur les granulats.....                                     | 17 |
| II.3.4.                         | Essais sur le béton frais.....                                    | 21 |
| II.3.5.                         | Essais sur le béton durci.....                                    | 21 |
| II.4                            | . FORMULATION DU BETON .....                                      | 22 |
| II.4.1.                         | Méthode de Faury .....                                            | 22 |
| II.4.2.                         | Méthode ACI .....                                                 | 28 |
| II.4.3.                         | Méthode DOE .....                                                 | 35 |
| II.5                            | . PROGRAMME EXPERIMENTAL .....                                    | 42 |
| II.6                            | . LE COUT DU BETON.....                                           | 43 |
| II.7                            | . CONCLUSION PARTIELLE .....                                      | 44 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| CHAPITRE III: PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ..... | 45 |
| III.1 INTRODUCTION PARTIELLE .....                               | 45 |
| III.2 PRESENTATION DES CONSTITUANTS DU BETON .....               | 45 |
| III.2.1. Ciment.....                                             | 45 |
| III.2.2. Eau de gâchage .....                                    | 46 |
| III.2.3. Granulats .....                                         | 46 |
| III.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX.....                         | 46 |
| III.3.1. Composition granulométrique .....                       | 47 |
| III.3.2. Masses volumiques .....                                 | 48 |
| III.3.3. Equivalent sable .....                                  | 48 |
| III.4 FORMULATION DES BETONS .....                               | 49 |
| III.4.1. Dosage en divers constituants.....                      | 49 |
| III.4.2. Ouvrabilité du béton .....                              | 52 |
| III.4.3. Masse volumique du béton .....                          | 53 |
| III.4.4. Resistance à la compression.....                        | 55 |
| III.4.5. Analyse du cout.....                                    | 56 |
| III.5 CONCLUSION PARTIELLE .....                                 | 57 |
| CONCLUSION GENERALE .....                                        | 58 |
| BIBLIOGRAPHIE.....                                               | 60 |
| ANNEXES .....                                                    | 62 |

## Liste des abréviations

%: Pourcentage  
ACI: American Concrete Institute  
DOE: Department of Environment  
AFNOR: Association Française de Normalisation  
ASTM: American Society for Testing and Materials  
C : Dosage en ciment  
C/E : Rapport ciment sur eau  
Cm : Centimètre  
CPA : Ciment Portland Artificiel  
Cu : Coefficient d'uniformité  
Dmax : Diamètre du plus gros granulat  
E : Dosage en eau  
G : Dosage des graviers  
Kg : Kilogramme  
MF : Module de finesse  
mm : Millimètre  
Mpa : Méga pascal  
NF : Norme Française  
S : Dosage en sable  
Fc 28 : résistance caractéristique du béton à 28 jours  
kN : kilo newton  
pvabs : Masse volumique absolue  
t /m3 : tonne par mètre cube

## Liste des tableaux

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tableau I-1 : Classification du béton suivant la masse volumique [1]</i> .....                                   | 4  |
| <i>Tableau I-2 : Classification des bétons selon leur résistance [1]</i> .....                                      | 5  |
| <i>Tableau I-3 : Différents types de ciments courants normalisés [1]</i> .....                                      | 7  |
| <i>Tableau I-4 : Caractéristiques mécaniques des ciments courants [3]</i> .....                                     | 8  |
| <i>Tableau I-5 : Valeurs des résistances garanties des ciments courants [1]</i> .....                               | 8  |
| <i>Tableau I-6 : Classification suivant la grosseur des granulats [1]</i> .....                                     | 9  |
| <i>Tableau I-7 : Classification des granulats suivant les masses volumiques (Dreux, 1981) [1]</i> .....             | 10 |
| <i>Tableau I-8 : Classe de consistance des bétons [1]</i> .....                                                     | 11 |
| <i>Tableau II-1 : Appréciation des granulats compte tenu de la valeur ES [8]</i> .....                              | 21 |
| <i>Tableau II-2 : Valeur de A</i> .....                                                                             | 24 |
| <i>Tableau II-3 : Valeurs du coefficient K</i> .....                                                                | 27 |
| <i>Tableau II-4 : Affaissement recommandé pour différents types de construction [18]</i> .....                      | 29 |
| <i>Tableau II-5 : résistance moyenne à la compression visée à 28 jours</i> .....                                    | 30 |
| <i>Tableau II-6 : Exigences en eau de gâchage approximative et teneur en air pour différents</i> .....              | 31 |
| <i>Tableau II-7 : Relation entre le rapport Eau/ciment et la résistance du béton</i> .....                          | 32 |
| <i>Tableau II-8 : Rapport E/C maximal pour les bétons exposés aux conditions sévères</i> .....                      | 33 |
| <i>Tableau II-9 : Volume du gros granulats compacté à l'état sec par unité de volume du béton</i> .....             | 34 |
| <i>Tableau II-10 : Valeur de k DOE [21]</i> .....                                                                   | 36 |
| <i>Tableau II-11 : Approximation de la résistance caractéristique moyenne en fonction du rapport E/C [21]</i> ..... | 37 |
| <i>Tableau II-12 : Valeurs liées condition de durabilité [7]</i> .....                                              | 38 |
| <i>Tableau II-13 : Détermination de la quantité d'eau libre en litre</i> .....                                      | 39 |
| <i>Tableau II-14 : Combinaison des % des granulats des dimensions variés [7]</i> .....                              | 42 |
| <i>Tableau III-1 : Coefficient d'uniformité et module de finesse</i> .....                                          | 47 |
| <i>Tableau III-2 : masses volumiques absolues et apparentes du ciment, sable et graviers</i> .....                  | 48 |

## Liste des figures

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure II-1: Courbe optimale de Faury</i> .....                                                                    | 23 |
| <i>Figure II-2 : Détermination du pourcentage des granulats cas 1 [13]</i> .....                                      | 25 |
| <i>Figure II-3 : Détermination du pourcentage des granulats cas 2 [13]</i> .....                                      | 26 |
| <i>Figure II-4 : Détermination du pourcentage des granulats cas 3</i> .....                                           | 26 |
| <i>Figure II-5 : Valeurs de s</i> .....                                                                               | 36 |
| <i>Figure II-6 : Détermination du rapport E/C en fonction de la résistance moyenne</i> .....                          | 38 |
| <i>Figure II-7 : Détermination de la densité théorique du béton compacte</i> .....                                    | 40 |
| <i>Figure II-8 : Détermination de % sable pour dimension max de 10mm</i> .....                                        | 41 |
| <i>Figure II-9 : Détermination de % sable pour dimension max de 20mm</i> .....                                        | 41 |
| <i>Figure II-10 : Détermination de % sable pour dimension max de 40mm [21]</i> .....                                  | 42 |
| <i>Figure III-1 : Ciment CIMERWA 42,5 N</i> .....                                                                     | 45 |
| <i>Figure III-2 : sable roulé et graviers concassés</i> .....                                                         | 46 |
| <i>Figure III-3 : les courbes granulométriques du sable roulé et des graviers concassés</i> .....                     | 47 |
| <i>Figure III-6 : Dosage théorique en eau des différentes méthodes de formulation du béton</i> .....                  | 49 |
| <i>Figure III-7 : Dosage expérimental en eau des différentes méthodes de formulation du béton</i> .....               | 50 |
| <i>Figure III-8 : Dosage des graviers 8/15 en kg/m<sup>3</sup> pour chaque méthode de formulation du béton</i> .....  | 50 |
| <i>Figure III-9 : Dosage des graviers 15/25 en kg/m<sup>3</sup> pour chaque méthode de formulation du béton</i> ..... | 51 |
| <i>Figure III-10 : Dosage en ciment pour chaque méthode de formulation du béton</i> .....                             | 51 |
| <i>Figure III-11 : Dosage en ciment pour chaque méthode de formulation du béton</i> .....                             | 52 |
| <i>Figure III-12 : Affaissement au cône d'Abrams</i> .....                                                            | 52 |
| <i>Figure III-13 : Masse volumique théorique du béton frais</i> .....                                                 | 53 |
| <i>Figure III-14 : Masse volumique expérimentale du béton humide (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....                         | 54 |
| <i>Figure III-15 : Masse volumique du béton durci (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....                                        | 54 |
| <i>Figure III-16: Moyenne de la Résistance a la compression à 7 jours</i> .....                                       | 55 |
| <i>Figure III-17 : Moyenne de la Résistance à la compression à 14 jours</i> .....                                     | 55 |
| <i>Figure III-18 : Moyenne de la Résistance a la compression à 28 jours</i> .....                                     | 56 |
| <i>Figure III-19 : cout théorique d'un mètre cube de béton</i> .....                                                  | 56 |
| <i>Figure III-20 : cout expérimental d'un mètre cube de béton</i> .....                                               | 57 |
| <i>Figure III-21 : Détermination de % sable pour dimension max de 40mm [21]</i> .....                                 | 75 |

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, avec une consommation planétaire annuelle estimée à environ un mètre cube par personne. Son omniprésence dans le domaine du génie civil, notamment pour les bâtiments, les routes, les ponts ou les barrages, s'explique par ses qualités essentielles : faible coût de production, disponibilité des constituants, facilité de mise en œuvre, ainsi que performances mécaniques et durabilité remarquables. En tant que matériau composite, il est obtenu par le mélange homogène de plusieurs constituants, à savoir les granulats, le ciment, l'eau et, dans certains cas, des adjuvants ou des ajouts destinés à améliorer certaines propriétés spécifiques.

Les granulats (sable et graviers) constituent le squelette du béton et représentent environ 80 % de son poids, jouant ainsi un rôle important dans sa résistance. Le ciment, liant hydraulique, forme avec l'eau une pâte qui durcit par hydratation et assure la cohésion entre les granulats. L'eau de gâchage est indispensable au durcissement ainsi qu'à la maniabilité du mélange à l'état frais. Par ailleurs, des adjuvants ou ajouts peuvent être incorporés afin de modifier certaines caractéristiques du béton, telles que la fluidité, le temps de prise, la compacité, la résistance aux agressions chimiques ou encore la durabilité.

La formulation du béton consiste à déterminer les proportions optimales de ses différents constituants afin d'atteindre des qualités prédéfinies, notamment l'ouvrabilité à l'état frais, la résistance mécanique et la durabilité à long terme. À cet effet, plusieurs méthodes ont été développées, parmi lesquelles celles de Faury, de l'ACI (American Concrete Institute) et du DOE (Department of Environment britannique), qui font l'objet de la présente étude. La comparaison de ces méthodes s'avère particulièrement importante dans le contexte de la République Démocratique du Congo, et plus spécifiquement dans la province du Nord-Kivu, où l'activité de construction est intense et les matériaux de construction disponibles sont diversifiés.

Malgré son importance, le béton reste un matériau dont la qualité dépend fortement de sa composition et de sa méthode de formulation. Dans de nombreux contextes, notamment en milieu local, les méthodes de dosage ne sont pas toujours adaptées, ce qui peut entraîner des

écarts entre les résistances attendues et celles réellement obtenues. De plus, le coût des matériaux de construction varie et influence le choix des méthodes employées. Face à ces réalités, il devient nécessaire d'étudier de manière comparative plusieurs méthodes de formulation afin d'identifier celles qui assurent à la fois de bonnes performances techniques et une utilisation économique des ressources disponibles.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, qui cherche à répondre à la question principale suivante : quelle méthode de formulation du béton, parmi celles de Faury, de l'ACI et du DOE, serait la plus appropriée pour produire un béton à la fois performant sur le plan technique et avantageux sur le plan économique dans le contexte local ? De cette question principale découlent deux questions spécifiques, à savoir : dans quelle mesure les méthodes de Faury, de l'ACI et du DOE influenceraient-elles les propriétés physiques et mécaniques du béton, notamment la maniabilité, la compacité et la résistance à la compression ? Et parmi ces trois méthodes, laquelle permettrait d'obtenir le meilleur compromis entre performance technique et coût de production, compte tenu des matériaux disponibles localement ?

En réponse à ces préoccupations, il est formulé comme hypothèses que les méthodes de formulation de Faury, de l'ACI et du DOE conduiraient à des bétons présentant des comportements différents, notamment en ce qui concerne la maniabilité, la compacité et la résistance mécanique. Il est également supposé que l'une de ces méthodes offrirait un meilleur compromis entre les performances techniques du béton et le coût de production, et pourrait ainsi être considérée comme la plus adaptée au contexte local.

Le choix de ce sujet se justifie par la place centrale qu'occupe le béton dans la construction moderne et par la nécessité d'optimiser sa formulation afin de garantir la sécurité, la durabilité et la rentabilité des ouvrages. La comparaison de méthodes reconnues internationalement, appliquées dans le contexte local, constitue une contribution utile tant pour la pratique professionnelle que pour la recherche académique. Ce travail présente ainsi un intérêt à la fois scientifique et pratique, dans la mesure où il vise à orienter le choix d'une méthode de formulation plus appropriée aux réalités du terrain.

L'objectif général de cette recherche est de réaliser une étude comparative des méthodes de formulation du béton de Faury, de l'ACI et du DOE, en vue d'évaluer leur pertinence sur les plans technique et économique. Plus spécifiquement, il s'agit de présenter les fondements

théoriques de ces méthodes, de les appliquer à l'aide de matériaux disponibles localement, de valider les formulations à travers des essais expérimentaux en laboratoire, de comparer les résultats obtenus en termes de résistance mécanique et d'autres propriétés du béton, puis de proposer des recommandations adaptées aux besoins et contraintes du contexte local.

Hormis l'introduction générale et la conclusion générale, le présent mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature et traite des notions fondamentales sur le béton, de ses propriétés ainsi que des méthodes de formulation étudiées. Le deuxième chapitre présente la méthodologie adoptée, les matériaux utilisés et les procédures expérimentales mises en œuvre. Enfin, le troisième chapitre expose les résultats des essais, leur interprétation et la comparaison entre les différentes méthodes, avant de formuler des recommandations pratiques.

# CHAPITRE I: GENERALITES

## I.1 INTRODUCTION PARTIELLE

Le béton est un matériau composé de ciment, d'eau, de sable, de graviers et, éventuellement, d'adjuvants. Matériau de construction le plus utilisé au monde, il est omniprésent dans le domaine du génie civil en raison de ses performances, de sa souplesse d'emploi et de son faible coût [1].

## I.2 CLASSIFICATION DES BETONS

Par ailleurs, les bétons peuvent être classés selon la masse volumique, la résistance, le liant utilisé et selon la destination [1].

### I.2.1. Classification des bétons selon la masse volumique

Suivant la masse volumique du béton, on distingue le béton très lourd (extra lourd), le béton lourd, le béton léger et le béton très léger. Tableau I-1 : *Classification du béton suivant la masse volumique* présente la classification des bétons selon les masses volumiques [1].

*Tableau I-1 : Classification du béton suivant la masse volumique [1]*

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

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

### I.2.2. Classification des bétons selon leur résistance

Afin de classer le béton selon la résistance, on réalise des essais à la compression des éprouvettes cylindriques de dimension (11 x 22 ; 16 x 32 ; 25 x 50). Les dimensions sont en centimètres. La résistance à la compression d'un béton est exprimée par la résistance caractéristique notée  $f_{ck}$ . La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leurs résistances caractéristiques à la compression suivant le Tableau I-2 : *Classification des bétons selon leur résistance* [1].

*Tableau I-2 : Classification des bétons selon leur résistance* [1]

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

### I.2.3. Classification des bétons selon la destination

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

### I.2.4. Classification des bétons selon le liant utilisé

Selon le liant utilisé, on distingue : Les bétons de ciment, confectionnés avec des liants hydrauliques tels que le ciment Portland ; Les bétons au liants organiques ; Etc...

## I.3 CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un mélange de plusieurs composants : le ciment, eau, air, granulats et éventuellement les adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène.

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

(ciment + eau), d'un mélange granulaire et de produits additionnels (adjuvants, additions minérales, ...) [1].

### I.3.1. Liant

On distingue deux grands groupes de liants : **les liants minéraux** (liants *hydrauliques* et *liants aériens*) et **les liants organiques**.

**Les liants minéraux** sont des poudres finement broyées qui, mélangées à l'eau, forment une pâte plastique qui à son tour durcit pour former un matériau solide, véritable roche (pierre) artificielle.

**Les liants hydrauliques** sont des poudres fines qui ont la propriété de durcir (passer à l'état pierreux), se conserver pendant longtemps aussi bien à l'air que sous l'eau. Les exemples les plus courants sont les ciments Portland et ses variétés, ...

**Les liants aériens** sont ceux qui se conservent pendant une longue durée et augmentent de résistance uniquement à l'air. Parmi les exemples les plus courants on cite les plâtres et la chaux aérienne.

Parlant du ciment, c'est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation. Après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Il est le constituant le plus important et le plus coûteux du béton, et sa qualité détermine en grande partie la résistance finale de l'ouvrage. Son rôle est double : il agit comme un liant en collant les granulats entre eux et complète la courbe granulométrique en apportant des éléments fins. Le ciment est obtenu par le broyage fin du **clinker** et de sulfate de calcium (gypse), qui agit comme régulateur de prise. Le clinker est lui-même issu de la cuisson à très haute température (environ 1450°C) d'un mélange précis de calcaire (environ 80%) et d'argile (environ 20%). [2]

#### I.3.1.1 Types de ciments courants

La norme européenne NF EN 197-1, reprise par la norme algérienne NA 442, classe les ciments courants en cinq types principaux, notés de CEM I à CEM V, en fonction de la nature et de la proportion de leurs constituants, le Tableau I-3 : **Différents types de ciments courants normalisés** nous montre les différents types de ciments courants normalisés .

Tableau I-3 : Différents types de ciments courants normalisés [1]

| Désignation            | Types de ciments                 | Teneur en clinker      | Teneur des constituants secondaires |
|------------------------|----------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| CPA-CEM I              | Ciment portland                  | 95 à 100 %             | 0 à 5 %                             |
| CPJ-CEM II/A           | Ciment portland composé          | 80 à 94 %              | 0 à 5 %                             |
| CPJ-CEM II/B           |                                  | 65 à 79 %              | 0 à 5 %                             |
| CHF-CEM III/A          | Ciment de haut fourneau          | 35 à 64 %              | 0 à 5 %                             |
| CHF-CEM III/B          |                                  | 20 à 34 %              | 0 à 5 %                             |
| CLK-CEM III/C          |                                  | 5 à 19 %               | 0 à 5 %                             |
| CPZ-CEM IV/A           | Ciment pouzzolanique             | 65 à 95 %              | 0 à 5 %                             |
| CPZ-CEM IV/B           |                                  | 45 à 64 %              | 0 à 5 %                             |
| CLC-CEM V/ACLC-CEM V/B | Ciment au laitier et aux cendres | 40 à 64 %<br>20 à 39 % | 0 à 5 %<br>0 à 5 %                  |

### I.3.1.2 Caractéristiques de ciment courant

On distingue trois groupes principaux des caractéristiques du ciment notamment les caractéristiques physiques, les caractéristiques chimiques et les caractéristiques mécaniques

#### a. Caractéristiques physiques du ciment

On distingue neuves caractéristiques physiques du ciment comprenant l'indice d'hydraulicité, la prise, le durcissement, la fausse prise, la chaleur d'hydratation, la finesse de mouture, le retrait, l'expansion et le gonflement [3].

#### b. Caractéristiques mécaniques du ciment

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifie une limite inférieure et une limite supérieure, le Tableau I-4 illustre cela.

*Tableau I-4 : Caractéristiques mécaniques des ciments courants [3]*

| Classe des ciments | Résistance à 2 jours | Résistance minimale à 28 jours | Résistance maximale à 28 jours |
|--------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 32,5               |                      | $\geq 32,5$                    | $\leq 52,5$                    |
| 32,5 R             | $\geq 13,5$          | $\geq 32,5$                    | $\leq 52,5$                    |
| 42,5               | $\geq 12,5$          | $\geq 42,5$                    | $\leq 62,5$                    |
| 42,5 R             | $\geq 20$            | $\geq 42,5$                    | $\leq 62,5$                    |
| 52,5               | $\geq 20$            | $\geq 52,5$                    |                                |
| 52,5 R             | $\geq 30$            | $\geq 52,5$                    |                                |

Les classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques très élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication, ...

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment, la probabilité étant statistiquement de 95 % pour les résistances minimales et de 90 % pour des résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à 100 % sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

*Tableau I-5 : Valeurs des résistances garanties des ciments courants [1]*

| Classe des ciments | Résistances garanties à 2 jours | Résistances garanties à 7 jours | Résistances garanties à 28 jours |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 32,5               |                                 | 17,5                            | 30                               |
| 32,5 R             | 12                              |                                 | 30                               |
| 42,5               | 10                              |                                 | 40                               |
| 42,5 R             | 18                              |                                 | 40                               |
| 52,5               | 18                              |                                 | 50                               |
| 52,5 R             | 28                              |                                 | 50                               |

### I.3.2. Granulats

Les granulats, mélange de sable et de graviers, constituent la phase inerte et le squelette du béton, occupant entre 70% et 80% de son volume total. Leur rôle principal est de former une ossature résistante, de limiter les variations dimensionnelles (retrait) et de réduire le coût du matériau, le ciment étant bien plus onéreux. Leur choix doit être judicieux car leurs propriétés

influencent directement la maniabilité du béton frais, ainsi que la résistance et la durabilité du béton durci.

### I.3.2.1 Classification des granulats

Les granulats sont classés suivant la provenance (on y trouve le granulat naturel et artificiel), suivant la grosseur et selon la masse volumique [1].

**Le granulat naturel roulés** sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes.

**Les granulats concassés (de carrière)** proviennent du concassage de roches dures (Granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives.

**Les granulats artificiels** proviennent également de la transformation thermique des roches (exemple : laitier du haut fourneau) ou de démolition d'ouvrages.

Pour ce qui est de la classification suivant la grosseur la masse volumique, les granulats sont identifiés comme nous l'indique le Tableau I-6 et Tableau I-7.

*Tableau I-6 : Classification suivant la grosseur des granulats [1]*

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

*Tableau I-7 : Classification des granulats suivant les masses volumiques (Dreux, 1981) [1]*

| Nature des Granulats | Masse volumique                                   |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| Granulats légers     | $M_{v_{abs}} < 2 \text{ t/m}^3$                   |
| Granulats courants   | $2 \text{ t/m}^3 < M_{v_{abs}} < 3 \text{ t/m}^3$ |
| Granulats lourds.    | $M_{v_{abs}} > 3 \text{ t/m}^3$                   |

### I.3.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. Celle-ci ne doit pas contenir d'impureté nuisibles (matières organiques, ...). Dans la détermination de son dosage, il est impérieux de tenir compte de la quantité d'eau apportée par les granulats. La quantité d'eau varie avec un grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, la consistance recherchée).

Le dosage en eau est en général compris entre 140 et 210 l/m<sup>3</sup>. Cependant, le rapport E/C demeure un paramètre important dans l'ouvrabilité du béton et de sa qualité (la résistance mécanique à la compression et la durabilité).

### I.3.4. Adjuvants

Les adjuvants modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés. Par exemple, l'emploi des plastifiants-réducteurs d'eau et des supers plastifiants comme adjuvants facilite la mise en place du béton dans les pièces minces fortement armées, ainsi que la réalisation des bétons de hautes performances. On en définit les adjuvants retardateurs de prise ainsi que des accélérateurs de prise [4].

## I.4 PROPRIETES DU BETON

Les principales caractéristiques du béton sont l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité.

L'ouvrabilité (consistance) est la principale caractéristique du béton frais. La résistance est la caractéristique principale des propriétés mécaniques des bétons durcis. La durabilité quant à elle caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été

conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans ses conditions d'environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée) [1].

#### I.4.1. L'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. Celle-ci se détermine généralement par l'essai au cône d'Abrams, essai qui consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais.

Le Tableau I-8 présente le domaine d'utilisation du béton en fonction de l'ouvrabilité mesuré sur le cône d'Abrams

*Tableau I-8 : Classe de consistance des bétons [1]*

| 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                                                   |

### I.4.2. Résistance mécanique

La résistance à la compression est l'une des propriétés prépondérantes du béton durci.

Le béton présente une bonne résistance à la compression mais une moindre à la traction. La résistance et l'ouvrabilité sont à étudier de pair, car ces 2 propriétés sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus, qu'elles varient en sens inverse en fonctions de certains facteurs essentiels de la composition du béton. La résistance à la compression du béton est la capacité de celui-ci à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression. Elle se mesure sur des éprouvettes normalisées à 28 jours. La résistance à la compression est influencée par une multitude de facteurs à savoir, le rapport C/E, la nature des granulats, le type de ciment, les conditions de durcissement, ... etc [1].

Les bétons courants ont une résistance à la compression comprise entre 20 et 40 Mpa pour un rapport E/C de l'ordre de 0.5. Les bétons spéciaux à l'instar des bétons à Haute performance présentent des résistances supérieures à 40 Mpa.

La résistance à la compression peut s'évaluer à partir des essais normalisés qui peuvent être destructifs (au laboratoire sur des éprouvettes) ou non destructifs (pratiqués in situ).

### I.4.3. Durabilité

La durabilité caractérise la capacité du béton à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans ses conditions d'environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

## I.5 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 en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie de l'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 préférences pondérales, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac [5]. De nombreuses méthodes existent comme précitées ci haut, reposant sur des approches théoriques, graphiques ou expérimentales, mais aucune ne garantit

un résultat parfait sans des gâchées d'essai pour ajustement. Parmi les plus connues, on peut citer :

### **I.5.1. Méthode américaine (ACI)**

La méthode ACI 211 est une méthode de formulation du béton basée sur des relations empiriques établies à partir d'essais expérimentaux. Elle consiste à déterminer les proportions des constituants du béton en fonction de la résistance mécanique recherchée, de l'ouvrabilité, du rapport eau/ciment et des caractéristiques des granulats. Cette méthode prend également en compte les conditions de mise en œuvre et d'exposition de l'ouvrage. La méthode ACI est largement utilisée pour sa simplicité d'application et sa fiabilité dans la conception des bétons de structure.

### **I.5.2. Méthode d'Abrams**

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange des granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Les modules de finesse du mélange sont choisis de manière que les vides dans le mélange soient, en principe, réduits au minimum [6].

### **I.5.3. Méthode de BOLOMEY**

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. Cette méthode aboutit théoriquement tout ou moins à une granularité continue [3].

### **I.5.4. Méthode de Faury**

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation de type continu. Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de  $\sqrt[5]{d}$ , c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en  $\sqrt[5]{d}$ . La courbe idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ( $< D/2$ ) des gros grains ( $> D/2$ ) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories [3].

### I.5.5. Méthode des abaques de Dreux

Les abaques de Dreux permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois cette composition déterminée, elle devra être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués. En général, les données telles que la résistance à la compression du béton comprise entre 20 et 40 MPa à 28 jours ainsi que la maniabilité sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux. Selon les hypothèses de la théorie de Dreux le ciment doit être de classe 42.5

### I.5.6. Méthode britannique standard de conception de mélange (DOE)

La méthode du DOE a été publiée pour la première fois en 1975 et révisée en 1988. Elle est une amélioration par rapport à la méthode Road Note No. 4. Elle s'applique à tous les types de mélanges de béton, y compris les routes, tandis que la note routière n° 4 ne s'appliquait qu'aux routes et aux champs aériens.

La méthode DOE est une méthode standard de conception de mélanges au Royaume-Uni maintenant. Cette méthode a utilisé la relation entre le rapport eau/ciment et la résistance à la compression en fonction du type de ciment et de granulats utilisé [6].

## I.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a permis de dresser un aperçu général du béton, en mettant en évidence ses constituants fondamentaux, notamment le ciment, l'eau et les granulats, ainsi que l'importance de leurs caractéristiques et de leur dosage dans l'obtention des performances recherchées. Il s'est conclu par la présentation des principales approches de formulation du béton, avec un accent particulier sur trois méthodes spécifiques, à savoir les méthodes **ACI**, **Faury** et **DOE**. Cette revue générale constitue ainsi le socle théorique indispensable pour aborder le chapitre suivant, consacré à la présentation des matériaux utilisés et des méthodes employées pour la réalisation de l'expérimentation, en vue d'une comparaison pratique des méthodes de formulation étudiées.

## CHAPITRE II: METHODOLOGIE

### II.1. INTRODUCTION PARTIELLE

Ce chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie adoptée pour la réalisation de ce travail. Il vise à décrire de manière rigoureuse la démarche expérimentale suivie afin d'atteindre les objectifs fixés.

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

Les matériaux entrant dans la confection des bétons présentent des natures et des origines variées. Dans cette section, il sera successivement présenté la nature ainsi que l'origine du ciment, des granulats notamment le sable et les graviers concassés et de l'eau de gâchage utilisée.

#### II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans notre travail est le ciment **CIMERWA (CEM II / A 42,5 N)** de couleur grise, produit au **RWANDA**, de classe commerciale 42,5 Mpa.

#### II.2.2. Granulats

Les granulats utilisés dans le cadre de ce travail sont constitués à la fois de granulats concassés et de granulats roulés. Le sable, de nature roulée, provient du Rwanda ; Les graviers de classe granulométrique (8/15 et 15/25) proviennent du concassage de roches volcaniques de la région de Goma.

#### II.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans le cadre de ce travail est une eau potable fournie par la Régie de Distribution d'Eau (**REGIDESO**), Prélevée directement au robinet, elle est exempte d'impuretés, notamment de substances organiques ou chimiques susceptibles d'altérer la qualité et les performances du béton.

## II.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX

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 [8].

### II.3.1. Echantillonnage

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

#### II.3.1.1 Prélèvement sur le tas (sable et gravier)

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en élément de faibles diamètres. Les matériaux sont donc prélevés en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble [5].

Des prélèvements de taille à peu près égale doivent être effectués en différents points à différentes hauteurs ou profondeurs sur l'ensemble du stock [9].

### II.3.2. Le ciment

La masse volumique absolue du ciment est déterminée par un essai normalisé [1]. Le mode opératoire a consisté aux actions ci-après :

- L'Introduction de la solution dans le pycnomètre jusqu'au premier trait repère, noté  $V_1 = 0$  ml ;
- La pesée du pycnomètre contenant la solution, noté  $M_1$  en gramme ;
- L'introduction d'une quantité de ciment dans le pycnomètre jusqu'au deuxième trait repère, noté  $V_2$  en ml ;
- Peser à nouveau le pycnomètre contenant la solution et le ciment, noté  $M_2$  en gramme.

On détermine la masse volumique absolue ( $\text{g/cm}^3$ ) à l'aide de l'équation (II-1).

$$\rho_{abs} = \frac{M2 - M1}{V2 - V1} \quad (II-1)$$

Avec :

$\rho_{abs}$ : masse volumique absolue

M1 : masse 1

M2 : masse 2

V1 : volume 1

V2 : volume 2

### II.3.3. Essais sur les granulats

Dans cette section, il sera question des essais réalisés sur les granulats, notamment de l'analyse granulométrique, qui permet de déterminer la répartition des dimensions des grains, ainsi que d'autres essais permettant de caractériser leurs propriétés.

#### II.3.3.1 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF EN 933-1, elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M préalablement séché dans une étuve ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque granulat.

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.3.3.2 But de l'essai

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

#### II.3.3.3 Principe

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

#### II.3.3.4 Mode Opératoire

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

- Nettoyer Les tamis à l'aide d'une brosse métallique
- Constituer la colonne de tamis en respectant l'ordre des ouvertures des mailles en fonction du matériau (31,5mm ; 25mm ; 20mm ; 16mm ; 12,5mm ; 10mm ; 8mm ; 6,3mm ; 5mm ; 4mm ; 3,15mm ; 2,5mm ; 1,6mm ; 0,8mm ; 630 $\mu$ m ; 400 $\mu$ m ; 315 $\mu$ m ; 250 $\mu$ m ; 160 $\mu$ m ; 125 $\mu$ m ; et 80 $\mu$ m)
- Introduire l'échantillon de Masse Ms sur le tamis de la colonne, après l'avoir lavé et passé à l'étuve pendant 24 heures à 105°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 Ms, et déduction des pourcentages des tamisât cumulés.

#### II.3.3.5 Expression des résultats

Les résultats de l'analyse granulométrique s'expriment sous forme des courbes, dites courbes granulométriques dont les abscisses comportent les dimensions des tamis en module Afnor et les ordonnées les tamisât cumulés en pourcentage, notés  $P_j$  (%). Les tamisât cumulés en pourcentage sont obtenus pour le tamis j (numéro des tamis du haut vers le bas) par l'expression

$$P_j(\%) = \left(1 - \frac{\sum M_i^r}{M_s}\right) \cdot 100 \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$M_i^r$  : Masse du refus du tamis numéro i, avec  $1 \leq i \leq j$

$M_s$  : Masse de l'échantillon sec

Pour les sables, le module de finesse caractérise sa grosseur. Le module de finesse est obtenu en divisant par 100 la somme des pourcentages des refus des tamis de dimensions : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5mm. Il est souhaitable que le module de finesse d'un sable pour béton soit compris entre 2,2 et 2,8. [8]

### II.3.3.6 Interprétation des résultats

Pour interpréter la courbe granulométrique nous nous basons sur l'Equation II-3 et on calcule les différents coefficients CU

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{II-4})$$

$d_y$  : dimension du tamis correspondant à  $y\%$  de passants

Ce coefficient est donc immédiatement à partir de la courbe granulométrique

Si  $C_u < 2$ , la granulométrie est uniforme (ou serrée).

Si  $C_u > 2$ , la granulométrie est étalée (ou variée).

### II.3.3.7 Module de finesse

Le module de finesse des sables a été déterminé selon la norme XP P 18-540 [9], et a été calculé selon l'équation(II-5).

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \% \text{Refus cumules sur le tamis } (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\text{mm}) \quad (\text{II-5})$$

### II.3.3.8 Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ )

La masse volumique apparente des granulats a été déterminée selon la norme NF P 18-555 [8]. L'essai a consisté au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon l'équation 4.

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3) \quad (\text{II-6})$$

Où :

M est la masse sèche du matériau en g

V est le volume du récipient en ml

**II.3.3.9 Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ )**

La masse volumique absolue des granulats a été déterminée selon la norme NF P 18-555 [13]. La méthode qui a été utilisée est celle de l'éprouvette graduée. Elle a consisté à mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau a donné la masse volumique absolue. La masse volumique est calculée selon l'équation 5.

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (II-7)$$

Où :

M : La masse sèche du matériau, en (g),

$V_1$  et  $V_2$  : la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du granulat, en (ml).

**II.3.3.10 Propreté du sable (ES)**

Le degré de propreté du sable a été fourni par l'essai d'équivalent de sable (**ES**), selon la norme NF EN 933-8 [8] , l'équivalent de sable a été déterminé selon l'équation 6.

$$ES = \frac{H_2}{H_1} * 100 \quad (II-8)$$

Où :

$H_2$  : Hauteur du dépôt de sable visible (cm) ;

$H_1$  : Hauteur totale (sable + floculats) (cm) ;

ES : Equivalent de sable (%)

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 II-1

Tableau II-1 : Appréciation des granulats compte tenu de la valeur *ES* [8]

| ES à vue                 | ES au piston             | Nature et qualité du sable                                                                                                                                                           |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ES<65%                   | ES<60%                   | Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement.<br>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.3.4. Essais sur le béton frais

Dans cette section, il sera question des essais réalisés sur le béton frais.

#### II.3.4.1 Essai d'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton a été évaluée à l'aide du cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451. L'essai a consisté à introduire le béton frais dans un moule tronconique ( $D = 20$ ,  $d = 10$ ,  $H = 30$  cm) en trois couches, où chacune a subi 25 coups de piquage à l'aide d'une tige de 16 mm de diamètre, puis le moule a été retiré lentement et la mesure de l'affaissement a été prélevée en (cm).

### II.3.5. Essais sur le béton durci

L'essai qui sera réalisé sur le béton durci dans cette étude est la mesure de la résistance à la compression.

### II.3.5.1 Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, La résistance à la compression du béton est déterminée par un essai normalisé [10].

Après surfaçage de l'éprouvette de 16 x 32, celle-ci est placée entre les plateaux d'une presse à béton. L'effort de compression est appliqué progressivement à une vitesse de  $10 \pm 4$  kN par seconde [4]. Les résultats ont été obtenus par une relation.

$$R_{Cj} = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (\text{II-9})$$

Où :

F est la force qui agit sur l'éprouvette en Newton

A est la section de l'éprouvette en mm

## II.4. 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 en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause [10].

### II.4.1. Méthode de Faury

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu [11].

Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de  $\sqrt[5]{D}$ ; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en  $\sqrt[5]{D}$ . La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, Faury a distingué les grains fins et moyens ( $< D/2$ ) des gros grains ( $> D/2$ ) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories [10].

#### II.4.1.1 Tracé de la courbe optimale

Ce n'est plus un segment de droite ; mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut définir l'origine, l'extrémité et le point de brisure [12].

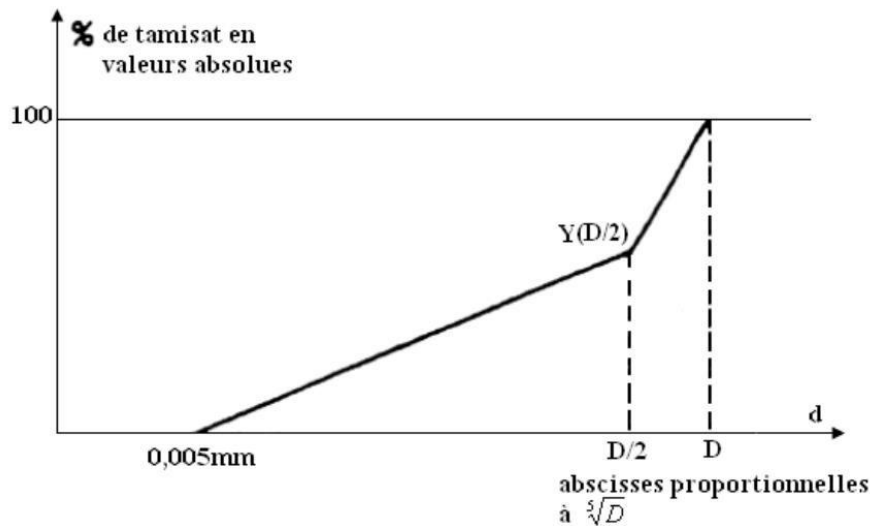
**Origine :** point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,005 mm, dans d'autres cas on choisit une dimension normalisée de tamis 0,0063 ; On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis (rapport.) et sur l'axe des ordonnées le % des tamisât cumulés en volume absolu.

**Extrémité :** point d'abscisse D et d'ordonnée 100

**Point de brisure :** abscisse D/2 ;

Avec la méthode de Faury en abscisses sont représentées les dimensions des tamis proportionnelles à racine cinquième de D ( $\sqrt[5]{D}$ ) et en ordonnées, les pourcentages de tamisât comme nous l'indique la figure 1.

*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*



Le point de brisure a pour abscisse D/2 et pour ordonnée Y (D/2) donnée par l'équation (II-10)

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

A= Constante, traduisant la maniabilité du béton,

B= Constante, traduisant l'importance du serrage du béton,

D = Plus grande dimension de tamis, il est donc nécessaire de connaître la valeur numérique de D,

R = Rayon moyen du moule,

$D/R$  = L'inverse de l'effet de paroi.

### Valeur de A

Faury a distingué les bétons, suivant la grosseur des plus gros grains, avec coupures à 25 et 50mm (dimensions des tamis). Une valeur spéciale de A est attribuée au béton de piste, dont les conditions de travail recherchent des caractéristiques particulières comme nous indique le tableau ci-dessous [13].

**Tableau II-2 : Valeur de A**

| Moyen de mise en œuvre | Matériaux utilisés      |                            | D ≤ 25mm       | Destination                            |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------------------|
|                        | Sable et gravier roulés | Sable et gravier concassés |                |                                        |
| Assez plastique        | 24 à 26                 | 30 à 32                    | D ≤ 25mm       | Béton armé : bâtiment et ouvrage d'art |
| Plastique              | 26 à 28                 | 32 à 34                    |                |                                        |
| 15 à 20                |                         |                            | 25 < D ≤ 50    | Béton légèrement armé                  |
| 12 à 15                |                         |                            | 50 < D ≤ 80    | Béton de Barrage                       |
| 12                     |                         |                            | D > 80         | Béton de Barrage                       |
| 15                     |                         |                            | Béton de piste |                                        |

### Valeur de B

La valeur de B varie en fonction des conditions techniques, elle est égale à 1 dans le cas d'un serrage particulièrement énergétique et à 1.5 dans tous les autres cas [13].

### Valeur de D

C'est la dimension de tamis qui laisserait tout juste passer la totalité de granulat déterminé grâce à l'équation (II-11 [13].

$$D = d_{n-1} \left( 1 + \frac{X}{2Y} \right) \quad (\text{II-11})$$

Où

$d_{n-1}$  : Avant dernier tamis

X : Refus sur l'avant dernier tamis

Y : Pourcentage des tamisât de  $d_{n-1}$  mais qui reste sur

$$\frac{dn-1}{2}$$

#### II.4.1.2 Détermination des pourcentages des granulats

En considérant deux granulats ( $d_1d_2$ ) et ( $d_3d_4$ ) qu'on désire mélanger pour respecter la courbe optimale. Ces courbes ( $d_1d_2$ ) et ( $d_3d_4$ ) étant tracées, trois cas sont possibles :

- $d_3$  coïncide avec  $d_2$ , il y a juxtaposition de ces deux granulats
- $d_3$  est à gauche de  $d_2$ , il y a superposition entre ces deux granulats
- $d_3$  est à droite de  $d_2$ , il y a discontinuité entre les deux granulats

La méthode de JOSIEL correspond à la tracée d'une parallèle à l'axe des ordonnées

#### 1<sup>er</sup> cas, il y a juxtaposition de ces deux granulats

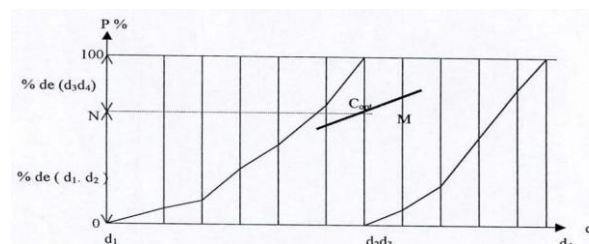
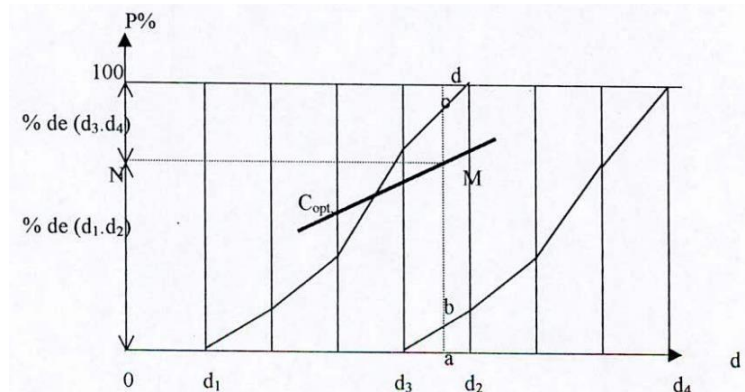


Figure II-1 : Détermination du pourcentage des granulats cas 1 [13]

La verticale ici est l'ordonnée correspondant à  $d_2d_3$ , qui coupe la courbe optimale en un point M qui est porté sur l'axe des ordonnées en un point N, donnant en échelle les valeurs des pourcentages granulats (0 jusqu'à N, le Pourcentage du granulat  $d_1d_2$  y compris le ciment et N à 100, le pourcentage du granulat  $d_3d_4$ ) comme indiqué à la **Figure II-1**

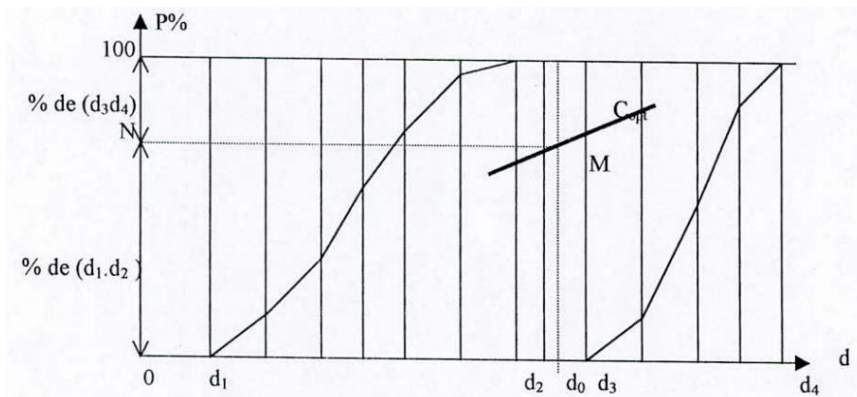
**2<sup>e</sup> cas, il y a superposition entre ces deux granulats**



**Figure II-2 : Détermination du pourcentage des granulats cas 2 [13]**

La verticale est placée à  $d_0$ , tel que pour cette dimension de tamis, le pourcentage de tamisant de gros élément soit égal au pourcentage des refus du petit, c'est-à-dire  $ab=cd$  [13]

**3<sup>e</sup> cas, il y a discontinuité entre les deux granulats**



**Figure II-3 : Détermination du pourcentage des granulats cas 3**

La verticale est au point  $d_0 = d_2^+ d_3^-$  qui est tracée, non au milieu du segment  $d_2d_3$  mais peu en droite de ce milieu [13]

#### II.4.1.3 Détermination de la quantité d'eau selon Faury

Alors il y a deux façons de trouver la quantité d'eau selon Faury

La première façon d'obtenir la quantité d'eau est donnée par l'équation (II-12) [14] :

$$E = \frac{0.39}{\sqrt[5]{D_{max}}} \times 1000 \quad (\text{II-12})$$

La deuxième façon est obtenue comme suit :

Tout d'abord pour un béton d'une consistance donnée avec des matériaux donnés, il y a un volume maximal de matières solides auquel correspond un vide minimal ; celui-ci est donné par l'équation (II-13)

$$n = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{k'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (\text{II-13})$$

Les valeurs usuelles de K et K' sont données par le Tableau II-3

**Tableau II-3 : Valeurs du coefficient K**

| Consistance<br>Moyen | Moyen de mise en<br>œuvre           | Matériaux utilisés        |                                   |                             | K'    |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------|
|                      |                                     | Sable et<br>gravier roulé | Sable roulé –<br>gravier concassé | Sable- gravier<br>concassés |       |
| Molle                | Piquage et Damage<br>sans vibration | >0,34                     | >0,36                             | >0,38                       | 0,004 |
| Normale              | Vibration moyenne                   | 0,26                      | 0,28-0,30                         | 0,30-0,34                   | 0,003 |
| Ferme                | Vibration pousse                    | 0,25-0,27                 | 0,26-0,28                         | 0,28-0,30                   | 0,002 |
| Très ferme           | Vibration puissante                 | <0,24                     | <0,25                             | <0,27                       | 0,002 |

Au final, on obtient la quantité d'eau par l'équation

$$1,2. n \leq \frac{Eau}{1000} \leq 1,3. n \quad (II-14)$$

(1,2. n pour un Béton Ferme et 1,3. n pour un Béton. Mou) [15].

#### II.4.1.4 Détermination de volumes des éléments secs

Dans 1 m<sup>3</sup> de béton, on a un volume absolu total de constituants solides égal à 1-E, nous trouvons donc les différents volumes aux équations (II-15) et (II-16) [13] .

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} = 1 - E \quad (II-15)$$

$$V_{\text{ciment}} = \frac{\text{Quantité du ciment}}{\text{Masse volumique absolue du ciment}} \quad (II-16)$$

### II.4.2. Méthode ACI

La méthode de formulation du béton de l'American Concrete Institute (ACI) est l'une des approches les plus utilisées à l'échelle internationale pour le dosage des bétons courants. Elle est basée sur la relation entre la résistance mécanique recherchée, le rapport eau/ciment, la consistance du béton et les caractéristiques des granulats. Normalisée par l'ACI 211.1, cette méthode propose une démarche rationnelle et progressive permettant d'obtenir un béton présentant des performances satisfaisantes en termes de résistance et de durabilité, tout en restant applicable aux conditions pratiques de chantier [16].

#### Données de base pour le calcul des mélanges de béton [17]

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

1. Analyse granulométrique 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 (Dmax),
11. Résistance du béton,
12. Adjuvants ou types de ciments spéciaux à utiliser.

Cependant nous allons le faire par étape pour notre formulation

#### II.4.2.1 Choix de l'affaissement [17]

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-4 : : Affaissement recommandé pour différents types de construction, 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-4 : : Affaissement recommandé pour différents types de construction [18]**

| 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)   |

Cependant nous devons tenir compte du fait que l'affaissement maximum à ne pas dépasser dans la méthode ACI est de 180 mm

#### II.4.2.2 Choix du diamètre maximal ( $D_{max}$ ) des gros granulats

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 [17].

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.

#### II.4.2.3 Résistance moyenne à la compression visée a 28 jours

Pour déterminer la résistance moyenne à la compression a 28 jours il faut utiliser la formule :

$$Fm = fc + 1,34 s \text{ ou } Fm = fc + 2,33 s - 3,45 \quad (\text{II-17})$$

En l'absence des données ( $s$ = écart type) on choisit notre résistance moyenne dans le Tableau II-5

**Tableau II-5 : résistance moyenne à la compression visée à 28 jours**

| $F_c$       | Résistance moyenne à la compression visée a 28 jours |
|-------------|------------------------------------------------------|
| < 21 Mpa    | $F_c + 7,0$                                          |
| 21 à 35 Mpa | $F_c + 8,5$                                          |
| >35 Mpa     | $F_c + 10,0$                                         |

Pour notre cas,  $F_c = 20 + 7 = 27 \text{ Mpa}$

#### II.4.2.4 Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air

L'ouvrabilité du béton dépend premièrement de la teneur en pâte du béton, de la quantité de l'air entrainé, 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 entrainé et non entrainé peut être obtenue à partir du Tableau II-6 *Tableau II-6 : Exigences en eau de gâchage approximative et teneur en air pour différents*

*Tableau II-6 : Exigences en eau de gâchage approximative et teneur en air pour différents*

| 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 |
|                                                             | Béton sans air entrainé                                                 |         |       |       |         |       |       |        |
| 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<br>Approximative (%)                         | 3                                                                       | 2.5     | 2     | 1.5   | 1       | 0.5   | 0.3   | 0.2    |
|                                                             | Béton à air entrainé                                                    |         |       |       |         |       |       |        |
| 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<br>moyenne<br>recommandée pour<br>(%): |                                                                         |         |       |       |         |       |       |        |
| 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    |

#### II.4.2.5 Choix du rapport eau/ciment (E/C)

La sélection du rapport E/C approprié est guidée par les exigences de résistance ou de durabilité [17].

- a) **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-7

**Tableau II-7 : Relation entre le rapport Eau/ciment et la résistance du béton**

| 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 [17]. Adapté de ACI 211.1 et ACI 211.3.

- b) **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 6.3b pourra être utilisé pour estimer le rapport E/C.

**Tableau II-8 : Rapport E/C maximal pour les bétons exposés aux conditions sévères**

| 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 entraîné, \*Si le ciment résistant aux sulfates est utilisé, le rapport E/C devra être majoré de 0.05.

#### II.4.2.6 Calcul du dosage en ciment

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.

#### II.4.2.7 Estimation de la teneur en gros granulat

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-9 : *Volume du gros granulat compacté à l'état sec par unité de volume du béton* multipliée par la masse volumique compactée du granulat en kg/m<sup>3</sup>.

#### II.4.2.8 Estimation de la teneur en granulat fin

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. Le Tableau II-9 nous montre comment on peut l'obtenir.

**Tableau II-9 : Volume du gros granulat compacté à l'état sec par unité de volume du béton**

| 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<br>0.82 |

#### II.4.2.9 Ajustement pour l'humidité des granulats

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.

#### II.4.2.10 Ajustement de la gâchée d'essai

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.

- a) 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.

- b) 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.
- c) 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 (Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air)

### II.4.3.Méthode DOE

La méthode britannique de formulation du béton, connue sous l'appellation DOE (Department of the Environment), est une approche normalisée développée au Royaume-Uni pour la détermination des proportions des constituants du béton. Elle repose sur l'établissement préalable d'une résistance moyenne cible, puis sur l'utilisation de courbes empiriques reliant le rapport eau/ciment, la résistance mécanique et l'ouvrabilité du béton. Appréciée pour sa simplicité et sa fiabilité, la méthode DOE est largement utilisée dans la pratique du génie civil, notamment pour la formulation des bétons courants soumis à des exigences de résistance et de durabilité [19].

#### Données de base pour le calcul des mélanges de béton

Les données de base suivantes sont requises [20]:

L'affaissement souhaité, la résistance caractéristique en compression visée sur une éprouvette cubique, le type et taille maximale de granulats à utiliser, le pourcentage de tamisât au travers du tamis de 600 micros, le type du ciment (classe commerciale), la condition d'exposition de l'ouvrage, le nombre d'échantillon à tester en vue de la résistance.

#### II.4.3.1 Calcul de la résistance caractéristique moyenne

Ici il revient de trouver la résistance moyenne cible à partir de la Résistance caractéristique spécifiée déterminé à partir de l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

$$F_m = F_c + k.s \quad (\text{II-18})$$

Avec

$F_m$  = la résistance moyenne cible

$F_c$  = la résistance caractéristique visée sur une éprouvette cubique

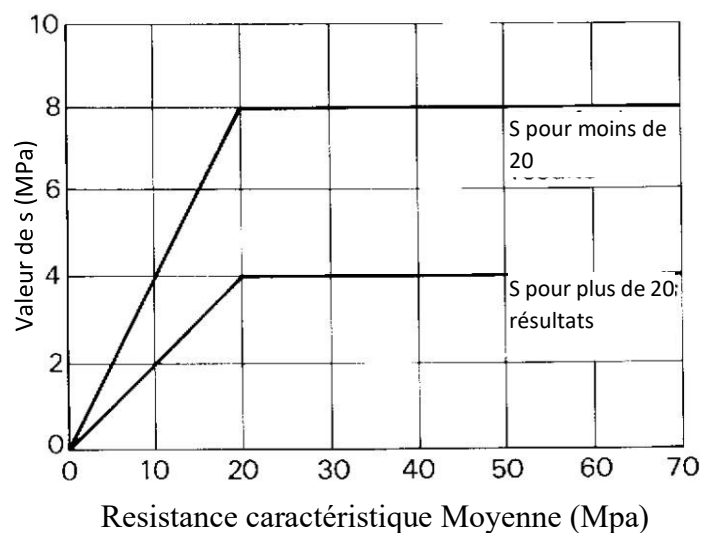
$s$  = l'écart type

$k$  = une constante

La valeur de  $k$  et  $s$  sont obtenues respectives selon Tableau II-10 : *Valeur de k DOE* et Figure II-4 : *Valeurs de s*, [21] :

**Tableau II-10 : Valeur de k DOE [21]**

| Pourcentage Autorise défectueux | Valeur de k |
|---------------------------------|-------------|
| 16                              | 1           |
| 10                              | 1,28        |
| 5                               | 1,64        |
| 2,5                             | 1,96        |
| 2                               | 2,05        |
| 1                               | 2,33        |



**Figure II-4 : Valeurs de s**

Dans la norme BS 5328 le niveau défectueux de 5 % spécifié,  $k = 1,64$  est recommandé pour des petits essais et pour moins de 20 résultats (éprouvettes) à tester pour obtenir les résistances caractéristiques visée  $s = 8 \text{ N/mm}^2$  [22].

$$Fm = Fc + 1,64 s \quad (\text{II-19})$$

#### II.4.3.2 Détermination du rapport E/C

- À partir du Tableau II-11 : *Approximation de la résistance caractéristique moyenne en fonction du rapport E/C*, selon la durée des jours de la résistance visée, le type de ciment et le type de gravier [21].
- La détermination est faite à partir de la Figure II-4 : *Valeurs de s*. À partir du Tableau II-10, la résistance à la compression approximative du béton fabriqué avec un rapport eau libre/ciment 0,5 est obtenue.
- Maintenant, marquez un point sur l'axe y de la Figure II-5 égale à la résistance à la compression lue dans le tableau 18, qui est au rapport p/c 0,5.
- À partir de ce point, dessinez une courbe parallèle à la plus proche du point d'intersection à l'aide de cette courbe, lisez le rapport E/C par rapport à la force moyenne cible.
- Lorsqu'on précise la condition de durabilité, comparer le rapport E /C trouvé avec de le rapport E /C de la condition de durabilité du Tableau II-11 et maintenir celle de la condition de durabilité [7].

**Tableau II-11 : Approximation de la résistance caractéristique moyenne en fonction du rapport E/C [21]**

| Résistance caractéristique du ciment (N/mm <sup>2</sup> ) | Type du gravier | Résistance caractéristique moyenne (N/mm <sup>2</sup> ) |         |          |          |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
|                                                           |                 | 3 jours                                                 | 7 jours | 14 jours | 28 jours |
| 42,5                                                      | Roulé           | 22                                                      | 30      | 42       | 49       |
|                                                           | Concassé        | 27                                                      | 36      | 49       | 56       |
| 52,5                                                      | Roulé           | 29                                                      | 37      | 48       | 54       |
|                                                           | Concassé        | 30                                                      | 43      | 55       | 61       |

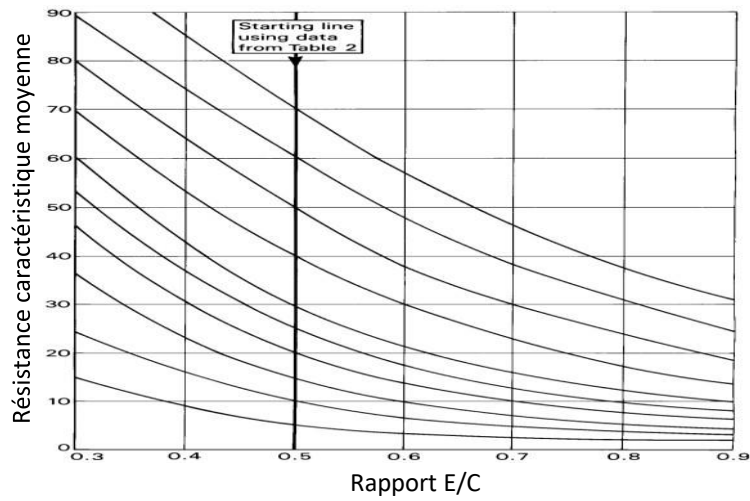


Figure II-5 : Détermination du rapport E/C en fonction de la résistance moyenne

Tableau II-12 : Valeurs liées condition de durabilité [7]

| Condition d'exposition |       | Enrobage nominal du béton (mm) |       |     |      |
|------------------------|-------|--------------------------------|-------|-----|------|
| Faible                 | 25    | 20                             | 20    | 20  | 20   |
| Modérée                | ----- | 35                             | 30    | 25  | 20   |
| Forte                  | ----- | -----                          | 40    | 30  | 25   |
| Très forte             | ----- | -----                          | 50    | 40  | 30   |
| Extrême                | ----- | -----                          | ----- | 60  | 50   |
| E/C Max                | 0,65  | 0,6                            | 0,55  | 0,5 | 0,45 |
| Ciment (Kg) Min        | 275   | 300                            | 325   | 350 | 400  |
| Résistance Min (Mpa)   | 30    | 35                             | 40    | 45  | 50   |

#### II.4.3.3 Détermination de la quantité d'eau

Déterminer la teneur en eau pour la maniabilité requise, en tenant compte de la taille maximale et de son type à partir du Tableau II-13[21].

Tableau II-13 : Détermination de la quantité d'eau libre en litre

| Affaissement au cône d'Abrams (mm) |                  | 10 à 30 | 30 à 60 | 60 à 180 |
|------------------------------------|------------------|---------|---------|----------|
| Temps vebe (sec)                   |                  | 6 à 12  | 3 à 6   | 0 à 3    |
| Dimension max<br>De granulat       | Type de granulat |         |         |          |
| 10 mm                              | Roulé            | 180     | 205     | 225      |
|                                    | Concassé         | 205     | 230     | 250      |
| 20mm                               | Roulé            | 160     | 180     | 195      |
|                                    | Concassé         | 190     | 210     | 225      |
| 40mm                               | Roulé            | 140     | 160     | 175      |
|                                    | Concassé         | 175     | 190     | 205      |

#### II.4.3.4 Détermination de la quantité du ciment

La quantité de ciment peut être calculée à partir de la teneur totale en eau et du rapport E/C, c'est-à-dire l'équation (II-20).

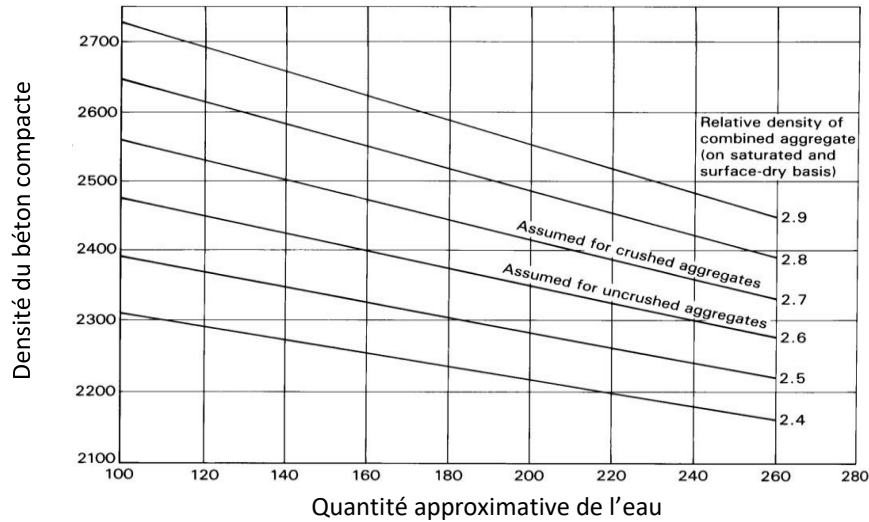
$$C = \frac{E}{\frac{E}{C}} \quad (\text{II-20})$$

La quantité de ciment obtenue par la relation ci-dessus doit être comparée à la teneur minimale en ciment spécifiée à partir du tableau 18 de durabilité. La plus élevée des deux quantités est adoptée.

#### II.4.3.5 Détermination de la Densité du béton

Pour déterminer la teneur totale en granulats, l'estimation de la densité humide du béton entièrement compacté est nécessaire. Cela peut être obtenu à partir de la Figure II-6 qui est fonction de la quantité d'eau approximative et la densité connue du gravier. Si la densité de gravier n'est pas connue, sa valeur pour l'agrégat non broyé peut être considérée comme 2.6 et 2.7; pour gravier broyé peut être supposée comme indiqué sur les courbes A et B de la Figure II-6 ,

La teneur en agrégat est déterminée en soustrayant les poids de la teneur en ciment et en eau du poids du béton frais lu à partir de la Figure II-6 [21].



**Figure II-6 : Détermination de la densité théorique du béton compacte**

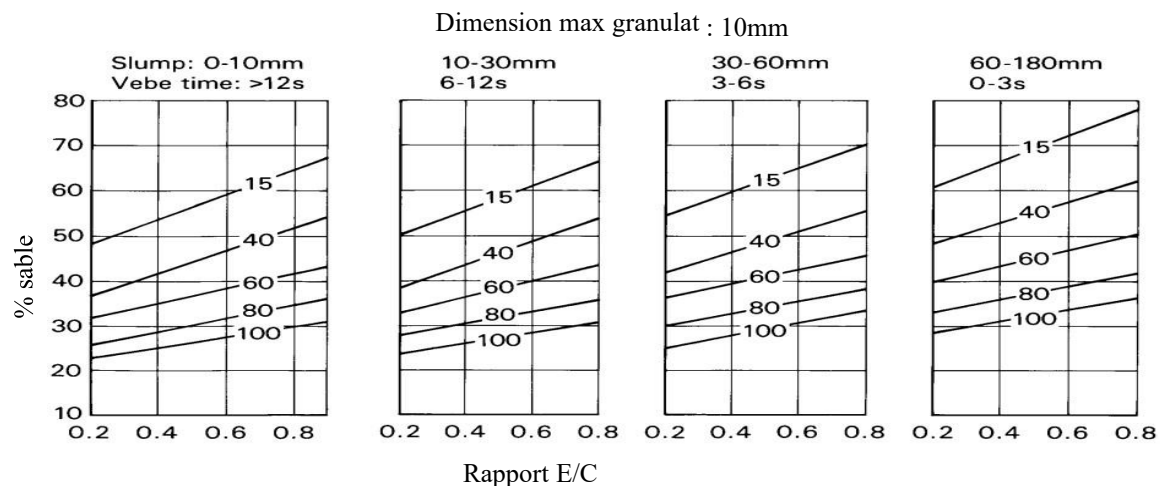
#### II.4.3.6 Calcul de la quantité total des Granulats

La quantité totale de granulat G est trouvée à partir de l'équation (II-21).

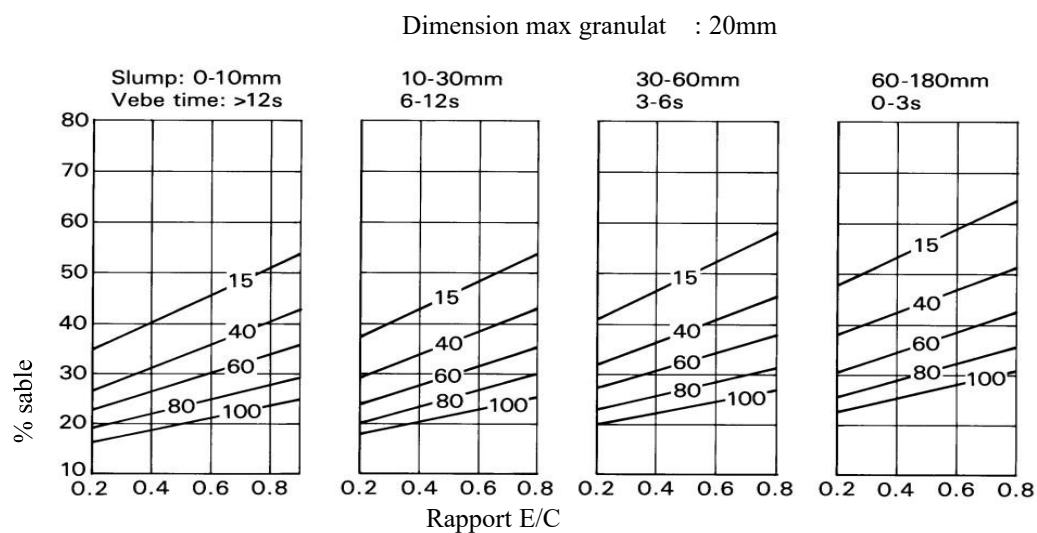
$$G = \text{Densité du béton} - E - C \quad (\text{II-21})$$

#### II.4.3.7 Détermination de la quantité du sable

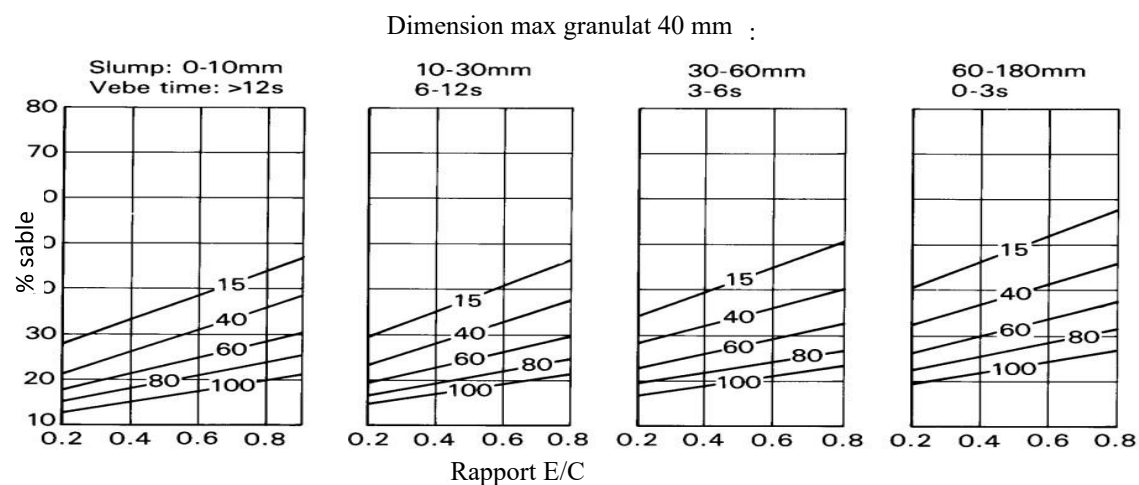
La proportion du sable dans l'agrégat total est déterminée à partir de respectivement la Figure II-7, Figure II-8, Figure II-9 de dimension maximale 10 mm, 20 mm et 40 mm en tenant compte de la teneur en eau, l'affaissement désiré et le pourcentage d'agrégat fin passant par un tamis de 600 microns [21].



**Figure II-7 : Détermination de % sable pour dimension max de 10mm**



**Figure II-8 : Détermination de % sable pour dimension max de 20mm**



**Figure II-9 : Détermination de % sable pour dimension max de 40mm [21]**

Connaissant la proportion du sable des Figures **Figure II-7**, **Figure II-8**, **Figure II-9** le poids du sable  $s$  peut être obtenu en multipliant le poids total de granulats par cette proportion, comme nous indique l'équation (II-22) .

$$s = \%S \times G \quad (\text{II-22})$$

#### II.4.3.8 Détermination de la quantité du gravier

Connaissant la quantité du sable  $s$ , la quantité du gravier  $g$  peut être trouvée à partir de l'équation (II-23) .

$$g = G - s \quad (\text{II-23})$$

Le gravier peut en outre être divisé en différentes fractions en fonction de la dimension de granulat disponible. En général, les chiffres donnés dans le Tableau II-14 : Combinaison des % des granulats des dimensions variés peuvent être adoptés

**Tableau II-14 : Combinaison des % des granulats des dimensions variés [7]**

| % total gravier | % gravier 5 -10 mm | % gravier 10 -20 mm | % gravier 20 -40 mm |
|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 100             | 33                 | 37                  | -----               |
| 100             | 18                 | 27                  | 55                  |

## II.5. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Dans cette partie, nous présentons le programme expérimental adopté pour mener une étude comparative des propriétés du béton formulé selon les méthodes de Faury, ACI et DOE, avec une application spécifique au béton ordinaire à base de granulats concassés. L'étude porte sur la formulation d'un béton ternaire visant une résistance caractéristique de 20 MPa, afin d'évaluer l'influence des différentes méthodes de formulation sur les performances mécaniques du béton.

Les bétons expérimentaux sont élaborés à base du ciment Cimerwa CEM II/A-P 42,5 N, afin d'assurer l'homogénéité des comparaisons. Les granulats utilisés comprennent un sable roulé provenant du Rwanda, ainsi que des graviers concassés de classes 8/15 et 15/25. Ces granulats ont fait l'objet d'analyses granulométriques conformément à la norme NF EN 933-1, par voie sèche, en vue de la constitution du squelette granulaire des bétons.

Les essais réalisés sur le béton frais comprennent la mesure de l'ouvrabilité à l'aide du cône d'Abrams, ainsi que la détermination de la masse volumique apparente. Après moulage, les éprouvettes sont conservées par immersion dans un bac d'eau à une température de 20 °C jusqu'aux âges d'essai.

Les performances mécaniques du béton sont évaluées par des essais de compression, réalisés conformément à la norme ASTM C39, aux âges de 7, 14 et 28 jours. La masse volumique apparente de chaque éprouvette est mesurée avant les essais afin de garantir la fiabilité des résultats obtenus.

Au total, 27 éprouvettes cylindriques sont confectionnées, réparties équitablement entre les trois méthodes de formulation étudiées, soit 9 éprouvettes pour chaque méthode (Faury, ACI et DOE). Pour chaque méthode, 3 éprouvettes sont testées à chaque âge, conformément aux recommandations de la norme ASTM C39, qui préconise l'utilisation d'au moins deux à trois éprouvettes par âge pour les essais de résistance à la compression.

## II.6. LE COUT DU BETON

Il n'existe pas de coût unitaire fixe pour le m<sup>3</sup> de béton, celui-ci variant en fonction de plusieurs paramètres. Dans le cadre de ce travail, le coût global du béton est déterminé à partir de la somme des coûts des différents constituants entrant dans sa composition, à savoir le ciment, l'eau, le sable et le gravier

Le coût global du béton étant estimé en fonction de ceux de ses constituants, telles sont les valeurs prise compte dans le cadre de ce travail en dollars américains sont :

- Sable d'Idjwi, 6 m<sup>3</sup> pour 130\$
- Gravier concassé 8/15 et 15/25, 1 m<sup>3</sup> pour 26 \$
- Le ciment CIMERWA 42,5 MPa pour 12,5\$
- Eau : 20 litres en 0,21 \$

## II.7. CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie adoptée pour mener cette étude. La nature et l'origine des constituants du béton ont été décrites, suivies des essais de laboratoire réalisés pour leur caractérisation. Les différentes méthodes de formulation du béton retenues, à savoir les méthodes de Faury, ACI et DOE, ainsi que le programme expérimental et les essais réalisés sur le béton frais et durci, ont également été exposés.

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

## CHAPITRE III: PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

### III.1 INTRODUCTION PARTIELLE

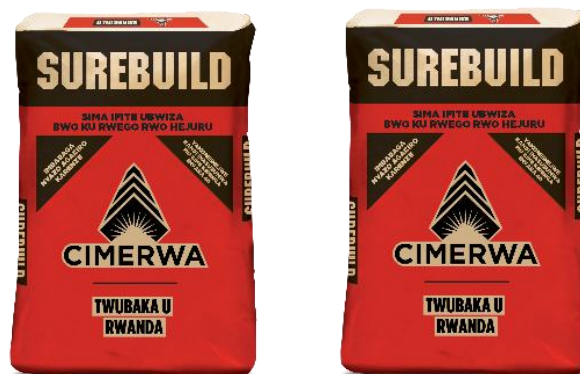
Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus au cours de l'étude expérimentale. Il met en évidence les performances des bétons formulés selon les méthodes de Faury, ACI et DOE, à travers l'interprétation des essais réalisés sur le béton frais et durci. L'objectif est de comparer ces différentes approches de formulation en fonction de la résistance mécanique obtenue, ainsi que des aspects pratiques et économiques.

### III.2 PRESENTATION DES CONSTITUANTS DU BETON

Les matériaux entrant dans la composition du béton sont de natures diverses. Dans cette section, nous présentons les principaux constituants, à savoir le ciment, les granulats (sable et graviers concassés) ainsi que l'eau de gâchage.

#### III.2.1. 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 3,1 g/cm<sup>3</sup>, la Figure III-1 nous montre le ciment utilisé.



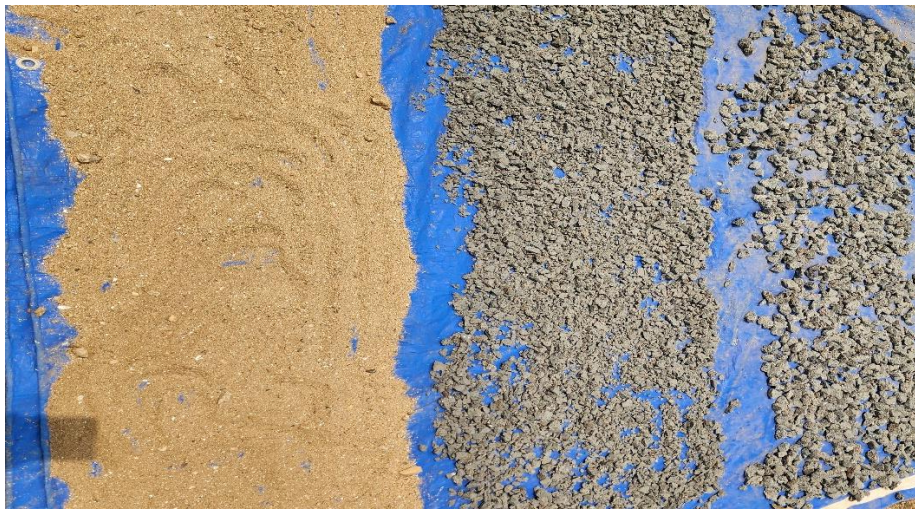
*Figure III-1 : Ciment CIMERWA 42,5 N*

### III.2.2. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable provenant de la Régie de Distribution d'Eau (REGIDESO). Elle est prélevée directement au robinet et ne contient pas d'impuretés, notamment les matières organiques ou chimiques susceptibles de nuire à la qualité du béton.

### III.2.3. Granulats

Les granulats utilisés dans notre travail sont des concassés ainsi que des roulés, le sable est roulé et provient du RWANDA ; les graviers 8/15 et 15/25 sont issus du concassage de la roche volcanique de Goma, la Figure III-2 : *sable roulé et graviers concassés* nous montre le type des granulats utilisées



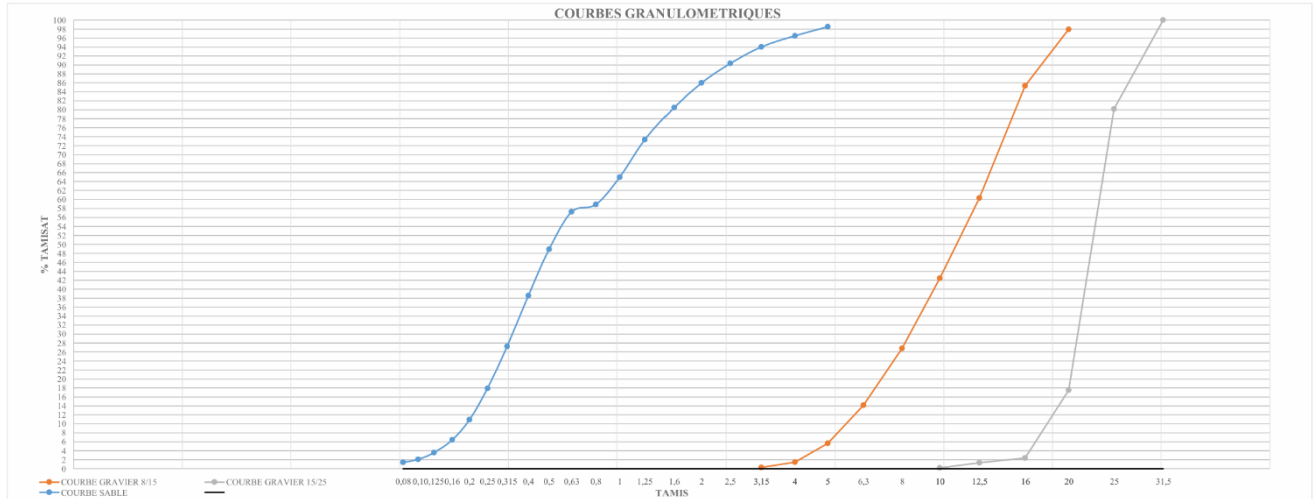
*Figure III-2 : sable roulé et graviers concassés*

## III.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Dans cette section, nous présentons les différents essais réalisés au laboratoire afin d'évaluer les caractéristiques du ciment, des granulats et de l'eau de gâchage. Ces analyses sont indispensables pour vérifier la conformité des matériaux et garantir la fiabilité des formulations de béton adoptées dans cette étude.

### III.3.1. Composition granulométrique

Les courbes granulométriques des différents constituants sont présentées sur la Figure III-4 afin d'analyser la répartition des grains en fonction des dimensions des tamis et d'évaluer leur contribution à la composition du squelette granulaire du béton.



**Figure III-3 : les courbes granulométriques du sable roulé et des graviers concassés**

La Figure III-3 : les courbes granulométriques du sable roulé et des graviers concassés présente les courbes granulométriques du sable roule 0/5 et des graviers 8 /15 et 15/25 ; La courbe granulométrique du sable présente une évolution régulière, avec une augmentation progressive du pourcentage passant selon l'ouverture des tamis. Cela montre que les grains sont bien répartis, ce qui indique un sable bien gradué, favorable à la formation d'un béton compact.

#### III.3.1.1 Coefficient d'uniformité (Cu) et Module de finesse (Mf)

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

**Tableau III-1 : Coefficient d'uniformité et module de finesse**

| Designation    | Cu   | Mf   |
|----------------|------|------|
| Sable          | 4,35 | 2,46 |
| Graviers 8/15  | 2,20 | ...  |
| Graviers 15/25 | 1,30 | ...  |

D'après le Tableau III-1, nous remarquons que le coefficient d'uniformité du sable est supérieur à 2, ce qui signifie que la granulométrie est étalée (ou variée).

Il est souhaitable que le module de finesse d'un sable pour béton soit compris entre 2,2 et 2,8. [8]

Pour notre cas le sable a un module de finesse de 2,46 ce qui est souhaitable pour un béton ; En ce qui concerne les graviers nous remarquons que le gravier 8/15 et 15/25 présentent respectivement un coefficient d'uniformité de 2,20 et de 1,30 ce qui signifie que la granulométrie du gravier 8/15 étalée alors que celle du gravier 15/25 est uniforme ou serrée.

### 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 graviers*

| Désignation                                  | Ciment | Sable | Graviers<br>8/15 | Gravier<br>15/25 |
|----------------------------------------------|--------|-------|------------------|------------------|
| Masse volumique absolue en $\text{kg/m}^3$   | 3100   | 2500  | 2600             | 2600             |
| Masse volumique apparente en $\text{kg/m}^3$ | ...    | 1350  | 1400             | 1400             |

La masse volumique du ciment utilise est de  $3100 \text{ kg/m}^3$ , la valeur de référence

Les masses volumiques absolues des granulats se situent entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  et  $3000 \text{ kg/m}^3$ , ce qui les classe parmi les granulats courants

### III.3.3. Equivalent sable

Le degré de propreté de sable utilise dans cette étude est de 84,63 % pour l'essai à vue et de 80% pour l'essai au piston, ce qui nous dit que notre sable est propre et a faible proportion de fine argileuses convenant pour les bétons de haute qualité.

### III.4 FORMULATION DES BETONS

Dans cette partie, il sera question de la présentation des résultats obtenus à l'issue des différents essais réalisés sur les formulations de béton étudiées. Ces résultats permettront d'évaluer et de comparer les performances des différentes méthodes de formulation sur les plans physique, mécanique et économique.

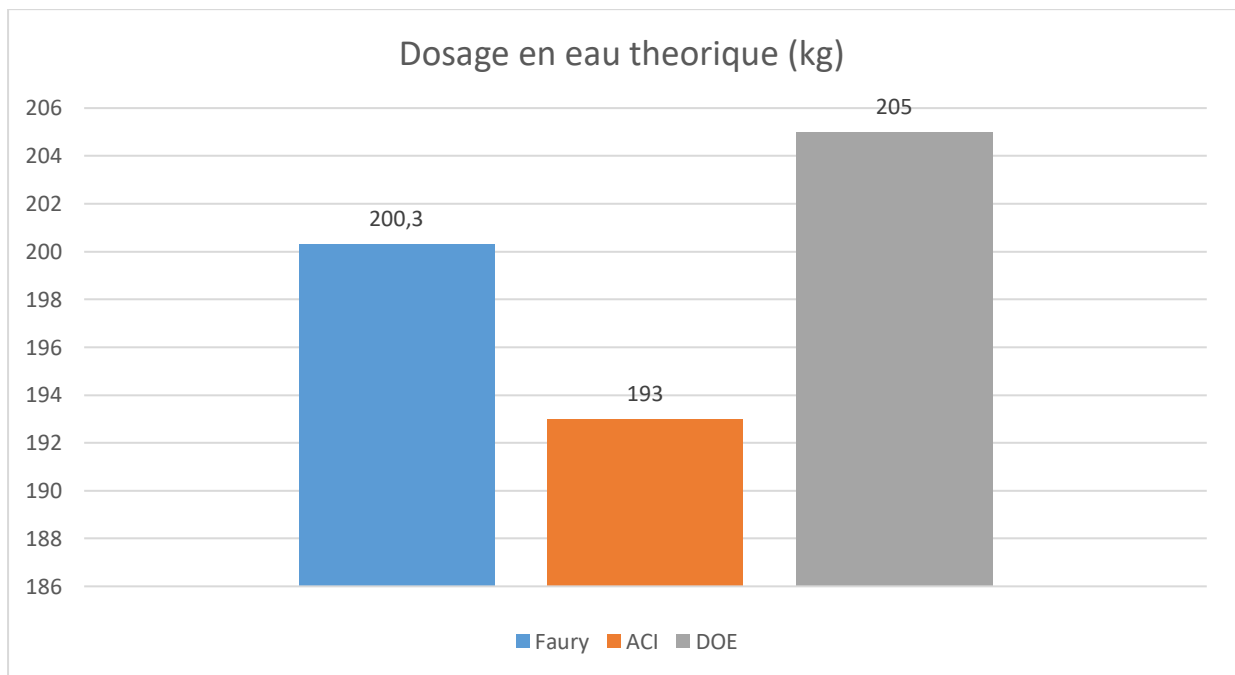
#### III.4.1. Dosage en divers constituants

Nous allons présenter les différents dosages des constituants du béton pour chaque méthode.

##### III.4.1.1 Dosage en eau

La Figure III-5 : *Dosage théorique en eau des différentes méthodes de formulation du béton* présente le dosage en eau théorique.

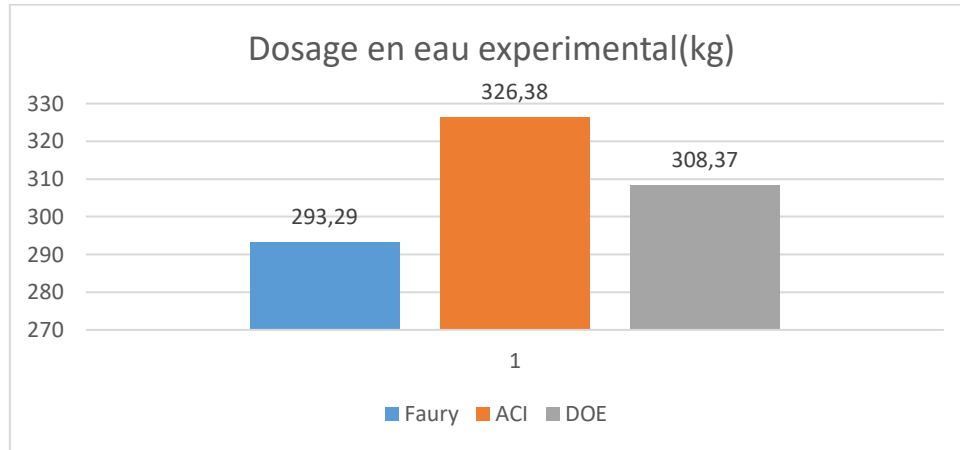
- Dosage en eau théorique



**Figure III-5 : Dosage théorique en eau des différentes méthodes de formulation du béton**

Nous constatons que la méthode DOE présente une quantité d'eau élevée, suivie de la méthode de Faury et enfin de la méthode ACI.

- **Dosage en eau expérimental**

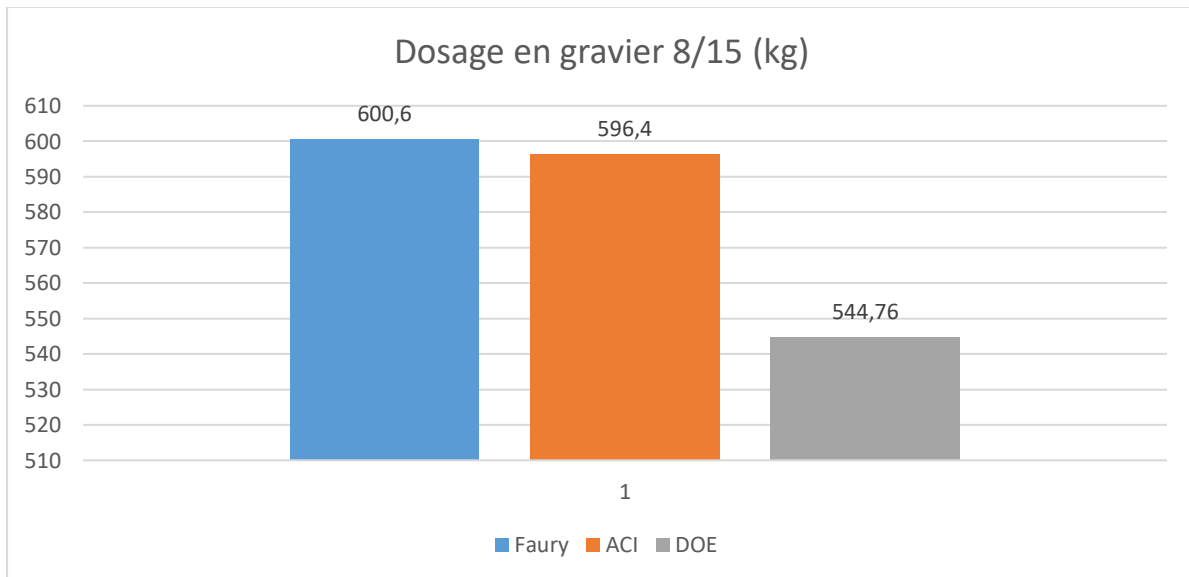


**Figure III-6 : Dosage expérimental en eau des différentes méthodes de formulation du béton**

Nous remarquons qu'expérimentalement la méthode ACI a une quantité élevée d'eau, suivie de la méthode DOE et ensuite Faury

#### III.4.1.2 Dosage en gravier

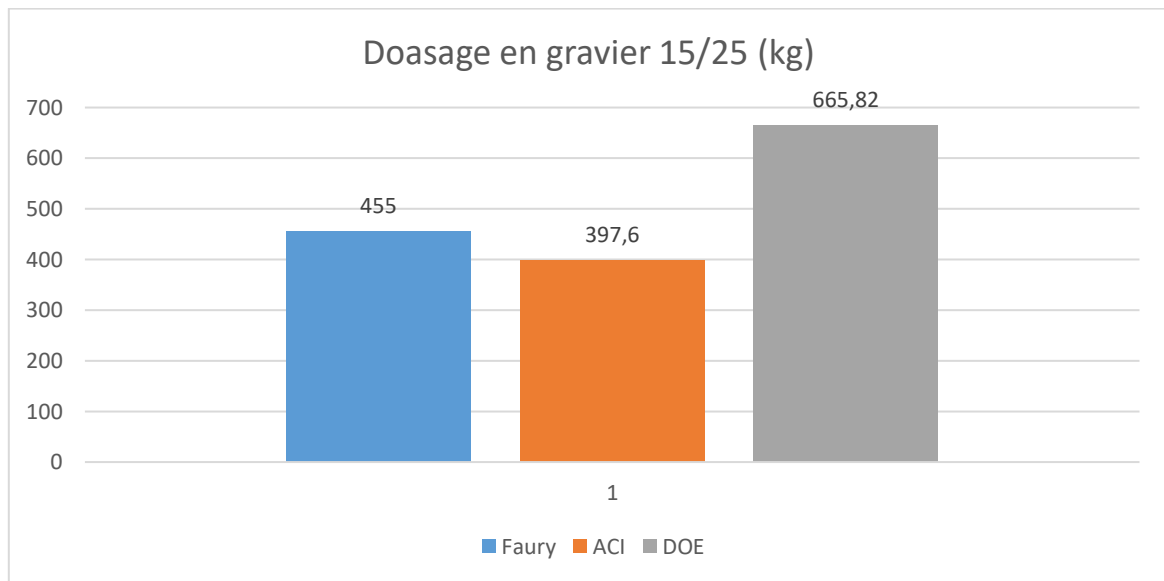
- **Gravier 8/15**



**Figure III-7 : Dosage des graviers 8/15 en kg/m<sup>3</sup> pour chaque méthode de formulation du béton**

Nous remarquons que la méthode de Faury a une quantité élevée de graviers 8/15 suivi de la méthode ACI et suit enfin la méthode DOE

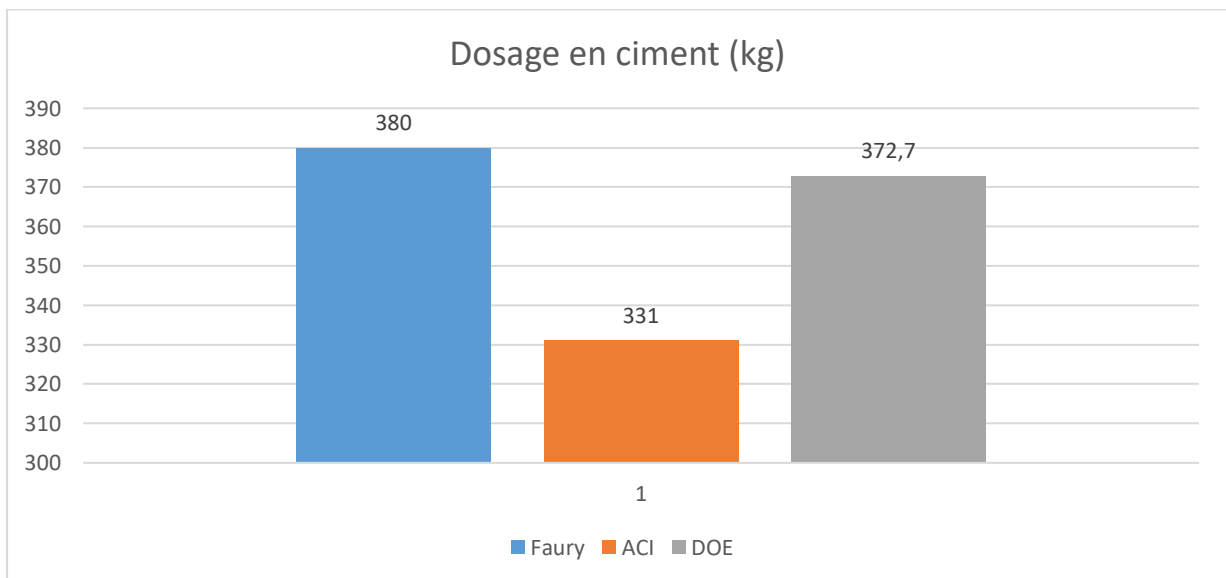
- Gravier 15/25



**Figure III-8 : Dosage des graviers 15/25 en  $\text{kg/m}^3$  pour chaque méthode de formulation du béton**

Nous remarquons que la méthode DOE a une quantité élevée de gravier 15/25 suivi pour la méthode de Faury et enfin celle d'ACI

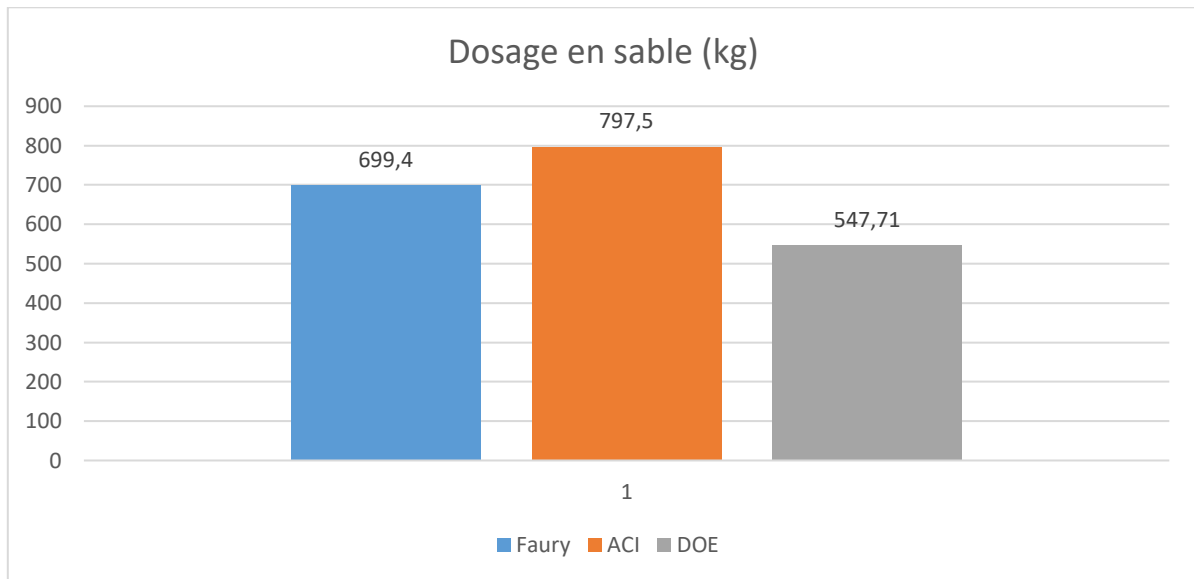
#### III.4.1.3 Dosage en Ciment



**Figure III-9 : Dosage en ciment pour chaque méthode de formulation du béton**

Nous remarquons que la méthode de Faury nous donne une quantité élevée de ciment suivie par la méthode DOE et vient ensuite la méthode ACI qui a une quantité inférieure en ciment

#### III.4.1.4 Dosage en Sable

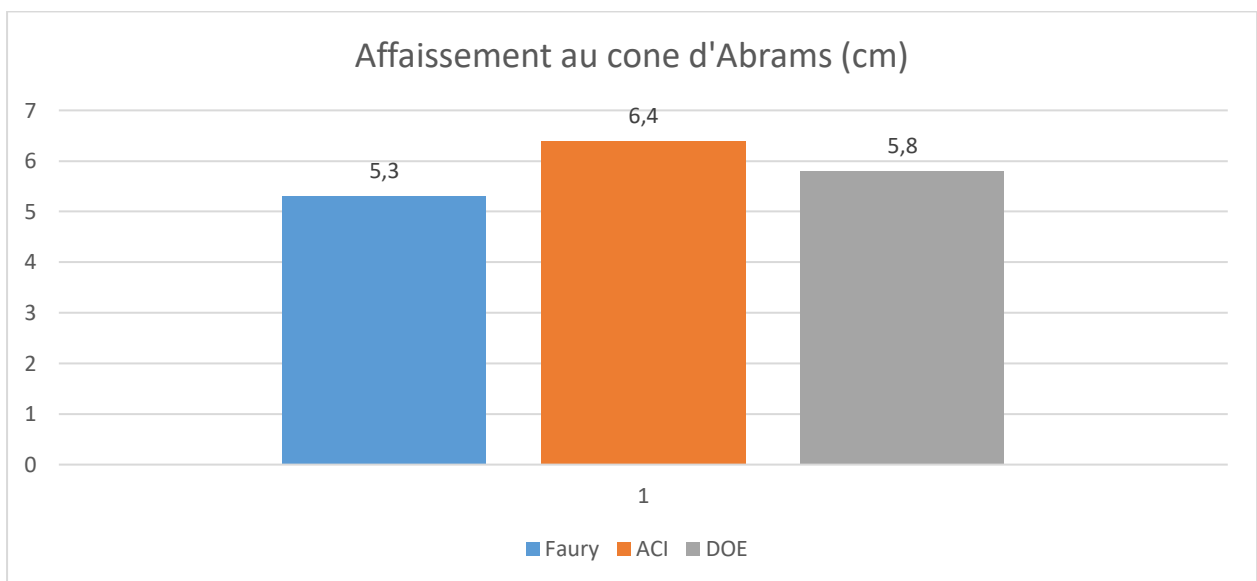


**Figure III-10 : Dosage en ciment pour chaque méthode de formulation du béton**

Nous remarquons que la méthode ACI présente une quantité élevée de sable comparativement à d'autres méthodes de formulation de béton.

#### III.4.2. Ouvrabilité du béton

Dans cette section, nous allons présenter les différentes valeurs d'affaissement en cm obtenu au cône d'Abrams pour les différents bétons confectionnés.

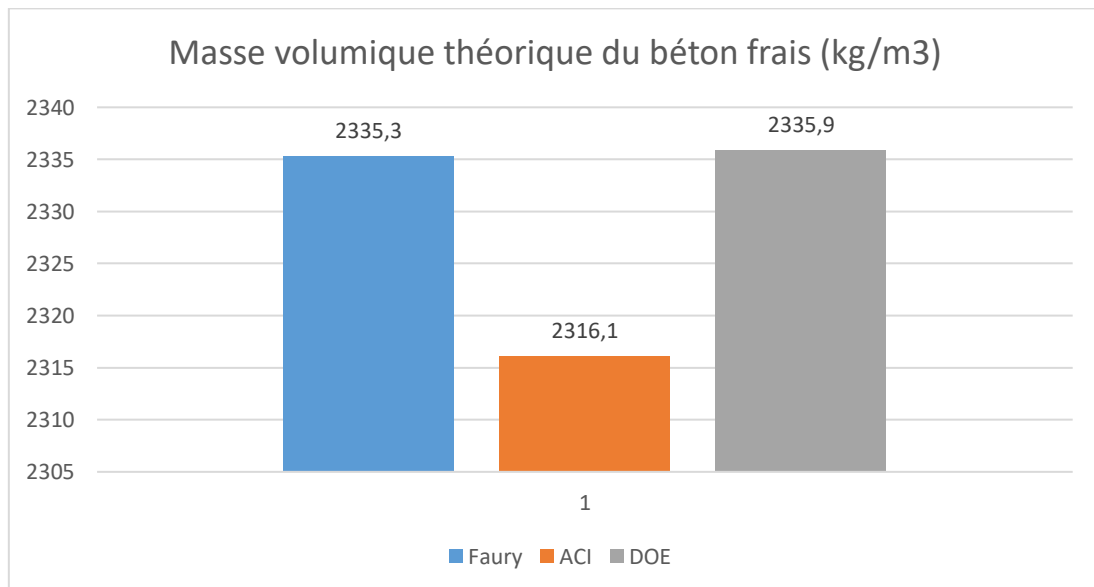


**Figure III-11 : Affaissement au cône d'Abrams**

Les résultats obtenus à l'essai au cône d'Abrams montrent que les trois formulations présentent une ouvrabilité moyenne, adaptée aux bétons courants. La méthode ACI donne l'affaissement le plus élevé (6,4 cm), traduisant un béton plus fluide et donc plus facile à mettre en œuvre. La méthode DOE (5,8 cm) offre une ouvrabilité intermédiaire, tandis que la méthode Faury (5,3 cm) fournit le béton le plus ferme des trois. Toutefois, cette valeur reste dans l'intervalle des bétons plastiques ( $5 \text{ à } 9 \pm 2 \text{ cm}$ ) [1], convenables pour la réalisation des Semelles coffrée, mur de soutènement, plancher, dalles, poteaux, voile.

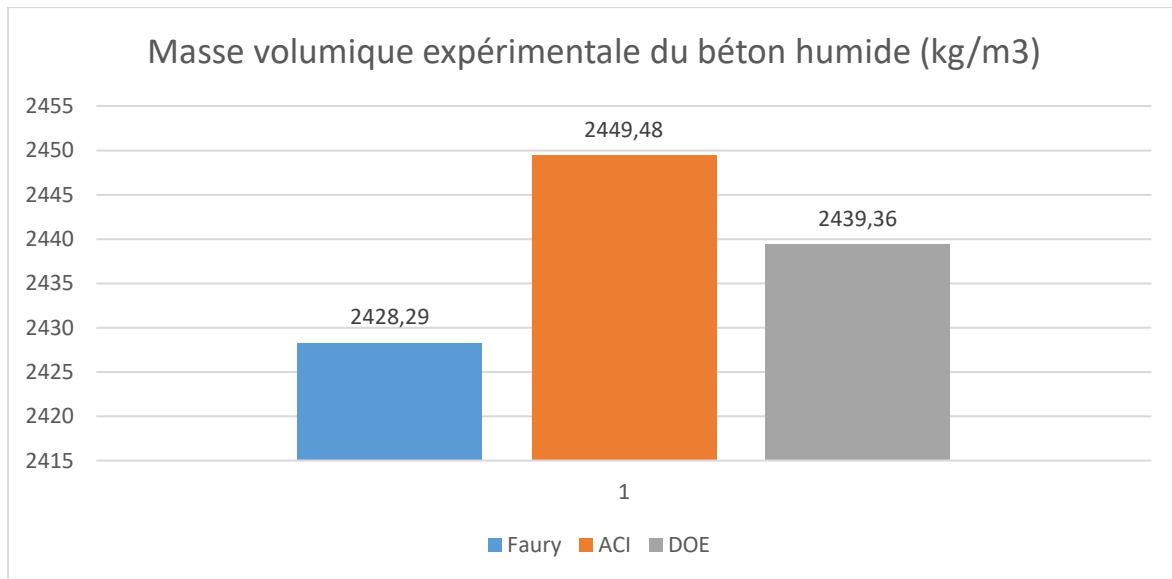
### III.4.3. Masse volumique du béton

Nous allons présenter les valeurs moyennes de masses volumiques du béton obtenues pour chaque méthode de formulation



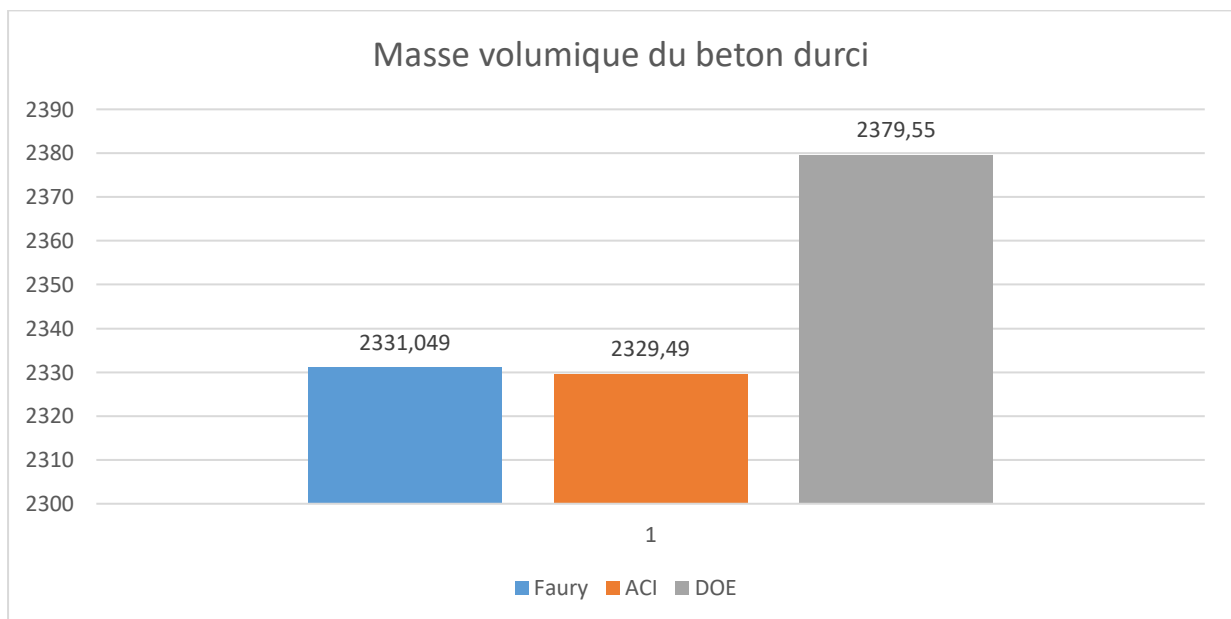
*Figure III-12 : Masse volumique théorique du béton frais*

Il ressort que la méthode DOE conduit à la masse volumique la plus élevée, suivie de la méthode de Faury, tandis que la méthode ACI présente la masse volumique la plus faible. Cette différence s'explique par le fait que la méthode DOE favorise une meilleure compacité du squelette granulaire, ce qui réduit les vides et augmente la densité du béton. La méthode de Faury, basée sur une approche granulaire théorique, permet également une bonne compacité mais reste légèrement moins optimisée dans ce cas. En revanche, la méthode ACI, qui privilégie davantage l'ouvrabilité et le rapport eau/ciment, peut conduire à une proportion de pâte plus élevée et à une compacité légèrement réduite, d'où une masse volumique plus faible.



**Figure III-13 : Masse volumique expérimentale du béton humide (kg/m<sup>3</sup>)**

Nous remarquons que la masse volumique expérimentale du béton humide de la méthode ACI est élevée par rapport à la masse volumique d'autres méthodes.



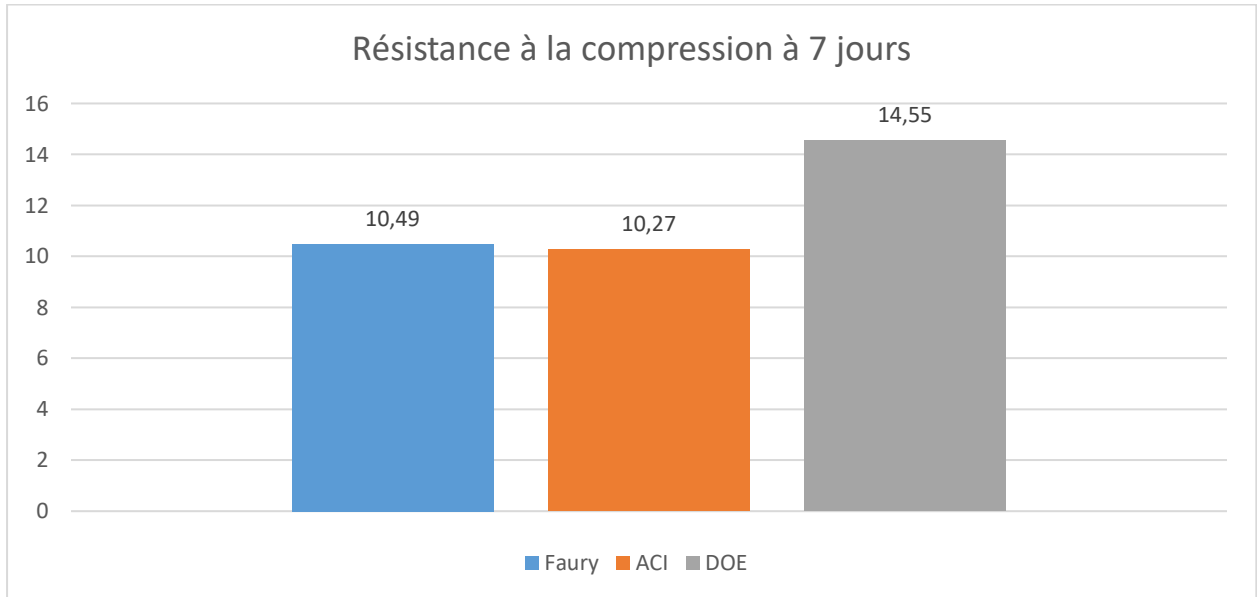
**Figure III-14 : Masse volumique du béton durci (kg/m<sup>3</sup>)**

Nous constatons que la méthode DOE présente une masse volumique élevée comparativement aux deux autres méthodes qui sont aussi des bétons lourds.

### III.4.4. Résistance à la compression

Dans cette partie, il sera question d'analyser les résistances à la compression obtenues pour les trois méthodes de formulation du béton, la comparaison des performances en termes de valeur, afin de mieux apprécier les écarts relatifs entre les différentes formulations et d'identifier la méthode offrant les meilleures caractéristiques mécaniques.

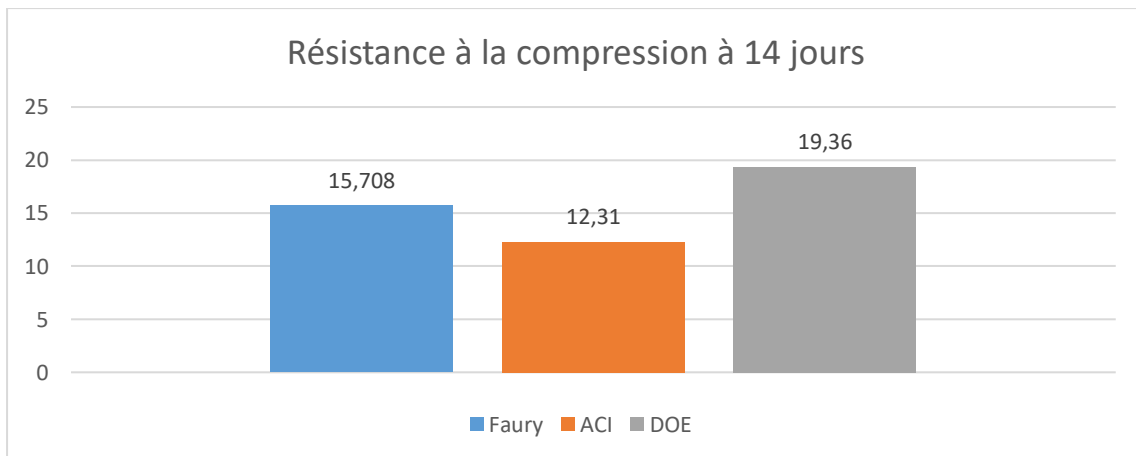
#### III.4.4.1 Résistance à la compression a 7 jours



**Figure III-15: Moyenne de la Resistance a la compression à 7 jours**

La Figure III-15 nous montre que la méthode DOE présente une résistance à la compression élevée, suivie de la méthode de Faury et enfin la méthode ACI.

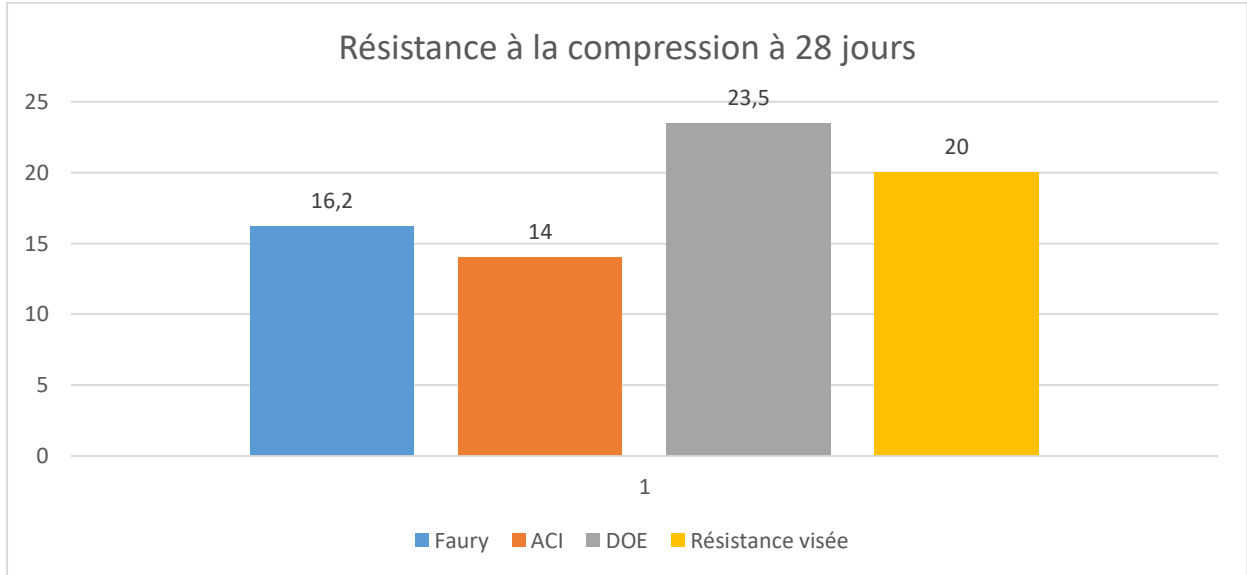
#### III.4.4.2 Résistance à la compression à 14 jours



**Figure III-16 : Moyenne de la Resistance à la compression à 14 jours**

La Figure III-16 nous montre que la méthode DOE présente une résistance à la compression élevée, suivie de la méthode de Faury et enfin la méthode ACI.

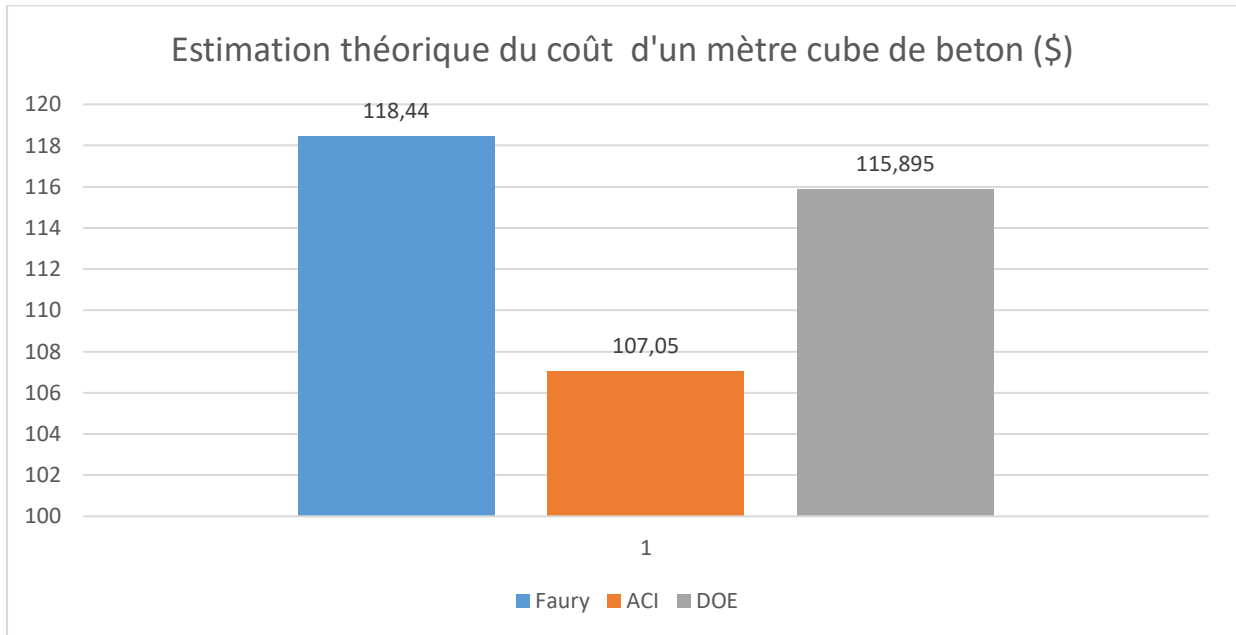
#### III.4.4.3 Résistance à la compression à 28 jours



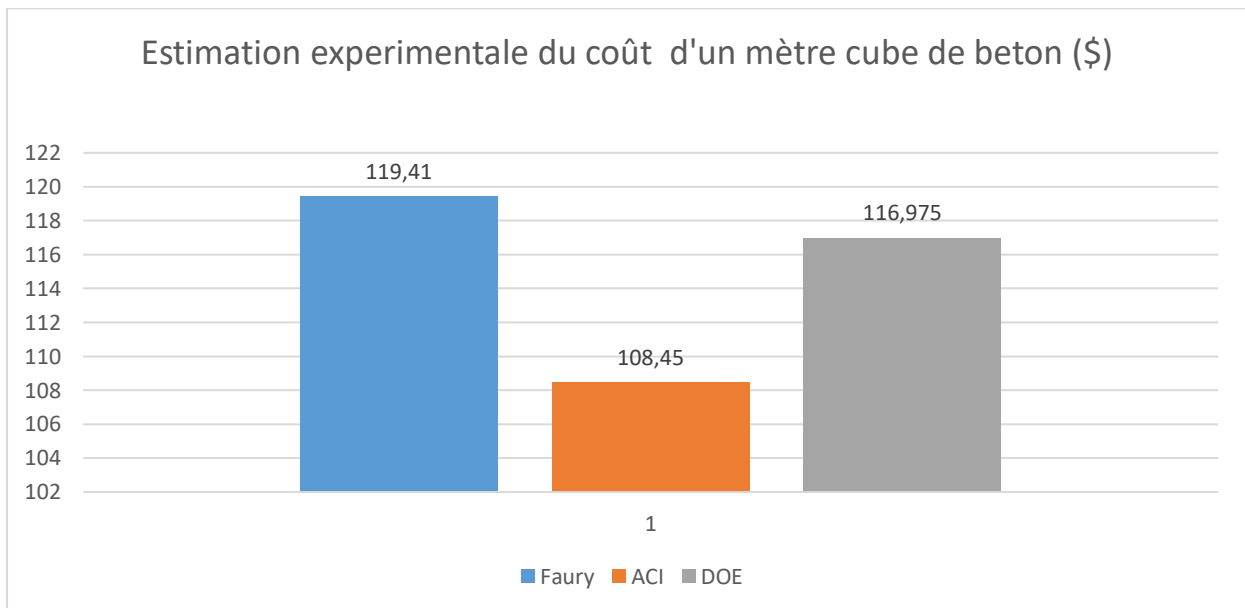
**Figure III-17 : Moyenne de la Résistance a la compression à 28 jours**

La Figure III-17 : *Moyenne de la Résistance a la compression à 28 jours* nous montre que la méthode DOE présente une résistance à la compression élevée, suivie de la méthode de Faury et enfin la méthode ACI.

### III.4.5. Analyse du cout



**Figure III-18 : cout théorique d'un mètre cube de béton**



**Figure III-19 : cout expérimental d'un mètre cube de béton**

Les figures Figure **III-18**Figure III-19 et 25 indiquent que la méthode ACI a un cout moins élevé du béton suivi de la méthode DOE puis la méthode de Faury

### III.5 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a été consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus à partir des méthodes de formulation du béton étudiées, en confrontant les données théoriques issues de la revue bibliographique aux résultats expérimentaux du laboratoire. Il a permis d'évaluer les performances des bétons selon différents paramètres et d'apprécier la pertinence de chaque méthode.

## CONCLUSION GENERALE

Le présent travail avait pour objectif de comparer trois méthodes de formulation du béton, à savoir les méthodes de Faury, ACI et DOE, afin d'identifier celle permettant d'obtenir un béton à la fois performant sur le plan mécanique et économiquement avantageux dans le contexte local de la ville de Goma. La performance recherchée était une résistance à la compression de 20 MPa à 28 jours avec un béton plastique d'affaissement  $7 \pm 2$  cm au cône d'Abrams.

Pour atteindre cet objectif, une étude expérimentale a été réalisée à partir de matériaux locaux préalablement caractérisés en laboratoire. Les bétons ont été formulés selon les trois méthodes retenues, puis soumis à des essais de résistance à la compression à 28 jours.

Les résultats obtenus ont mis en évidence des différences significatives entre les méthodes étudiées. La méthode DOE a présenté la meilleure performance mécanique avec une résistance moyenne de 23,51 MPa, dépassant ainsi la valeur cible fixée. Elle est suivie par la méthode de Faury avec une résistance de 16,27 MPa, tandis que la méthode ACI a donné la plus faible résistance avec 14 MPa, restant en dessous des exigences fixées.

Concernant l'ouvrabilité, les trois bétons présentent des affaissements respectifs de 5,3 cm (Faury), 6,4 cm (ACI) et 5,8 cm (DOE), des valeurs globalement acceptables et comprises dans la plage de tolérance fixée, bien que la méthode ACI offre le béton le plus fluide.

Sur le plan économique, l'analyse des coûts a révélé que la méthode ACI est la plus économique avec un coût de 108,45 \$/m<sup>3</sup>, suivie de la méthode DOE avec 116,98 \$/m<sup>3</sup>, puis de la méthode de Faury avec 119,41 \$/m<sup>3</sup>. Toutefois, bien que la méthode ACI présente un avantage économique, ses performances mécaniques insuffisantes limitent son utilisation dans des conditions nécessitant une résistance élevée.

Au regard de ces résultats, la méthode DOE apparaît comme le meilleur compromis entre performance mécanique et efficacité économique. Elle permet non seulement d'atteindre et de dépasser la résistance visée, mais également de maintenir un coût relativement maîtrisé. Elle constitue ainsi une solution pertinente et adaptée aux réalités locales, où l'optimisation des ressources est essentielle.

Néanmoins, cette étude présente certaines limites, notamment liées à l'utilisation de quelques méthodes de formulations du béton et quelques matériaux locaux. Ainsi, des perspectives d'amélioration peuvent être envisagées. Il serait pertinent d'intégrer l'utilisation d'adjuvants afin d'optimiser davantage les performances mécaniques du béton. De plus, l'étude pourrait être élargie à d'autres méthodes de formulation afin d'enrichir la comparaison et d'identifier

des approches encore plus performantes. Enfin, une analyse complémentaire consistant à uniformiser la quantité de ciment pour toutes les méthodes permettrait de mieux apprécier leur comportement intrinsèque et leur efficacité réelle indépendamment de ce paramètre.

En définitive, ce travail met en évidence l'importance du choix de la méthode de formulation dans l'obtention d'un béton performant et économiquement viable, et confirme que, dans les conditions de cette étude, la méthode DOE représente l'option la plus avantageuse.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. i. A. ALINABIWE, Support du cours de physique et technologie du béton, 2021.
- [2] D. N. Ghania, Technologie du béton, 2020.
- [3] D. &. FESTA, Nouveau guide du béton et des ses constituants, Eyrolle, 1998.
- [4] F. NGAPGUE, Physique et technologie du béton, Goma: ULPGL, 2015-2016.
- [5] M. W. M. Abdias, “Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma,” Goma, 2017.
- [6] K. B. Victoire, Etude comparative des propriétés du béton formulé par la méthode ACI et la méthode de Dreux-Gorisse : Application au béton ordinaire, Goma: ULPGL GOMA, 2025.
- [7] R. college, concrete Mix Design- DOE method, 2020.
- [8] M. M. M. GRACE, “LABORATOIRE DES MATERIAUX,” GOMA, 2023.
- [9] C. E. d. Normalisation, NF EN 932-1 (1996) Granulats- Methode echantillonnage, 1996.
- [10] B. B. Emmanuel, “ETUDE COMPARATIVE DE DIFFERENTES METHODES DE FORMULATION DU BETON,” ULPGL, Goma, 2022.
- [11] G. Dreux, “Composition des bétons”.
- [12] FAURY.J, “Le béton. influence de ses constituants inertes. règles à adopter pour sa meilleure composition.,” Dunod (1958), 1958.
- [13] p. G. Fouad, Cours de Matériaux de Construction, UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID, 2015.
- [14] HAMMACHA.Abdel, “Etude comparative theoriques et experimentales des differentes methodes de composition du beton,” Algerie, 2001.
- [15] B. D. Zed, “L’effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton,” ALGER, 2017.
- [16] “American Concrete Institute, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-91 (Reapproved 2009),” Farmington Hills, USA, 2009.

- [17] D. I. H. Daniel, "COURS DE TECHNOLOGIE DU BETON," UNIVERSITE DU BURUNDI, BUJUMBURA, 2023.
- [18] PCA, " Design and Control of Concretes Mixtures," 2003.
- [19] "Department of the Environment, Design of Normal Concrete Mixes, Building Research Establishment," LONDON (UK), 1997.
- [20] "Design of normal concrete p.9".
- [21] "Design of normal concrete mixes Second edition," Construction Research, 1998, 1998.

## ANNEXES

### ANNEXE 1 : ESSAI SUR LES GRANULATS

#### 0. Composition granulométrique du sable roulé du Rwanda

| TAMIS | REFUS | REFUS CUMULEE | % REFUS CUMULEE | % TAMISAT   | TAMI INT |
|-------|-------|---------------|-----------------|-------------|----------|
| 5     | 0,045 | 0,045         | 1,5             | 98,5        | 4,75     |
| 4     | 0,06  | 0,105         | 3,5             | 96,5        |          |
| 3,15  | 0,075 | 0,18          | 6               | 94          | 2,8      |
| 2,5   | 0,11  | 0,29          | 9,666666667     | 90,33333333 |          |
| 2     | 0,13  | 0,42          | 14              | 86          |          |
| 1,6   | 0,165 | 0,585         | 19,5            | 80,5        | 1,4      |
| 1,25  | 0,215 | 0,8           | 26,66666667     | 73,33333333 |          |
| 1     | 0,25  | 1,05          | 35              | 65          |          |
| 0,8   | 0,183 | 1,233         | 41,1            | 58,9        |          |
| 0,63  | 0,05  | 1,283         | 42,76666667     | 57,23333333 | 0,6      |
| 0,5   | 0,25  | 1,533         | 51,1            | 48,9        |          |
| 0,4   | 0,31  | 1,843         | 61,43333333     | 38,56666667 |          |
| 0,315 | 0,34  | 2,183         | 72,76666667     | 27,23333333 | 0,3      |
| 0,25  | 0,28  | 2,463         | 82,1            | 17,9        |          |
| 0,2   | 0,21  | 2,673         | 89,1            | 10,9        |          |
| 0,16  | 0,135 | 2,808         | 93,6            | 6,4         | 0,15     |
| 0,125 | 0,085 | 2,893         | 96,43333333     | 3,566666667 |          |
| 0,1   | 0,045 | 2,938         | 97,93333333     | 2,066666667 |          |
| 0,08  | 0,02  | 2,958         | 98,6            | 1,4         | 0,075    |

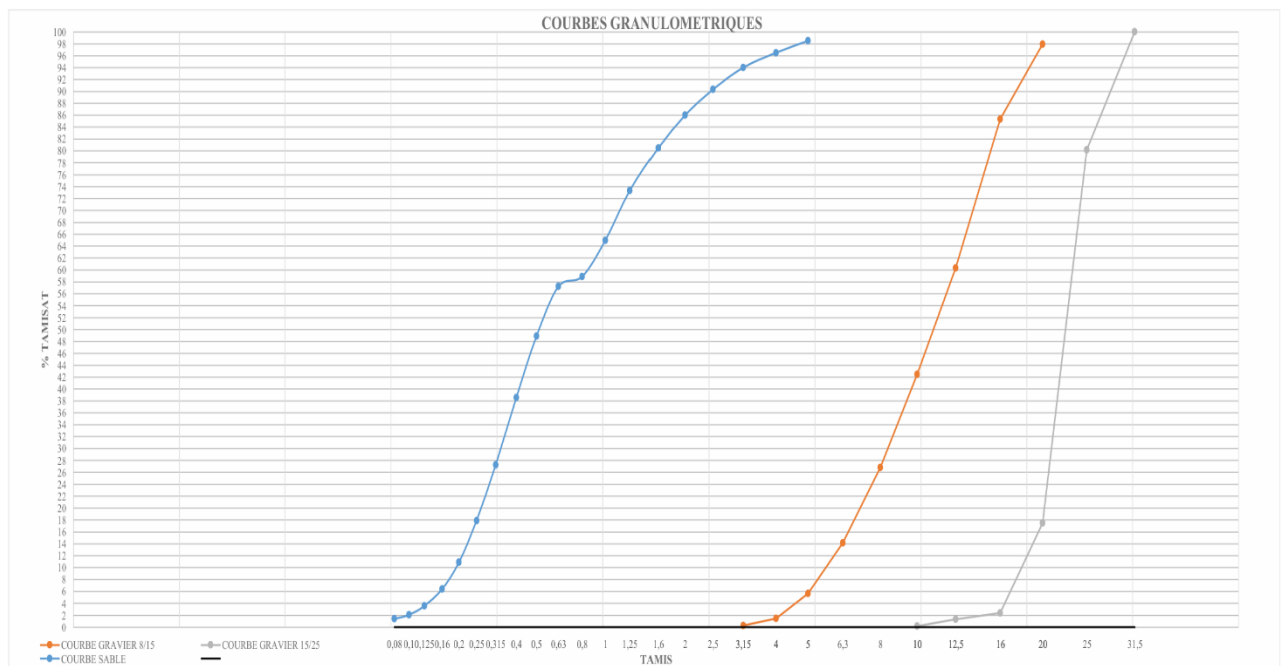
#### 1. Compositions granulométriques du gravier concassé 15/25

| TAMIS | REFUS | REFUS CUMULE | % REFUS CUMULE | % TAMISAT   |
|-------|-------|--------------|----------------|-------------|
| 31,5  | 0     | 0            | 0              | 100         |
| 25    | 0,595 | 0,595        | 19,83333333    | 80,16666667 |
| 20    | 1,88  | 2,475        | 82,5           | 17,5        |
| 16    | 0,454 | 2,929        | 97,63333333    | 2,366666667 |
| 12,5  | 0,032 | 2,961        | 98,7           | 1,3         |
| 10    | 0,034 | 2,995        | 99,83333333    | 0,166666667 |

## 2. Compositions granulométriques du gravier concassé 8/15

| TAMIS | REFUS | REFUS CUMULEE | % REFUS CUMULEE | % TAMISAT   |
|-------|-------|---------------|-----------------|-------------|
| 20    | 0,062 | 0,062         | 2,066666667     | 97,93333333 |
| 16    | 0,377 | 0,439         | 14,63333333     | 85,36666667 |
| 12,5  | 0,751 | 1,19          | 39,66666667     | 60,33333333 |
| 10    | 0,537 | 1,727         | 57,56666667     | 42,43333333 |
| 8     | 0,469 | 2,196         | 73,2            | 26,8        |
| 6,3   | 0,38  | 2,576         | 85,86666667     | 14,13333333 |
| 5     | 0,254 | 2,83          | 94,33333333     | 5,666666667 |
| 4     | 0,126 | 2,956         | 98,53333333     | 1,466666667 |
| 3,15  | 0,036 | 2,992         | 99,73333333     | 0,266666667 |

## 3. Courbe granulométrique



## 4. Masse volumique absolue du sable roulé

| N° | designation                       | I   | II  | III |
|----|-----------------------------------|-----|-----|-----|
| 1  | Masse échantillon avant essai (g) | 300 | 300 | 300 |
| 2  | Volume d'eau initial (cm³)        | 380 | 420 | 460 |
| 3  | Volume final (cm³)                | 480 | 495 | 500 |
| 4  | Masse spécifique (g/cm³)          | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| 5  | Moyenne (g/cm³)                   | 2,5 |     |     |

**5. Masse volumique absolue du gravier concassé 15/25**

| N <sup>o</sup> | designation                             | I    | II   | III  |
|----------------|-----------------------------------------|------|------|------|
| 1              | Masse échantillon avant essai (g)       | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2              | volume d'eau initial (cm <sup>3</sup> ) | 1200 | 1200 | 1200 |
| 3              | Volume final (cm <sup>3</sup> )         | 385  | 392  | 384  |
| 4              | Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,6  | 2,55 | 2,61 |
| 5              | Moyenne (g/cm <sup>3</sup> )            | 2,6  |      |      |

**6. Masse volumique absolue du gravier concasse 8/15**

| N <sup>o</sup> | designation                             | I    | II   | III  |
|----------------|-----------------------------------------|------|------|------|
| 1              | Masse échantillon avant essai (g)       | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2              | volume d'eau initial (cm <sup>3</sup> ) | 1250 | 1230 | 1220 |
| 3              | Volume final (cm <sup>3</sup> )         | 386  | 391  | 382  |
| 4              | Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,59 | 2,56 | 2,65 |
| 5              | Moyenne (g/cm <sup>3</sup> )            | 2,6  |      |      |

**7. Masse volumique apparente du sable roulé**

| N <sup>o</sup> | designation                           | I      | II     | III    |
|----------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| 1              | Masse échantillon avant essai (g)     | 288,12 | 283,07 | 278,84 |
| 2              | volume (cm <sup>3</sup> )             | 209,4  | 209,4  | 209,4  |
| 3              | Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,37   | 1,35   | 1,34   |
| 4              | Moyenne (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,35   |        |        |

**8. Masse volumique apparente du gravier concasse 8/15**

| N <sup>o</sup> | designation                           | I     | II    | III   |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|
| 1              | Masse échantillon avant essai (g)     | 293,2 | 292,4 | 292,1 |
| 2              | volume (cm <sup>3</sup> )             | 209,4 | 209,4 | 209,4 |
| 3              | Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,402 | 1,398 | 1,397 |
| 4              | Moyenne (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,399 |       |       |

## 9. Equivalent sable

| Échantillon | h1 (cm) | h2 (cm) | ES (%) Essai à Vue | ES (%) Essai au piston |
|-------------|---------|---------|--------------------|------------------------|
| N.01        | 9,9     | 11,2    | 84,63              | 80                     |
| N.02        | 9,75    | 10,8    | 84,63              | 80                     |
| Moyenne     | -       | -       | 84,63              | 80                     |

## ANNEXE 2 : FORMULATION DU BETON

### A. METHODE DE FAURY

$$D = d_{n-1} \left(1 + \frac{X}{2Y}\right)$$

Où

$d_{n-1}$  : Avant dernier tamis =25

X : Refus sur l'avant dernier tamis =19,8

Y : Pourcentage des tamisât de  $d_{n-1}$  mais qui reste sur

$$\frac{dn-1}{2} = 100-19,83-1,3= 78,87\%$$

$$D_{max} = 25. \left(1 + \frac{19,8}{2.78,87}\right)$$

**Dmax= 28**

Pour notre cas, nous allons déterminer les points qui vont nous aider à tracer la courbe optimale

$$A = \begin{cases} x = 0,005 \\ Y = 0 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} x = \frac{D}{2} \\ Y = A + 17.8\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75} \end{cases}$$

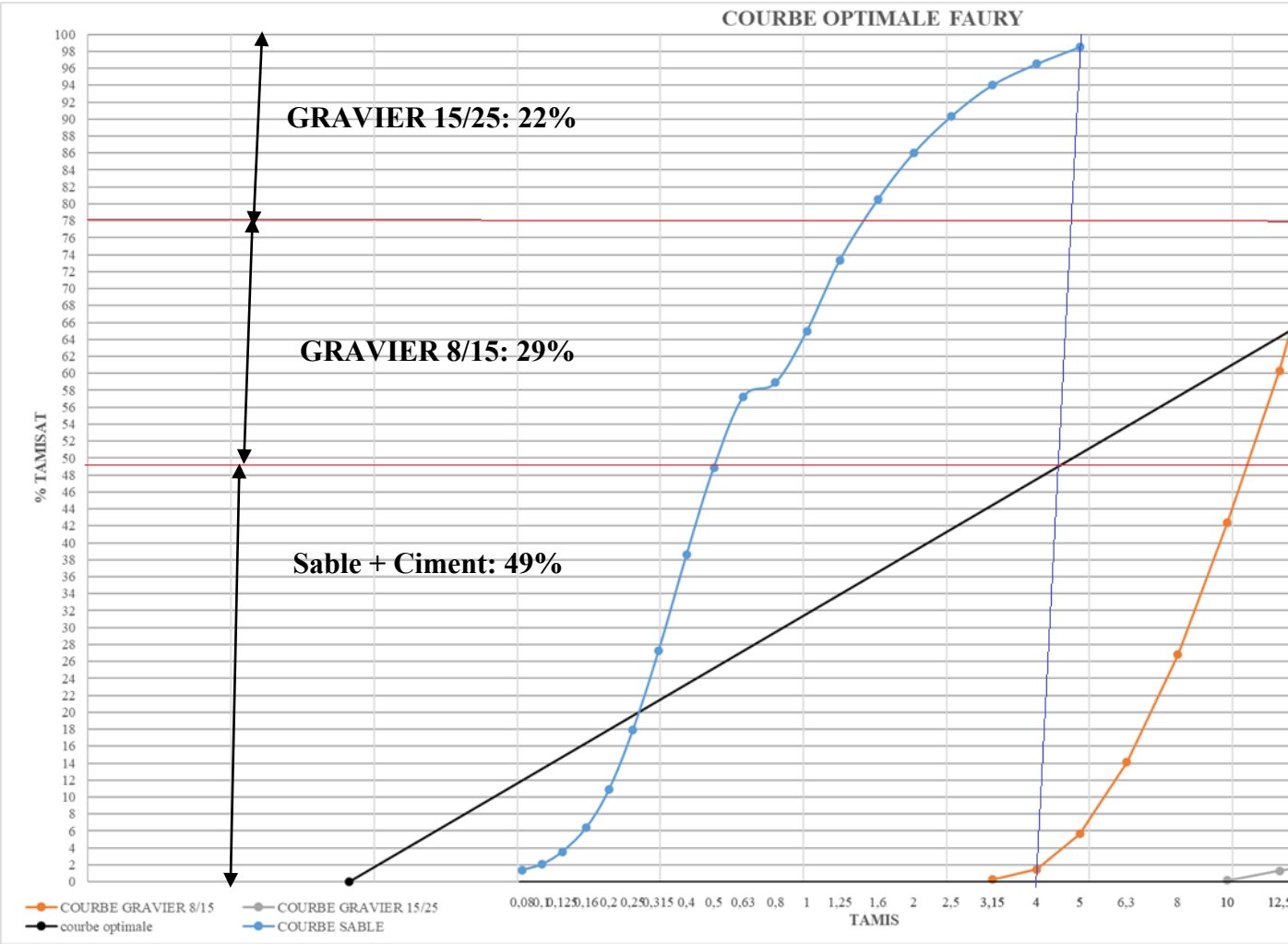
Pour trouver Y, il y a une condition, puisque l'utilisation de béton est généralement limitée sur les constructions bâtiment donc nous avons une formule pratique pour déterminer la valeur de Y

$$Y = A + 17,8\sqrt[5]{D_{max}} + 3,5$$

$$C = \begin{cases} x = D \\ Y = 100\% \end{cases}$$

Valeur de A = 28

$$Y = 28 + 17,8\sqrt[5]{28} + 3,5 = 66,16$$



- **Détermination de la quantité d'eau selon Faury**

$$E = \frac{0.39}{\sqrt[5]{D_{max}}} \times 1000$$

Ainsi la valeur de E sera égale à :

$$E = \frac{0.39}{\sqrt[5]{28}} \times 1000 = \mathbf{200,3}$$

$$E = \mathbf{200,3 \text{ l}}$$

- **Détermination de volumes des éléments secs**

Dans 1 m<sup>3</sup> de béton, on a un volume absolu total de constituants solides égal à 1-E, nous trouvons donc les différents volumes aux équations (II-15) et (II-16) [13] .

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} = 1 - E$$

$$\text{D'où : } V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} = 1000 - 200,3$$

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} = \mathbf{799,7 \text{ l}}$$

Pour le dosage en ciment nous prenons **380 kg/m<sup>3</sup>**

$$V_{\text{ciment}} = \frac{\text{Quantité du ciment}}{\text{Masse volumique absolue du ciment}} \quad (\text{III-1})$$

$$V_{\text{ciment}} = \frac{380 \text{ kg}}{3100 \text{ kg/m}^3} = \mathbf{0,122 \text{ m}^3}$$

Le pourcentage du ciment dans le 799,7 l d'éléments secs équivaut à :

$$C\% = \frac{122}{799,7} \times 100 = \mathbf{15,25\%}$$

Alors que dans le graphique le pourcentage C+S = **49%**

Ce qui veut donc dire que la quantité du sable est de 49% - 15,25%

$$S\% = \mathbf{33,75\%}$$

Pour les graviers 8/15 et 15/25 on a respectivement **29% et 22%**

| Matériaux | % dans 1 m <sup>3</sup> de béton |
|-----------|----------------------------------|
|-----------|----------------------------------|

|                       |                |
|-----------------------|----------------|
| <b>SABLE</b>          | <b>33,75 %</b> |
| <b>CIMENT</b>         | <b>15,25%</b>  |
| <b>GRAVIERS 8/15</b>  | <b>29%</b>     |
| <b>GRAVIERS 15/25</b> | <b>22%</b>     |

Nous allons à présent déterminer les quantités selon leurs volumes et poids dans 1 m<sup>3</sup> du béton et après nous déterminerons la quantité qu'il faut pour nos 9 éprouvettes selon la méthode de Faury

| Matériaux     | Poids (kg) pour 1 m <sup>3</sup> | Volume (m <sup>3</sup> ) pour 1 m <sup>3</sup> |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| CIMENT        | 380                              | 0,122                                          |
| SABLE         | 699,4                            | 0,269                                          |
| GRAVIER 8/15  | 600,6                            | 0,231                                          |
| GRAVIER 15/25 | 455                              | 0,175                                          |
| EAU           | 200,3                            | 0,200                                          |

Nous avons une éprouvette cylindrique de dimension diamètre = 16 et hauteur 32 cm ce qui nous fait un volume de **0,00643 m<sup>3</sup>**

Pour 9 éprouvettes nous aurons un volume de **0,0578 m<sup>3</sup>**

#### DOSAGE POUR LA METHODE DE FAURY

| Matériaux     | Quantité en kg pour 0,0578 m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------------|
| CIMENT        | 21,9                                      |
| SABLE         | 40,481                                    |
| GRAVIER 8/15  | 34,762                                    |
| GRAVIER 15/25 | 26,3                                      |
| EAU           | 11,593                                    |

**B. LA METHODE ACI**

- **Choix de l'affaissement**

Alors compte tenu du tableau présenté dans le chap. 2, nous avons fait le choix de l'affaissement de 75 mm ou un affaissement de  $70 \pm 20$  mm pour un béton plastique

Affaissement =  $70 \pm 20$  mm

- **Choix du diamètre maximal (Dmax) des gros granulats**

Nous avons fait le choix de notre D max qui est de 25 mm

Dmax = 25 mm

- **Resistance moyenne à la compression visée a 28 jours**

La résistance moyenne à la compression a 28 jours

$F_c = 20 + 7 = 27$  Mpa

FM = 27 Mpa

- **Estimation de l'eau de gâchage**

Compte tenu du tableau présenté dans le chap.2 nous avons trouvé une valeur de 193 litres pour un béton sans air entrainé car l'affaissement est dans l'intervalle de 75 -100 mm

EAU = 193 LITRES

- **Choix du rapport eau/ciment (E/C)**

Interpolation :  $\frac{30-27}{30-25} = \frac{0,54-x}{0,54-0,61} = 0,582$

$$\frac{E}{C} = 0,582$$

- **Calcul du dosage en ciment**

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.

$$\frac{E}{C} = 0,582$$

$$\frac{193}{C} = 0,582$$

$$C = \frac{193}{0,582} = 331,6 \text{ Kg} = 0,106 \text{ m}^3$$

- **Estimation de la teneur en gros granulat**

$$G = 0,71 \times 1400 = 994 \text{ Kg} = 0,382 \text{ m}^3$$

- **Estimation de la teneur en granulat fin**

$$S = 1 \text{ m}^3 - 0,106 \text{ m}^3 - 0,382 \text{ m}^3 - 0,193 \text{ m}^3 = 0,319 \text{ m}^3$$

$$S = 797,5 \text{ kg} = 0,319 \text{ m}^3$$

Nous allons à présent déterminer les quantités selon leurs volumes et poids dans 1 m<sup>3</sup> du béton et après nous déterminerons la quantité qu'il faut pour nos 9 éprouvettes selon la méthode d'ACI

| Matériaux             | Poids (kg) pour 1 m <sup>3</sup> | Volume (m <sup>3</sup> ) pour 1 m <sup>3</sup> |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| CIMENT                | 331,6                            | 0,106                                          |
| SABLE                 | 797,5                            | 0,319                                          |
| GRAVIER 8/15 et 15/25 | 994                              | 0,382                                          |
| EAU                   | 193                              | 0,193                                          |

#### DOSAGE POUR LA METHODE ACI

| Matériaux             | Quantité en kg pour 0,0578 m <sup>3</sup> |
|-----------------------|-------------------------------------------|
| CIMENT                | 19,1                                      |
| SABLE                 | 46,095                                    |
| GRAVIER 8/15 et 15/25 | 57,45                                     |
| EAU                   | 11,15                                     |

### C. LA METHODE DOE

- **Calcul de la résistance caractéristique moyenne**

Ici il revient de trouver la résistance moyenne cible à partir de la Résistance caractéristique spécifiée déterminé à partir de l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

$$F_m = F_c + k.s$$

Avec

$F_m$  = la résistance moyenne cible

$F_c$  = la résistance caractéristique visée sur une éprouvette cubique

$S$  = l'écart type

$K$  = une constante

$$F_m = F_c + 1,64 s$$

On a:

$$F_c = 25 \text{ Mpa}$$

$$S = 8 \text{ Mpa}$$

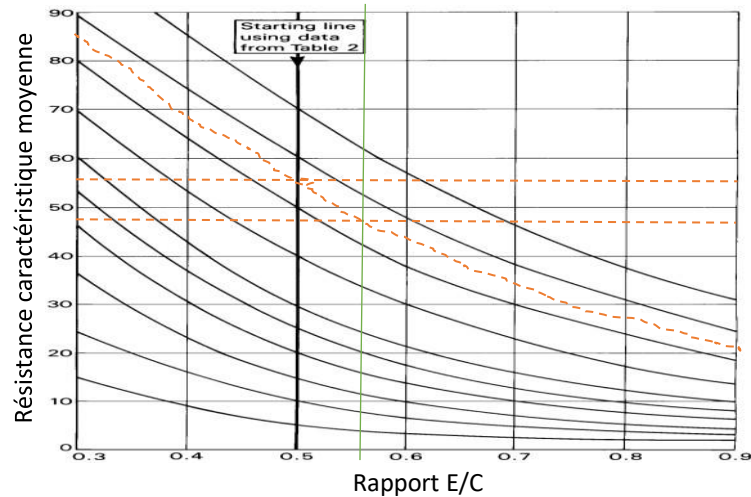
$$k = 1,64$$

$$F_m = 25 + 1,64 \times 8$$

$$F_m = 38,12 \text{ Mpa}$$

- **Détermination du rapport E/C**

Pour ce faire trouvons la résistance en 28 jour pour un rapport E/C=0,5 → nous trouvons 56 N/mm<sup>2</sup> selon le tableau indiqué dans le chap.2



Là nous trouvons un rapport E/C de 0,567

Après la lecture du rapport E/C dans nos différents tableaux, nous remarquons qu'avec la condition de durabilité nous obtenons un rapport E/C de 0,55

$E/C = 0,55$

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

Connaissant que  $E/C=0,55$  et vu que notre  $D_{max}$  n'apparaît pas dans les valeurs mentionnées dans le tableau, nous allons procéder par interpolation de la valeur 20 mm et 40 mm pour trouver l'eau qui correspond pour un gravier ayant un  $D_{max}$  de 25 mm

$$\frac{20 - 25}{20 - 40} = \frac{210 - x}{210 - 190} = 205 \text{ Kg}$$

$E=205 \text{ L}$

- **Détermination de la quantité du ciment**

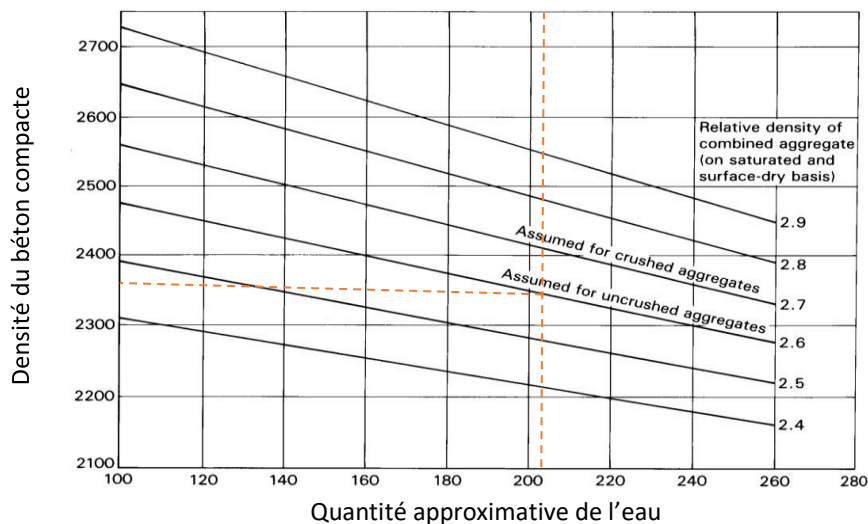
La quantité de ciment peut être calculée à partir de la teneur totale en eau et du rapport E/C, c'est-à-dire l'équation.

$$C = \frac{E}{\frac{E}{C}}$$

$$C = \frac{205}{0,55} = 372,7 \text{ Kg}$$

Nous remarquons que nous nous trouvons dans la plage que stipule la condition de durabilité qui est un dosage minimum de ciment de 325 kg/m<sup>3</sup>

- **Détermination de la Densité du béton**



Après lecture sur la figure, nous trouvons une densité de **2336**

- **Calcul de la quantité total des Granulats**

La quantité totale de granulat G est trouvée à partir de l'équation (II-21).

$$G = \text{Densité du béton} - E - C \quad (\text{III-2})$$

$$G = 2336 - 205 - 372,7$$

G= 1758,3

- Détermination de la quantité du sable

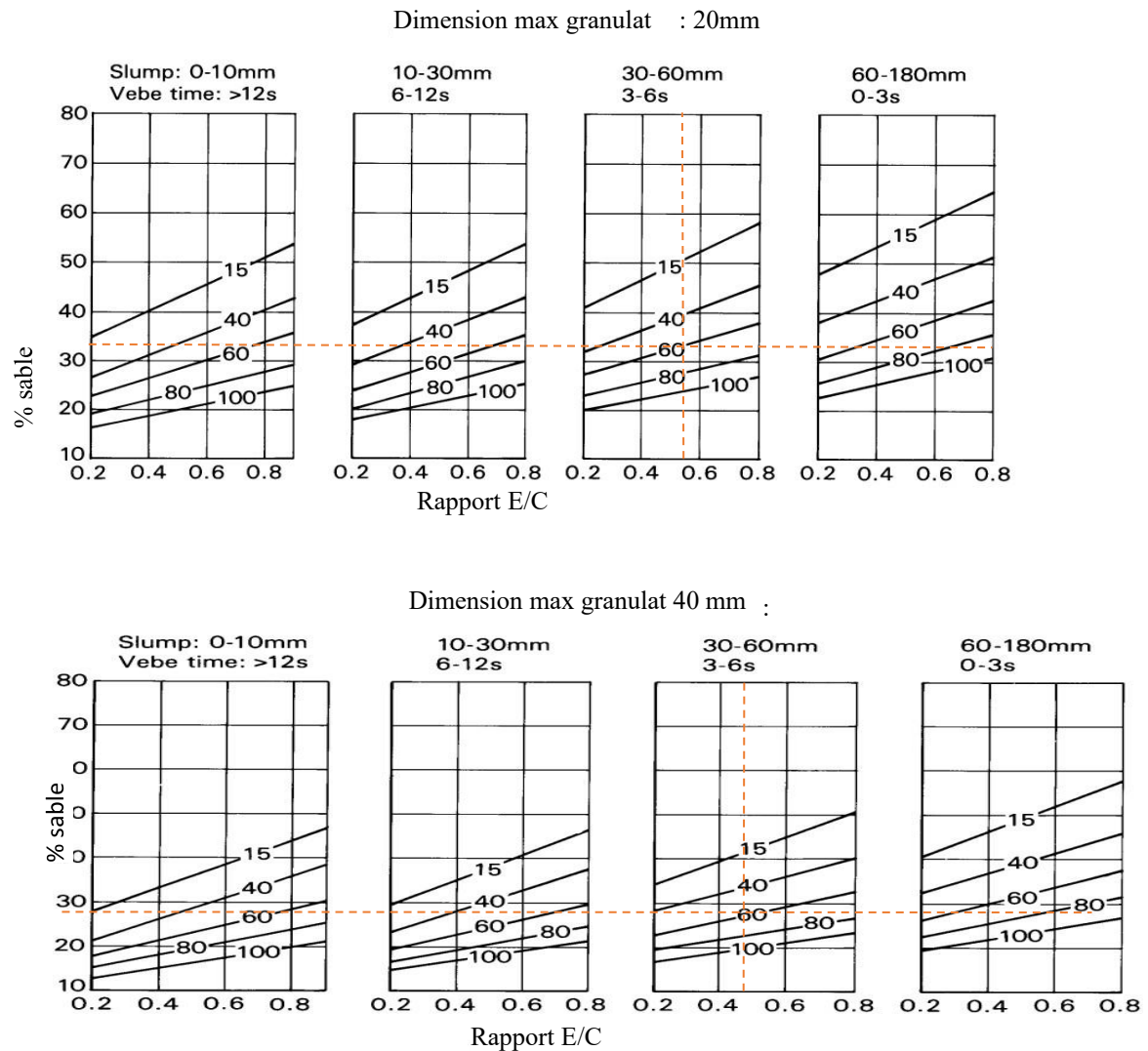


Figure III-20 : Détermination de % sable pour dimension max de 40mm [21]

Pour la détermination des % du sable pour 20 mm de dimension maximal est de **32,1 %** et pour celui de 40 mm de dimension maximal est de **28,3 %**

Nous allons procéder par interpolation pour trouver la valeur qui correspond pour un D max de 25 mm

$$\frac{20 - 25}{20 - 40} = \frac{32,1 - x}{32,1 - 28,3} = 31,15 \%$$

% sable = 31,15 %

Connaissant la proportion du sable, le poids du sable s peut être obtenu en multipliant le poids total de granulats par cette proportion

$$s = \%S \times G$$

$$S = 31,15\% \times 1758,3$$

$$S = 547,71 \text{ Kg}$$

- **Détermination de la quantité du gravier**

Connaissant la quantité du sable s, la quantité du gravier g peut être trouvée à partir de l'équation (II-23) .

$$g = G - s$$

$$g = 1758,3 - 547,71$$

$$g = 1210,59 \text{ kg}$$

Le gravier peut en outre être divisé en différentes fractions en fonction de la dimension de granulat disponible.

| % total gravier | % gravier 5 -10 mm | % gravier 10 -20 mm | % gravier 20 -40 mm |
|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 100             | 33                 | 37                  | -----               |
| 100             | 18                 | 27                  | 55                  |

Pour les graviers 8/15 nous avons 45 % et pour le gravier 15/25 nous avons 55 %

Nous allons à présent déterminer les quantités selon leurs volumes et poids dans 1 m<sup>3</sup> du béton et après nous déterminerons la quantité qu'il faut pour nos 9 éprouvettes selon la méthode de DOE

| Matériaux     | Poids (kg) pour 1 m <sup>3</sup> | Volume (m <sup>3</sup> ) pour 1 m <sup>3</sup> |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| CIMENT        | 372,7                            | 0,120                                          |
| SABLE         | 547,71                           | 0,219                                          |
| GRAVIER 8/15  | 544,76                           | 0,209                                          |
| GRAVIER 15/25 | 665,82                           | 0,256                                          |
| EAU           | 205                              | 0,205                                          |

Nous avons une éprouvette cylindrique de dimension diamètre = 16 et hauteur 32 cm ce qui nous fait un volume de **0,00643 m<sup>3</sup>**

Pour 9 éprouvettes nous aurons un volume de **0,0578 m<sup>3</sup>**

#### DOSAGE POUR LA METHODE DE DOE

| Matériaux     | Quantité en kg pour 0,0578 m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------------|
| CIMENT        | 21,542                                    |
| SABLE         | 31,657                                    |
| GRAVIER 8/15  | 31,487                                    |
| GRAVIER 15/25 | 38,484                                    |
| EAU           | 11,84                                     |

**ANNEXE 3: ANALYSE DES COUTS**

Les coûts présentés dans cette section correspondent aux coûts expérimentaux, c'est-à-dire calculés après le gâchage du béton.

**1. Méthode de Faury**

| constituants  | Poids(kg) | Cout (\$) |
|---------------|-----------|-----------|
| Eau           | 293,29    | 3,07      |
| Gravier 8/15  | 600,6     | 6,01      |
| Gravier 15/25 | 455       | 4,5       |
| Ciment        | 380       | 95        |
| sable         | 699,4     | 10,83     |
| total         | 2428,29   | 119,41    |

**2. Méthode ACI**

| constituants  | Poids(kg) | Cout (\$) |
|---------------|-----------|-----------|
| Eau           | 326,38    | 3,42      |
| Gravier 8/15  | 596,4     | 5,96      |
| Gravier 15/25 | 397,6     | 3,97      |
| Ciment        | 331       | 82,75     |
| sable         | 797,5     | 12,35     |
| total         | 2448,88   | 108,45    |

**3. La Méthode Britannique standard de conception de mélange (DOE)**

| constituants  | Poids(kg) | cout (\$) |
|---------------|-----------|-----------|
| Eau           | 308,37    | 3,23      |
| Gravier 8/15  | 544,76    | 5,44      |
| Gravier 15/25 | 665,82    | 6,65      |
| ciment        | 372,7     | 93,175    |
| sable         | 547,71    | 8,48      |
| total         | 2439,36   | 116,975   |

## ANNEXE 4 : ESSAIS SUR LES BETONS

## 1. ESSAIS SUR LES BETONS FRAIS

## Densité

| Designation | Masse (kg) | Volume (m3) | pw (kg/m3) | Densité | Masse volumique(kg/m3) |
|-------------|------------|-------------|------------|---------|------------------------|
| FAUR 1      | 15,54      | 0,00643072  | 1000       | 2,415   | 2415                   |
| FAUR2       | 15,6       | 0,00643072  | 1000       | 2,424   | 2424                   |
| FAUR 3      | 15,65      | 0,00643072  | 1000       | 2,434   | 2434                   |
| FAUR 4      | 15,58      | 0,00643072  | 1000       | 2,421   | 2421                   |
| FAUR 5      | 15,62      | 0,00643072  | 1000       | 2,429   | 2429                   |
| FAUR 6      | 15,66      | 0,00643072  | 1000       | 2,437   | 2437                   |
| FAUR 7      | 15,57      | 0,00643072  | 1000       | 2,42    | 2420                   |
| FAUR 8      | 15,63      | 0,00643072  | 1000       | 2,431   | 2431                   |
| FAUR 9      | 15,61      | 0,00643072  | 1000       | 2,427   | 2427                   |
| ACI 1       | 15,74      | 0,00643072  | 1000       | 2,448   | 2448                   |
| ACI 2       | 15,78      | 0,00643072  | 1000       | 2,454   | 2454                   |
| ACI 3       | 15,72      | 0,00643072  | 1000       | 2,446   | 2446                   |
| ACI 4       | 15,8       | 0,00643072  | 1000       | 2,457   | 2457                   |
| ACI 5       | 15,76      | 0,00643072  | 1000       | 2,451   | 2451                   |
| ACI 6       | 15,79      | 0,00643072  | 1000       | 2,456   | 2456                   |
| ACI 7       | 15,73      | 0,00643072  | 1000       | 2,447   | 2447                   |
| ACI 8       | 15,77      | 0,00643072  | 1000       | 2,452   | 2452                   |
| ACI 9       | 15,75      | 0,00643072  | 1000       | 2,449   | 2449                   |
| DOE 1       | 15,66      | 0,00643072  | 1000       | 2,436   | 2436                   |
| DOE 2       | 15,69      | 0,00643072  | 1000       | 2,441   | 2441                   |
| DOE 3       | 15,64      | 0,00643072  | 1000       | 2,433   | 2433                   |
| DOE 4       | 15,68      | 0,00643072  | 1000       | 2,439   | 2439                   |
| DOE 5       | 15,7       | 0,00643072  | 1000       | 2,442   | 2442                   |
| DOE 6       | 15,65      | 0,00643072  | 1000       | 2,435   | 2435                   |
| DOE 7       | 15,67      | 0,00643072  | 1000       | 2,438   | 2438                   |
| DOE 8       | 15,71      | 0,00643072  | 1000       | 2,444   | 2444                   |
| DOE 9       | 15,66      | 0,00643072  | 1000       | 2,436   | 2436                   |

## 2. ESSAIS SUR LES BETONS DURCIS

| Designation | Masse (kg) | Volume (m3) | pw (kg/m3) | Densité | Masse volumique (kg/m3) |
|-------------|------------|-------------|------------|---------|-------------------------|
| FAUR 1      | 14,95      | 0,00643072  | 1000       | 2,325   | 2325                    |
| FAUR 2      | 14,98      | 0,00643072  | 1000       | 2,33    | 2330                    |
| FAUR 3      | 15,02      | 0,00643072  | 1000       | 2,335   | 2335                    |
| FAUR 4      | 14,97      | 0,00643072  | 1000       | 2,328   | 2328                    |
| FAUR 5      | 15         | 0,00643072  | 1000       | 2,332   | 2332                    |
| FAUR 6      | 15,01      | 0,00643072  | 1000       | 2,334   | 2334                    |
| FAUR 7      | 14,96      | 0,00643072  | 1000       | 2,327   | 2327                    |
| FAUR 8      | 15         | 0,00643072  | 1000       | 2,333   | 2333                    |
| FAUR 9      | 14,96      | 0,00643072  | 1000       | 2,326   | 2326                    |
| ACI 1       | 14,96      | 0,00643072  | 1000       | 2,326   | 2326                    |
| ACI 2       | 14,99      | 0,00643072  | 1000       | 2,331   | 2331                    |
| ACI 3       | 14,97      | 0,00643072  | 1000       | 2,328   | 2328                    |
| ACI 4       | 15         | 0,00643072  | 1000       | 2,333   | 2333                    |
| ACI 5       | 14,98      | 0,00643072  | 1000       | 2,33    | 2330                    |
| ACI 6       | 14,96      | 0,00643072  | 1000       | 2,327   | 2327                    |
| ACI 7       | 15         | 0,00643072  | 1000       | 2,332   | 2332                    |
| ACI 8       | 14,98      | 0,00643072  | 1000       | 2,329   | 2329                    |
| ACI 9       | 14,94      | 0,00643072  | 1000       | 2,324   | 2324                    |
| DOE 1       | 15,27      | 0,00643072  | 1000       | 2,375   | 2375                    |
| DOE 2       | 15,31      | 0,00643072  | 1000       | 2,38    | 2380                    |
| DOE 3       | 15,34      | 0,00643072  | 1000       | 2,385   | 2385                    |
| DOE 4       | 15,29      | 0,00643072  | 1000       | 2,378   | 2378                    |
| DOE 5       | 15,32      | 0,00643072  | 1000       | 2,382   | 2382                    |
| DOE 6       | 15,3       | 0,00643072  | 1000       | 2,379   | 2379                    |
| DOE 7       | 15,31      | 0,00643072  | 1000       | 2,381   | 2381                    |
| DOE 8       | 15,29      | 0,00643072  | 1000       | 2,377   | 2377                    |
| DOE 9       | 15,32      | 0,00643072  | 1000       | 2,383   | 2383                    |

## 3. RESISTANCE EN COMPRESSION

| AGE (j)  | Beton  | designation | Eprouvette 1 | Eprouvette 2 | Eprouvette 3 | Moyenne    |
|----------|--------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 7 jours  | FAUR 1 | Force (KN)  | 197,05       | 211,12       | 224,89       | 211,02     |
|          |        | Rc (Mpa)    | 9,8          | 10,5         | 11,185       | 10,495     |
|          | ACI 1  | Force (KN)  | 247,589      | 185,954      | 186,29       | 206,611    |
|          |        | Rc (Mpa)    | 12,314       | 9,249        | 9,265        | 10,276     |
|          | DOE 1  | Force (KN)  | 282,196      | 262,864      | 333,126      | 292,728667 |
|          |        | Rc (Mpa)    | 14,035       | 13,074       | 16,568       | 14,559     |
| 14 jours | FAUR 1 | Force (KN)  | 314,32       | 238,28       | 394,94       | 315,846667 |
|          |        | Rc (Mpa)    | 15,63        | 11,851       | 19,643       | 15,708     |
|          | ACI 1  | Force (KN)  | 299,189      | 172,1        | 272,888      | 248,059    |
|          |        | Rc (Mpa)    | 14,88        | 8,5          | 13,572       | 12,3173333 |
|          | DOE 1  | Force (KN)  | 346,635      | 405,259      | 416,448      | 389,447333 |
|          |        | Rc (Mpa)    | 17,24        | 20,156       | 20,712       | 19,3693333 |
| 28 jours | FAUR 1 | Force (KN)  | 316,993      | 357,78       | 307,064      | 327,28     |
|          |        | Rc (Mpa)    | 15,766       | 17,8         | 15,272       | 16,27      |
|          | ACI 1  | Force (KN)  | 274,365      | 281,4        | 288,435      | 281,4      |
|          |        | Rc (Mpa)    | 13,65        | 14           | 14,35        | 14         |
|          | DOE 1  | Force (KN)  | 471,719      | 527,421      | 419,268      | 472,8      |
|          |        | Rc (Mpa)    | 23,461       | 26,232       | 20,853       | 23,51      |

## ANNEXES 5 : PHOTOS DES ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE ET DES RESISTANCES MECANIQUES

### 1. Analyse granulométrique sur tamiseuse



### 2. Prise des poids



### 3. Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams



#### 4. Essai de compression



