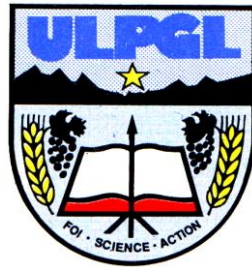


**UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTÉ DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**ETUDE COMPARATIVE DES PROPRIETES
MECANIQUES DU BETON A COMPOSITION
PRESCRITE ET CELUI A COMPOSITION
METHHODIQUE.**

Par *HERI MUSHAGALUSA*

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Licencié en Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie Civil

Directeur : CT. GRACE MUHIWA

Encadreur : Ir. KOKO KATUMBI pascal

ANNEE ACADEMIQUE 2023 - 2024

Epigraphe.

"Un homme sage est plein de force, Et celui qui a de la connaissance affermit sa vigueur."

Proverbes 24 :5 (LSG)

Dédicace

À tous ceux qui croient en moi,

HERI Mushagalusa Dieume

Remerciements

Je ne pourrai jamais prétendre que la réalisation de ce travail soit le résultat de notre seul propre effort, elle a plutôt été atteinte grâce à la contribution de plusieurs intervenants.

Tout d'abord, je remercie Dieu dont la grâce et le soutien m'ont permis de mener à bien ce travail ; je remercie également ma mère Claudine pour son amour, sa patience et son soutien tout au long de ce parcours. Mes grandes reconnaissances vont aux autorités académiques de l'ULPGL, plus particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et des Technologies Appliquées, département de Génie Civil, pour leurs efforts fournis tout au long de notre parcours. Mes sentiments de profonde gratitude vont au CT Ir. Grace MUHIWA MASIKA qui a accepté respectueusement de diriger ce travail, ainsi qu'à l'ingénieur Pascal KOKO KATUMBI pour son encadrement de mérite. Je ne manquerai pas de dire merci à ma famille tant physique que spirituelle, ainsi qu'à la JEM ; à tous, je dis merci.

Résumé

Ce travail porte sur une étude comparative des propriétés mécaniques des bétons à composition prescrite et celles à composition méthodique. Pour ce faire, nous avons caractériser les matériaux intervenant dans la confection des bétons moyennant des essais au laboratoire. Quatre groupes de bétons ont été formulés : deux premiers selon la composition méthodique à partir de la méthode de Dreux-Gorisse, et deux autres selon la composition tabulaire, afin de déterminer laquelle de ces méthodes donne un béton ayant une meilleure résistance mécanique. D'une part, pour la méthode Dreux-Gorisse (composition méthodique), le dosage de 400 kg/m³ avec un affaissement de 8 cm a donné un béton plastique avec une résistance à la compression à 28 jours de 17,65 MPa ; et le dosage de 350 kg/m³ avec un affaissement de 7 cm a produit un béton plastique avec une résistance de 16,098 MPa. D'autre part, pour la composition tabulaire, le dosage de 350 kg/m³ a donné une résistance de 16,112 MPa, tandis que celui de 400 kg/m³ n'a produit que 14,03 MPa. Aucune des formulations n'a atteint la plage des résistances courantes recommandée (20 à 40 MPa). Toutefois, les résultats ont montré, pour 350 kg/m³, une très légère supériorité de 0,087 % en faveur de la méthode tabulaire, et pour 400 kg/m³, une amélioration significative de 25,8 % en faveur de la méthode méthodique. La faible résistance obtenue par la méthode tabulaire est principalement due à l'absence d'optimisation de sa composition (elle repose sur des dosages standardisés sans tenir compte des propriétés spécifiques des matériaux), ainsi qu'au manque de contrôle du rapport Eau/Ciment (E/C), qui a entraîné un excès d'eau, réduisant ainsi la compacité et la résistance du béton.

Mots clés : Composition Méthodique, Composition Tabulaire et Résistance mécanique.

Abstract.

This study presents a comparative analysis of the mechanical properties of concrete produced using two mix design approaches: the prescribed (tabular) method and the methodical approach. Four concrete mixes were formulated two using the Dreux-Gorisse method (methodical composition) and two using standard dosage tables (tabular composition) to determine which method yields better mechanical strength. In the methodical approach, a mix with 400 kg of cement per m³ and an 8 cm slump achieved a compressive strength of 17.65 MPa at 28 days, while a 350 kg/m³ mix with a 7 cm slump achieved 16.098 MPa. In the tabular method, the 350 kg/m³ mix yielded 16.112 MPa, and the 400 kg/m³ mix reached only 14.03 MPa. None of the mixes achieved the commonly recommended compressive strength range of 20–40 MPa at 28 days. The results showed a slight strength advantage of 0.087% in favor of the tabular method for the 350 kg/m³ dosage, and a 25.8% advantage in favor of the methodical approach for the 400 kg/m³ dosage. The lower strength in the tabular method is attributed to its lack of optimization and inadequate control of the water-to-cement ratio, leading to excess water and reduced concrete compactness and strength.

Keywords: Methodical Composition, Tabular Composition, Mechanical Strength.

SOMMAIRE

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
SOMMAIRE.....	v
Liste des abréviations.....	viii
Liste des tableaux.....	ix
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Revue de littérature	3
1.1 Introduction.....	3
1.1.1 Composants de base du béton.....	3
1.1.2 Propriétés mécaniques du béton.....	9
1.2 Les Méthodes de formulation du béton	12
1.2.1 La méthode tabulaire (composition prescrite)	12
1.2.2 La composition méthodique (formulation classique)	14
1.3 Comparaison des méthodes de formulation du béton	15
Sur la résistance mécanique	15
1.4 Typologie des bétons [1].....	16
1.4.1 Le béton à haute performance.....	16
1.4.2 Le béton de fibres métalliques	16
1.4.3 Le béton de poudres réactives.....	16
1.4.4 Le béton caverneux	17
1.4.5 Le béton précontraint	17
1.4.6 Le béton autoplaçant	17
1.5 Conclusion partielle	17
Chapitre 2 Méthodologie	18

2.1	Introduction.....	18
2.2	Nature et origine des constituants	18
2.2.1	Le Ciment.....	18
2.2.2	Les Granulats	18
2.2.3	L'eau de gâchage	19
2.3	Caractérisations des constituants	19
2.3.1	Analyse Granulométrique	19
v.	Expression des résultats	20
(2-1)	21
2.3.2	Le degré de propreté de sable	21
2.3.3	Masse volumique apparente des granulats.....	24
2.3.4	Masse volumique absolue des granulats	25
2.3.5	Essai los Angeles	26
2.3.6	Essai de Consistance	28
2.3.7	Essai de Prise	30
2.3.8	Masse volumique absolue du Ciment	31
2.4	Formulation du béton.....	31
2.4.1	Choix de la méthode	31
2.4.2	Principe de formulation.....	32
2.4.3	Etapas de la formulation et établissement du cahier des charges	32
2.4.4	Quelques données de base pour l'obtention de la formulation théorique du béton	
	33	
2.5	Formulation à base de la méthode tabulaire	39
2.5.1	Mode opératoire	39
2.6	Caractérisation du béton	40
2.6.1	Caractérisation du béton à l'état frais	40
2.6.2	Caractéristique du béton à l'état durci	41
2.7	Préparation des éprouvettes	43
2.8	Conclusion partielle	43
Chapitre 3 Présentation et interprétation des résultats.....		44
3.1	Introduction.....	44

3.2	Présentation des résultats des essais d'identification des matériaux	44
3.2.1	Résultat de l'identification du sable.....	44
3.2.2	Le résultat de l'identification du Gravier.....	46
3.2.3	Les résultats de l'identification du Ciment	47
3.2.4	Résultats de la formulation par la composition Méthodique	48
3.3	Résultats de la formulation selon la composition prescrite	51
3.4	Caractérisation du Béton à l'état durci.....	52
3.4.1	Résistance à la compression du Béton formulé selon la composition Méthodique 52	
3.4.2	Résistance à la compression du Béton formulé selon la composition Tabulaire 54	
3.5	Conclusion partielle	58
	Conclusion Générale.....	59
	Bibliographie.....	61
	Annexes.....	62

Liste des abréviations

ASTM: American Society for Testing and Materials

AFNOR : Association Française de Normalisation

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

C : Dosage en ciment

Cm : Centimètre

D_{max} : Diamètre du plus gros granulat

E : Dosage en eau

EN : Norme Européenne

$\frac{C}{E}$: Rapport ciment sur eau

G : Coefficient granulaire

Kg : Kilogramme

KN : Kilo Newton

Mpa : Méga pascal

mm : Millimètre

MF : Module de finesse

NF : Norme Française

ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

Liste des tableaux

Tableau 1-1 <i>Spécification mécaniques et physiques des ciments</i>	4
Tableau 1-2 <i>Types de ciment et composition.</i>	5
Tableau 1-3 <i>Classes d'environnement selon la norme française NF18-011</i>	8
Tableau 1-4 <i>Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône [9].</i>	10
Tableau 1-5 <i>Tableaux de Dosage[7].</i>	13
Tableau 2-1 <i>Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable</i>	23
Tableau 2-2 <i>Estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient LA.</i>	28
Tableau 2-3 <i>Valeurs du coefficient granulaire G en fonction de la qualité des granulats</i>	33
Tableau 2-4 <i>Valeurs de la correction (en %) sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale « D » des granulats</i>	35
Tableau 2-5 <i>Valeurs du coefficient K en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats</i>	36
Tableau 2-6 <i>Valeurs du coefficient de compacité en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats</i>	37
Tableau 2-7 <i>Calcul du dosage pour 1m³ [6].</i>	40
Tableau 3-1 <i>Résultat de degré de propreté du sable</i>	45
Tableau 3-2 <i>Résultats des essais de détermination de la masse volumique absolue et apparente du sable</i>	46
Tableau 3-3 <i>Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique absolue et apparente</i>	47
Tableau 3-4 <i>Masse volumique absolue du ciment</i>	47
Tableau 3-5 <i>Données de base pour la formulation</i>	49
Tableau 3-6 <i>Coordonnée de la courbe de référence OAB</i>	51
Tableau 3-7 <i>Dosage massique des granulats pour la composition methodique</i>	51
Tableau 3-8 <i>Dosage massique des granulats pour la composition tabulaire</i>	51
Tableau 3-9 <i>Valeurs de la résistance à la compression pour la composition méthodique</i>	52
Tableau 3-10 <i>la densité apparente des éprouvettes et résistance moyenne à la compression pour la composition méthodique</i>	53
Tableau 3-11 <i>Valeurs de la résistance à la compression pour la composition tabulaire</i>	54

Tableau 3-12 *la densité apparente des éprouvettes et résistance moyenne à la compression pour la composition tabulaire.....55*

Liste des figures

Figure 1-1 <i>Essais de traction directe</i>	11
Figure 1-2 <i>Essai de traction par flexion</i>	12
Figure 1-3 <i>Essai de traction par fendage</i>	12
Figure 2-1 <i>Une colonne de tamis pour l'analyse granulométrique et une tamiseuse électrique</i>	20
Figure 2-2 <i>Equipement nécessaire pour l'essai d'équivalent de sable</i>	22
Figure 2-3 <i>Machine Los Angeles utilisée.</i>	28
Figure 2-4 <i>Illustration de l'essai d'affaissement au cône d'Abrahms</i>	41
Figure 2-5 <i>Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'Affaissement au cône</i>	34
Figure 3-1 <i>courbe de l'analyse granulométrique du sable</i>	45
Figure 3-2 <i>courbe de l'analyse granulométrique du Gravier</i>	46
Figure 3-3 <i>courbe de la composition granulométrique du Béton dosé à 350 Kg/m³</i>	48
Figure 3-4 <i>courbe de la composition granulométrique du Béton dosé à 400 Kg/m³</i>	49
Figure 3-5 <i>variations des résistances à la compression (R_{cj}) en fonction des âges du béton pour la composition méthodique</i>	54
Figure 3-6 <i>variations des résistances à la compression (R_{cj}) en fonction des âges du béton pour la composition</i>	56

Introduction Générale

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le Monde en raison de sa résistance et de sa durabilité. Cependant, ces propriétés mécaniques peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la méthode de formulation du béton, la qualité des matériaux utilisés, et le respect des dosages prescrits [1]. Dans le milieu de la construction, deux grandes approches de formulation du béton sont Souvent discutées : la composition prescrite et la composition méthodique. La première repose sur des tables préétablies de dosage, tandis que la seconde repose sur une méthodologie rigoureuse qui tient compte des propriétés des matériaux disponibles et des conditions spécifiques du chantier. Dans plusieurs régions en développement, comme la ville de Goma, le manque de rigueur dans les formulations du béton entraîne des problèmes fréquents de résistance mécanique, affectant la durabilité des ouvrages. Il devient donc crucial d'étudier les différentes méthodes de formulation afin d'identifier celle qui garantit la meilleure performance.

Bien que certains chantiers à Goma suivent les normes internationales, beaucoup dépendent encore largement de compositions prescrites non adaptées, ce qui pourrait expliquer les insuffisances constatées. Ce constat justifie l'intérêt d'une étude comparative entre ces deux méthodes. De ce qui précède, la question qui nous a intéressé est la suivante : Laquelle des méthodes entre la composition tabulaire et la composition méthodique permettrait d'obtenir à la fois une bonne ouvrabilité et une meilleure résistance mécanique ?

En se référant à la question de recherche sus-évoquée, l'hypothèse selon laquelle la méthode à composition méthodique pourrait à la fois donner un béton ayant une bonne ouvrabilité et une bonne résistance a été émise. Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé deux formulations l'une selon la méthode tabulaire (prescrite) et l'autre selon la méthode méthodique en évaluant les performances du béton à travers des essais de compression sur éprouvettes cylindriques.

L'objectif général de cette recherche est d'évaluer et de comparer les performances mécaniques du béton à composition prescrite et celui à composition méthodique, afin d'identifier la méthode la plus adaptée aux conditions locales.

En vue d'atteindre l'objectif général, nous avons poursuivi les objectifs spécifiques ci-après : Caractériser les différents matériaux nécessaires dans la formulation du béton, Formuler un béton par la composition méthodique, Formuler un béton par la composition tabulaire, Soumettre les échantillons formulés à des essais, Comparer les résultats obtenus après formulation et essais, en comparant notamment les propriétés à l'état frais et à l'état durci, Cette recherche s'appuiera sur une approche expérimentale sur les matériaux qui entrent dans la confection des béton formulés selon les deux méthodes de composition (prescrite et méthodique). Les tests de résistance seront effectués en laboratoire sur les bétons durcis pour évaluer la performance de chaque composition. La délimitation de ce travail se concentrera principalement sur la comparaison des propriétés mécaniques du béton. L'étude ne portera que sur le béton ordinaire.

Hormis l'introduction générale et la conclusion générale, ce travail est subdivisé en trois chapitres : le premier traite des généralités en donnant une connaissance plus ou moins globale sur le béton. Le second présente les matériels et les méthodes utilisées. Le troisième présente les résultats ainsi que leur interprétation.

Chapitre 1

Revue de littérature

1.1 Introduction

Le béton est un matériau artificiel obtenu par un mélange d'un liant (généralement du ciment), d'eau, de granulats (sable et graviers), et éventuellement d'adjuvant, le tout choisi de façon rationnelle [1]. Le présent chapitre traite des généralités sur le béton en présentant notamment les constituants du béton, les méthodes de formulation du béton, les propriétés du béton et le domaine d'utilisation du béton.

1.1.1 Composants de base du béton

Les constituants du béton sont les matériaux qui sont mélangés en vue d'obtenir un matériau hétérogène compact. Dans cette partie, nous présentons les différents constituants du béton qui sont le sable, le gravier, le ciment et l'eau.

1.1.1.1 Le ciment

Le ciment 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 et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement hydraulique du ciment CEM est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement [1].

i) Les constituants principaux

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- du calcaire,
- du laitier de haut fourneau,
- des cendres volantes,
- des fines calcaires.

- de la pouzzolane naturelle,
- des schistes calcinés,
- des fumées de silice. Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques.

ii) Classification des ciments

1. Classification en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous-classes « R » sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées classe 32,5, classe 42,5 et classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 1.1.

Tableau 1-1 Spécification mécaniques et physiques des ciments[1]

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

2. Classification en fonction de leur composition

Les ciments sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon la norme Algérienne NA442. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains. Ils sont regroupés dans le tableau 1.2.

Tableau 1-2 *Types de ciment et composition.[1]*

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 - 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut Fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 35		-		-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36 -55		-		-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-		-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-		-	0 – 5

iii) Marquage des sacs

Les inscriptions portées sur les sacs comportent outre la marque du ciment (nom du fabricant et de l'usine) :

- le type du produit, ex. : Ciment Portland Composé - CPJ-CEM II/A ;
- l'indication des constituants autres que le clinker ;
- l'indication de la norme à laquelle il se réfère, ex. : NF P 15-301 ;
- la classe de résistance, ex. : 32,5 R ;
- les caractéristiques complémentaires éventuelles, ex. : PM, ES, CP2 ;
- une indication sous forme d'astérisque (*) pour les CPA-CEM 1 lorsque la teneur en constituant secondaire est supérieure à 3 % ;

- la nature et le pourcentage d'adjuvant lorsque le ciment en comporte. (Ex : Re = 0,3 %),
l'identification des différents adjuvants correspondant aux mentions suivantes :

- HR Haut réducteur d'eau
- Re Réducteur d'eau plastifiant
- H Hydrofuge
- F Fluidifiant - Superplastifiant
- E Entraîneur d'air
- P Plastifiant
- Ap Accélérateur de prise
- Ad Accélérateur de durcissement
- Rp Retardateur de prise

iv) Critères de choix du ciment

Les critères de choix peuvent être résumés en trois classes :

- La résistance souhaitée du béton
- Les impératifs de mise en œuvre
- L'environnement de l'ouvrage.

i. Critère I :

Choix de la classe de résistance du ciment en fonction de la résistance du béton à 28 jours.

La relation de Bolomey permet de déterminer la résistance normale du ciment en fonction de la résistance de béton souhaitée, elle est donnée par la relation 1-1:

$$R_{c28} = G \cdot R_{nc} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (1_1)$$

avec :

- R_{c28} : résistance souhaitée du béton à 28 jours (MPa)
- G : coefficient granulaire fonction de la nature du granulat et du D_{max} ($0,45 < G < 0,65$)
- R_{nc} : classe vraie (résistance nominale) du ciment à 28 jours exprimée en MPa
- C : dosage en liant équivalent (kg/m^3)
- E : quantité d'eau de gâchage exprimée en litres.

ii. **Critère II** : *Impératifs de mise en œuvre*

- Un décoffrage rapide, une mise en précontrainte précoce orientent vers des ciments dont la classe de résistance au jeune âge est élevée. Mais une résistance qui augmente vite suppose des réactions d'hydratations rapides qui, parce qu'elles sont exothermiques, peuvent provoquer un échauffement notable des pièces en béton.
- Pour un bétonnage par temps froid, le béton reste plus longtemps mou et déformable, et le développement des résistances est retardé, on cherchera à bénéficier de ce dégagement de chaleur en choisissant des ciments de classe. On raisonnera à l'inverse pour le bétonnage par temps chaud.

iii. **Critère III** : *Environnement de l'ouvrage*

Le béton doit dans sa formulation et ses caractéristiques, être adapté à l'environnement. La norme française NF18-011 classe l'environnement en 5 classes.

Les recommandations pour le choix du liant sont les suivantes :

- Pour les classes 1, 2, tous les types de ciments conviennent.
- Pour la classe 3, tous les ciments conviennent, à moins qu'il y ait un risque de mise en contact avec des sels fondants contenant des sulfates. Dans ce cas, certains maîtres d'œuvre demandent un ciment à caractéristiques complémentaires.
- Pour la classe 4, il faut choisir un ciment à caractéristique « prise mer ».
- Pour l'environnement 5, cela dépend de l'agent agressif : Si ce sont les ions sulfate, il faut choisir un ciment de caractéristique complémentaire ; s'il s'agit d'eau douce ou acide, il faut choisir parmi les ciments courants, les (CHF-CEMIII/B), les (CLK-CEMIII/C) et les (CLC-CEMV/A et B), soit parmi les autres, le ciment alumineux fondu et le ciment prompt naturel.

Le tableau 1-3 présente les classes d'environnement.

Tableau 1-3 *Classes d'environnement selon la norme française NF18-011*

Classe 1	Les environnements secs
Classe 2	Les environnements humides sans gel ou avec un gel faible ; Les environnements humides avec gel modéré ; Les environnements humides avec un gel sévère.
Classe 3	Les environnements humides avec gel modéré ou sévère et produits dégivrant.
Classe 4	Les environnements marins immergés (sans gel ou avec un gel faible) ; Les environnements marins avec gel modéré ou sévère.
Classe 5	Les environnements faiblement agressifs chimiquement ; Les environnements moyennement agressifs chimiquement ; Les environnements fortement agressifs chimiquement.

1.1.1.2 Les Granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage [2].

i) Classification des granulats

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis. Le terme « Granulat d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments.

La norme XP P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

Filler O/D pour « D » < 2 mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63mm

Sablon O/D pour « D » ~ 1 mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63mm

Sable O/D lorsque « D » est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$

Graves O/D lorsque « D » > 6,3 mm

Gravillons d/D lorsque « d » $\geq 1 \text{ mm}$ et « D » $\leq 125 \text{ mm}$

Ballast d/D lorsque « d » $\geq 25 \text{ mm}$ et « D » $\leq 50 \text{ mm}$

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0,063 0,08 0,10 **0,125** 0,16 0,2 **0,25** 0,315 0,4 **0,5** 0,63 0,8 **1** 1,25 1,6 2 3,15 5 6,3 **8** 10 12,5 14 **16** 20 25 31,5 40 50 **63** 80 100 **125**.

Les tamis dont les dimensions sont soulignées et notées en gras correspondent à la série de base préconisée par le (NF EN 933-2) : de ce fait, lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe [1].

1.1.1.3 Eau de gâchage

L'eau a un rôle primordial dans le béton :

- Elle permet l'hydratation du ciment, qui entraîne la prise du béton ;
- Et assure la maniabilité du béton frais.

L'excès d'eau dans le béton diminue sa résistance, sa durabilité et augmente sa porosité (volume des vides par rapport au volume total). La norme NF EN 1008 définit les eaux de gâchage pour béton. L'eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton, ce qui n'est pas le cas des eaux de mers (chlorées), des eaux saumâtres (sulfatées) et des eaux usées (concentrées en matières organiques).

1.1.2 Propriétés mécaniques du béton

Les principales caractéristiques des bétons sont les propriétés à l'état frais et durci.

I. Ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton (frais) à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. Elle représente aussi la consistance du béton frais. Donc le béton doit être maniable et conserve son homogénéité pendant la mise en œuvre. La maniabilité (l'ouvrabilité) des bétons est principalement influencée par :

- Le dosage en eau (E/C).
- La nature et le dosage du liant (ciment) ;
- La forme des granulats, la granulométrie ;
- La résistance mécanique (compression, traction et module d'élasticité)

- L'absorption, la porosité et la teneur en humidité
- La présence de matières nuisibles.

Il existe de nombreux essais et tests permettant la mesure de l'ouvrabilité. On ne citera que celui qui est le plus couramment utilisé dans la pratique :

❖ **Affaissement au cône d'Abrams (ou Slump-test)**

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage (mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique du béton frais). L'essai d'affaissement au cône caractérise bien la consistance d'un béton ce qui permet le classement approximatif indiqué au tableau 1-4.

Tableau 1-4 *Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône [9].*

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

II. Masse volumique apparente du béton frais

La masse volumique est la masse par unité de volume d'un béton. L'essai est effectué conformément à la norme CSA A23.2-4C ou ASTM C231. L'appareillage utilisé est un air-mètre. Le béton est placé en 3 couches consolidées avec 25 coups de pilon. La surface

supérieure du béton est ensuite arasée à l'aide de la règle. La masse du contenant rempli de béton – la tare divisée par le volume du contenant donne la masse volumique du béton.

III. Résistance caractéristique à la compression

Pour l'établissement des projets, dans les cas courants, un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite valeur caractéristique requise notée f_{c28} .

IV. Résistance du béton à la traction

Le béton classique possède une faible résistance à la traction. Elle est déterminée à l'aide des essais directe ou indirecte. La résistance à la traction bien que négligée, joue cependant un rôle important dans le problème de la fissuration et le comportement au cisaillement du béton. Expérimentalement, la résistance à la traction d'un béton peut se mesurer grâce à l'une des trois méthodes suivantes [1] :

- Essai de traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite. L'essai de traction directe est présenté à la figure 1-1.

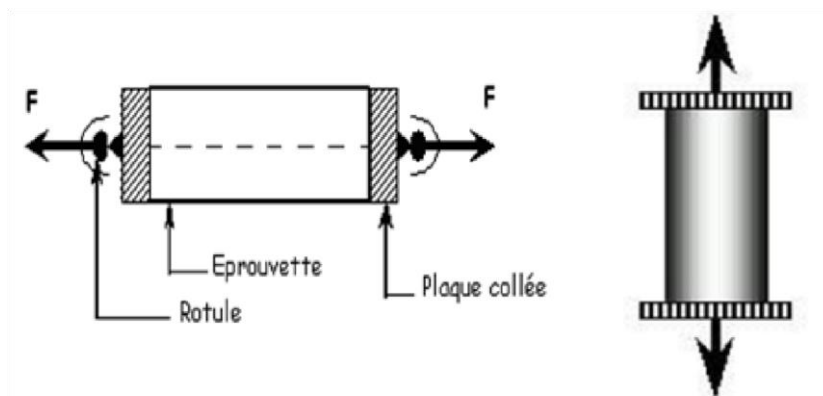


Figure 1-1 *Essais de traction directe*[1]

- Essai de traction par flexion

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($7.7.28$) cm^3 . La résistance à la traction (par flexion) correspond à la contrainte maximale. L'essai de traction par flexion est présenté à la figure 1-2.

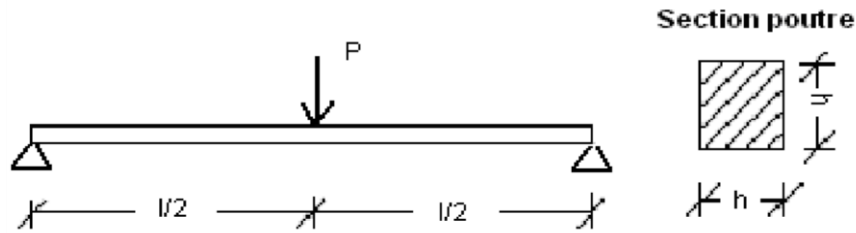


Figure 1-2 Essai de traction par flexion[1]

- Essai de fendage (ou essai brésilien)

Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage, par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées. L'essai de fendage est présenté à la figure 1-3.

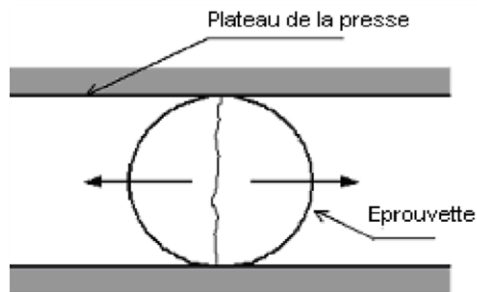


Figure 1-3 Essai de traction par fendage[1]

1.2 Les Méthodes de formulation du béton

La formulation d'un béton revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, des graviers, de l'eau et éventuellement des adjuvants entrant dans la composition d'un m^3 de béton partant des propriétés recherchées.

1.2.1 La méthode tabulaire (composition prescrite)

La méthode tabulaire, souvent appelée méthode de composition prescrite, repose sur l'utilisation de tableaux de dosages standards pour déterminer les proportions des composants du béton. Cette approche a été développée pour simplifier et standardiser le processus de formulation du béton en fournissant des dosages préétablis pour diverses classes de résistance et types d'ouvrages. Le dosage du béton, c'est-à-dire de ses composants, dépend de son utilisation pour la maison : fondation, terrasse, dalle carrossable ou autres.

Pour chacune des applications, on cherchera un béton plus ou moins résistant. Cette notion de résistance est partiellement liée à la quantité de ciment que l'on intègre dans le béton.

Il est à noter que, dans la pratique, le dosage le plus souvent utilisé est celui à 350 kg/m³ puisque ce dernier est compatible avec un grand nombre d'ouvrages maçonnés [7].

- **Principe de la méthode**

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe : 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulats passant après la consistance du béton à obtenir. L'exemple de dosage de béton pour quelque application est présenté dans le tableau 1-5.

Tableau 1-5 Tableaux de Dosage[7].

Application du Béton	Ciment (kg/m³)	Eau (L/m³)	Sable (kg/m³)	Gravier (kg/m³)
Dallage Béton	300	155	830	1100
Béton de Fondation	350	175	800	1050
Béton armé	400	195	720	980

- **Avantages de la Méthode Tabulaire**

Simplicité et Rapidité : La méthode tabulaire permet une mise en œuvre rapide, car elle évite les calculs complexes associés à la formulation.

- **Limites de la Méthode Tabulaire**

- Manque de Flexibilité : La méthode tabulaire ne prend pas en compte les particularités des matériaux locaux, tels que la qualité des granulats,
- Incapacité à Optimiser : Cette approche ne permet pas d'optimiser le béton pour des applications particulières,

- Imprécision dans les Propriétés Mécaniques : Étant donné qu'il s'agit d'un dosage fixe, la méthode tabulaire peut ne pas répondre précisément aux exigences mécaniques spécifiques attendues, en particulier dans les projets de haute technicité.

1.2.2 La composition méthodique (formulation classique)

La composition d'un béton consiste dans la détermination des diverses quantités de granulats (sable, gravier, cailloux), de ciment et d'eau qu'il est nécessaire de mettre en présence pour obtenir un mètre cube de béton. Diverses méthodes de formulations du béton ont été développées notamment [1] :

- La méthode de Dreux-Gorisse,
- La méthode de Scramtaiev,
- La méthode de Baron Olivier,
- La méthode d'Abrams,
- La méthode de Bolomey,
- La méthode de Joisel,
- La méthode de Faury etc.

Dans cette section, seule la méthode de formulation de Dreux Gorisse sera développée.

La méthode de Dreux Gorisse passe par plusieurs étapes successives dans le but d'obtenir la formulation théorique du béton sur la base de la nature de l'ouvrage, l'ouvrabilité et la résistance souhaitée [1]. Ces étapes sont les suivantes :

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

❖ Critères de base

- **La dimension maximale des granulats** est importante dans la composition du béton. En effet, un béton tire du granulat une bonne part de la résistance et plus

particulièrement du gros granulat. Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage) [3].

- **La résistance souhaitée** est en général définie par la résistance en compression sur éprouvette cylindrique à 28 jours. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier/sable) [4]. La résistance en compression est déterminée par la relation 1-1 :

$$\sigma_{28} = 1,15 \cdot \sigma_n' \quad (1-1)$$

Avec

σ_{28} : Résistance en compression désirée à 28 jours

σ_n' : Résistance visée en compression à 28 jours

- **La consistance désirée** : elle est fonction de l'élément à bétonner (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc.

Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams. Après la détermination de ces critères de base, on procède à la détermination de :

- Du dosage en Eau et en Ciment ;
- Du dosage en granulats.

1.3 Comparaison des méthodes de formulation du béton

Sur la résistance mécanique

- La composition tabulaire offre des résistances prédéfinies en fonction des tableaux standards [7], mais elle n'est pas toujours précise dans l'atteinte des résistances spécifiques. Elle repose sur des dosages génériques, souvent adaptés pour des projets standards, mais elle peut manquer de précision pour des ouvrages aux exigences mécaniques spécifiques.

- La méthode de formulation méthodique permet un contrôle plus précis de la résistance mécanique du béton. En ajustant les proportions des matériaux, elle permet de répondre aux exigences spécifiques du projet et d'optimiser les performances mécaniques. Cette méthode offre une meilleure garantie d'atteindre les résistances voulues, car elle est basée sur des tests préalables et des ajustements continus en fonction des matériaux disponibles.

Bref : La composition méthodique est plus performante en termes de résistance mécanique, car elle permet une optimisation adaptée aux besoins du projet et des matériaux disponibles.

1.4 Typologie des bétons [1]

Selon les propriétés recherchées, le type de liant utilisé, l'usage destiné au béton, il existe plusieurs types des bétons parmi lesquelles nous pouvons citer : le béton ordinaire qui fait l'objet de cette étude, le béton à haute performance, le béton de fibres métalliques, le béton de poudre réactive, le béton caverneux, le béton précontraint, le béton autoplaçant, etc.

1.4.1 Le béton à haute performance

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

1.4.2 Le béton de fibres métalliques

Le béton renforcé de fibres est un béton de ciment contenant des fibres qui lui donnent de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure durabilité. Le pourcentage volumique des fibres dans le béton varie généralement entre 0,9 et 4%. Il peut contenir différents types de fibres tels que : l'acier, la fonte amorphe, les fibres de verre, les fibres de carbone, etc.

1.4.3 Le béton de poudres réactives

Le béton de poudres réactives (BPR) est un matériau à matrice cimentaire pour lequel le nombre, la morphologie et le dosage des différents composants granulaires ont été optimisés afin d'obtenir des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée.

1.4.4 Le béton caverneux

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

1.4.5 Le béton précontraint

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

1.4.6 Le béton autoplaçant

Le béton autoplaçant est un béton de ciment capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène.

1.5 Conclusion partielle

Ce premier chapitre a traité des généralités sur le béton, il a été question de définir le béton, de parler de ses constituants, de répertorier différentes méthodes pour sa formulation, de définir ses propriétés et de distinguer différents types de béton et particulièrement le béton ordinaire qui fait l'objet de cette étude.

Chapitre 2

Méthodologie

2.1 Introduction

Nous allons, dans cette partie du travail, présenter la nature et l'origine des constituants, déterminer certaines caractéristiques des constituants par une série d'essais notamment : l'analyse granulométrique par tamisage et les essais de détermination des propriétés physiques des granulats (caractéristiques intrinsèques). Outre ce qui précède, nous allons présenter les méthodes de formulation qui font l'objet de ce travail d'une part et certains essais qui vont nous permettre de caractériser qualitativement et quantitativement les bétons notamment : l'essai d'étalement au cône d'Abrams et la résistance à la compression. Enfin seront présentés les modes opératoires des différents essais effectués au laboratoire de géo-matériau de la FSTA de l'ULPGL.

2.2 Nature et origine des constituants

Nous allons présenter dans cette section, les constituants utilisées dans la confection des bétons qui sont des diverses natures et origines : nous présentons respectivement la nature et l'origine des graviers, de l'eau de gâchage, du sable et du ciment utilisé.

2.2.1 Le Ciment

Dans notre étude, nous aurons à utiliser le ciment de marque CIMERWA, qui est un ciment pouzzolanique produit au RWANDA (CEM II/B-P 42,5N).

2.2.2 Les Granulats

Les graviers qu'on aura à utiliser dans notre étude sont du type concasse de diamètre (15/25) issus du concassage de la roche volcanique de Goma et le sable utilisé est un sable roulé d'Idjwi.

2.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans la confection des bétons est potable, généralement puisée dans le réseau de la ville.

2.3 Caractérisations des constituants

Les matériaux utilisés dans cette étude sont caractérisés par des essais normalisés, entre autres : l'analyse granulométrique pour le sable et les graviers, le degré de propreté pour le sable, la détermination des masses volumiques absolues et apparentes pour le sable et les graviers, l'essai Los Angeles pour le gravier ainsi que la consistance, la prise et la masse volumique absolue pour le ciment.

2.3.1 Analyse Granulométrique

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique effectué selon la norme NF EN 933-1 par la voie sèche. L'échantillon de masse préalablement séchée a été tamisé à travers une série de tamis. Dans cette section nous présentons respectivement le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, l'appareillage ainsi que l'expression des résultats [5].

i. But

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. 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.

iii. Mode opératoire

- 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 μ m ; 400 μ m ; 315 μ m ; 250 μ m ; 160 μ m ; 125 μ m ; et 80 μ m)

- Introduire l'échantillon de Masse M_s sur le tamis de la colonne, après l'avoir lavé et passé à l'étuve pendant 24 heures à 105°C ;
- Mettre en place le couvercle ;
- Fixer la colonne des tamis sur le vibrotamis ;
- Tamiser de manière discontinue ;
- Peser les refus cumulés des tamis, en commençant par celui du tamis supérieur ;
- Exprimer les refus cumulés par rapport à la masse initiale M_s , et déduction des pourcentages des tamisât cumulés.

iv. Appareillage

Pour effectuer cet essai nous avons besoin des tamis ; une balance, des récipients ; le vibrotamis ou la tamiseuse (voir figure 2-1).



Figure 2-1 Une colonne de tamis pour l'analyse granulométrique et une tamiseuse électrique

v. 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 tamisâts cumulés en pourcentage, notés P_j (%). La valeur du module de finesse est définie selon la norme XP P 18-540 par la relation 2-1 :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% de tamis} (0,16 - 0,063 - 1,25 - 5\text{mm}) \quad (2-1)$$

vi. Interprétation des résultats

Pour interpréter la courbe granulométrique nous nous basons sur les relations 2-2 et 2-3.

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

$$C_z = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2-3)$$

Avec :

- C_u : le coefficient d'uniformité
- C_z : le coefficient de courbure
- D_{10} : est le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée de 10% ;
- D_{30} : est le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée de 30% ;
- D_{60} : est le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée de 60% ;

D'une part, si $C_u \geq 2$: la granulométrie est étalée ; $C_u \leq 2$: nous disons que la granulométrie est serrée ; d'autre part, si $1 < C_z < 3$, le granulat est bien gradué

2.3.2 Le degré de propreté de sable

Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai d'équivalent de sable qui est un essai normalisé NF EN 933-8 [5].

i. But

Le but de l'essai d'équivalent de sable est de déterminer le degré de propreté d'un sable. Il désigne la proportion du sable brut par rapport aux impuretés le contenant.

ii. Principe

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

iii. Mode opératoire

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

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

iv. Appareillage

Les éléments d'appareillage principaux sont deux éprouvettes gradués, dans lesquels sera répété de manière similaire l'essai, un piston avec un poids bien défini, et un agitateur automatique. Les éprouvettes sont en verre ou en plastique transparent, de hauteur 40 cm, munies d'un bouchon en caoutchouc et graduées.



Figure 2-2 *Equipement nécessaire pour l'essai d'équivalent de sable*

v. Expression des résultats

L'expression des résultats se fait à partir non seulement du tableau d'interprétation, mais aussi de la formule 2-4 :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \% \quad (2-4)$$

Avec :

- ES : Équivalent de Sable (%)
- h_2 : hauteur du sable propre seulement (cm)
- h_1 : hauteur du sable propre + éléments fins (cm)

Ce calcul est fait pour chacune des éprouvettes. Si les deux valeurs obtenues diffèrent de plus de 4, le mode opératoire d'essai doit être répété. L'équivalent de sable (ES) de l'échantillon testé est la moyenne des valeurs obtenues pour chaque éprouvette, arrondie au nombre entier le plus proche.

vi. Interprétation des résultats

À l'issue des résultats de l'essai d'équivalent de sable, celui-ci est classifié selon le degré de propreté qui par la suite règlemente son domaine d'utilisation selon le Tableau 2-1.

Tableau 2-1 Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable[5]

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour le béton de qualité.
$65\% \leq ES \leq 75\%$	$65\% \leq ES \leq 75\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.

$75\% \leq ES \leq 85\%$	$70\% \leq ES \leq 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant pour les bétons de haute qualité.
$ES > 85\%$	$ES > 80\%$	Sables très propres. L'absence presque totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

2.3.3 Masse volumique apparente des granulats

La masse volumique apparente d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci, en tenant compte des vides le constituant. La masse volumique apparente est déterminée par un essai normalisé NF P 18-555 [4].

i. But

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

ii. Principe

Le principe de l'essai de détermination de masse volumique apparente se résume au remplissage d'une mesure de 1m³ par les granulats secs afin d'en déduire sa masse par unité de volume.

iii. Mode opératoire

Le mode opératoire suivie dans la détermination de la masse volumique apparente est conforme aux prescriptions de la norme NF P 18-555 (1990).

Il se présente comme suit :

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

iv. Appareillage

L'essai nécessite les éprouvettes graduées, un tamis de maille de dimension 2mm, une balance électrique de précision.

v. Expression des résultats

La masse volumique apparente est le rapport entre la masse sèche du matériau obtenu et le volume du récipient et elle est obtenue par la formule 2-5 :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (2-5)$$

Avec :

ρ_{app} : La masse volumique apparente en g/cm³ ;

M : la masse sèche du matériau en g ;

V : le volume du récipient en cm³

2.3.4 Masse volumique absolue des granulats

La masse volumique absolue d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci, sans tenir compte des vides le constituant. La masse volumique absolue est déterminée par un essai normalisé NF P 18-555 [4].

i. But

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

ii. Principe

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

iii. Mode opératoire

La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats secs, d'environ 300g de masse sèche notée Ms. Le mode opératoire suivi est conforme à la norme NF P 18-555 (1990). L'essai a consisté à :

- L'introduction d'une quantité V1 d'eau dans une éprouvette graduée ;
- L'introduction des granulats secs de masse Ms dans l'éprouvette graduée contenant de l'eau ;
- Elimination des bulles d'air
- Saturation des granulats dans l'éprouvette (au moins 24 heures)
- Prise du volume V2 correspondant

iv. Appareillage

L'essai nécessite les éprouvettes graduées, un tamis de maille de dimension 2mm, une balance électrique de précision.

v. Expression des résultats

La masse volumique absolue est calculée selon la formule 2-6 :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2-6)$$

Avec :

ρ : La masse volumique absolue ;

M : La masse sèche du matériau en gr ;

V1 et V2 : La lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du granulat en m^3

2.3.5 Essai los Angeles

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat [5].

i. But

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

ii. Principe

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire

- 4/6,3 mm
- 6,3/10 mm
- 10/14 mm
- 10/25 mm
- 16/31,5 mm et
- 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

iii. Mode opératoire

- Introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, faire opérer la machine de Los Angeles.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr/min et 33tr/min.
- Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus du bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm, égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à une masse constante.
- Peser ce refus une fois séché. Soit P le résultat de la pesée avec, voir la relation 2-7 :

$$P = 5000 - Refus \quad (2-7)$$

Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation 2-8 :

$$L_A = 100 \left(\frac{P}{5000} \right) \quad (2-8)$$

Avec :

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

Le tableau 2-2 donne l'estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient LA.

Tableau 2-2 Estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient LA[5]

Coefficient LA (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

iv. Appareillage

- La machine Los Angeles ;
- Un jeu de tamis 1,6 - 4 -6,3 -10 -14mm
- Des bacs et des truelles

La figure 2-3 montre la machine Los Angeles permettant de déterminer la dureté des granulats en fonction du coefficient Los Angeles.



Figure 2-3 Machine Los Angeles utilisée.

2.3.6 Essai de Consistance

La consistance normale du ciment est déterminée par l'essai normalisé (NF EN 196-3, Août 1995) [5].

i. But

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

ii. Principe

Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10 mm, selon la norme (NF EN 196-3, Août 1995). La pâte est composée de ciment et d'eau. On définit le rapport E/C ou C/E qui permet de définir une pâte de consistance normale, c'est-à-dire ni trop, ni trop peu d'eau. On mesure l'enfoncement d'une sonde amovible de diamètre 10 mm, fixée à la partie mobile de l'appareil de Vicat dont la masse totale est de 300 g, dans une pâte de ciment maintenue dans un moule tronconique. L'enfoncement est fonction de la consistance de la pâte, on parle de consistance normale lorsque la sonde s'immobilise au plus tard 30 secondes après l'avoir lâchée à une distance de 6 ± 1 mm du fond du moule. Si cette distance n'est pas atteinte, il convient de modifier le rapport E/C ou C/E afin d'obtenir la consistance normale.

iii. Mode opératoire

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

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

- Si $d < 5$ mm, recommencer avec 1 % d'eau en moins
- Si $d > 7$ mm, recommencer avec 1 % d'eau en plus

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

2.3.7 Essai de Prise

La prise du ciment est déterminée par l'essai normalisé appelé l'essai de prise (NF EN 196-3, Août 1995) consistant à déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons [4].

i. But

Le but est de mesurer le temps de prise du ciment à l'aide de l'appareil de Vicat, autrement dit, le temps qu'il faut pour qu'il se solidifie. Pour cela on mesurera l'enfoncement de l'aiguille dans le ciment, du temps de gâchage et le temps de début de prise. L'appareil de Vicat est utilisé à la fois à la mesure du temps de début et de fin de prise.

ii. Mode Opérateur

Pour cet essai, l'appareil de Vicat doit être muni de son aiguille de Vicat :

- Abaisser l'aiguille jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte ;
- Libérer les parties mobiles ;
- Noter la valeur « d » indiquée par l'index ;
- Répéter l'essai sur la même pâte, à des positions espacées de plus de 10 mm des bords du moule à des intervalles de temps réguliers ;
- Noter, à 5 minutes près, le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bord duquel la valeur « d » est de $4 \pm 1 \text{ mm}$ comme temps 1 : temps de début de prise de ciment.
- Pour évaluer la fin de prise, L'appareil de Vicat doit être muni de son aiguille de fin de prise. La procédure ci-dessous doit être respectée.
- Retourner le moule sur sa plaque ;
- Remplacer l'aiguille de Vicat par l'aiguille de fin de prise ;

- Noter, à 15 minutes près, le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel l'aiguille ne pénètre plus qu'à 0,5 mm, c'est le temps 2 : temps de fin de prise.

2.3.8 Masse volumique absolue du Ciment

La masse volumique absolue du ciment est déterminée par un essai normalisé. Le mode opératoire inclut les actions ci-après [5] :

- Introduire la solution dans le pycnomètre jusqu'au premier trait repère, noté $V_1 = 0$ ml ;
- Peser le pycnomètre contenant la solution, noté M_1 en gramme ;
- Introduire 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 du ciment (g/cm^3) à l'aide de la relation 2-9 :

$$\rho_s = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (2-9)$$

2.4 Formulation du béton

Dans cette section nous présentons le choix de la méthode de formulation, le principe de la formulation selon Dreux-Gorisse pour finir par les étapes de formulation.

2.4.1 Choix de la méthode

Pour la formulation du béton, il existe plusieurs méthodes, comme la méthode des abaques de Dreux Gorisse, la méthode d'Abram, la méthode de Bolomey et la méthode Faury. Parmi toutes ces méthodes, le choix dans ce travail, est porté sur la méthode de Dreux- Gorisse.

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

béton conforme et/ou de bonne qualité. Elle approche de façon significative les paramètres influant sur la résistance, l'ouvrabilité et le volume. Mais cela reste une approche, une approximation de la réalité que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux.

2.4.2 Principe de formulation

Le principe de formulation selon Dreux-Gorisse consiste à déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier des charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S et gravier G en kg/m³).

2.4.3 Etapes de la formulation et établissement du cahier des charges

Il s'agit de définir, en fonction du type d'ouvrage à réaliser, les paramètres nécessaires à la mise en œuvre du béton et à la stabilité à court et à long termes de l'ouvrage. Les paramètres principaux devant être définis sont :

a) Pour le béton

- f_{c28} : la résistance en compression visée du béton
- A : Ouvrabilité du béton

b) Pour le ciment

- La classe du ciment
- σ'_{c28} : la classe vraie du ciment
- Masse volumique du ciment

c) Pour les granulats

- La masse volumique absolue
- La masse volumique apparente
- Éventuellement la teneur en eau des granulats
- La dimension maximale D du plus gros granulat

2.4.4 Quelques données de base pour l'obtention de la formulation théorique du béton

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton.

a. Rapport C/E

Le rapport C/E est déterminé par la formule de Dreux-Gorisse selon la relation 2-11 :

$$f_c = 1,15 f_{c28} = G \cdot \sigma_{c28} \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2-11)$$

Avec :

f_{cm} : résistance en compression majoré (15%) de f_{c28} ;

f_{c28} : Résistance en compression à 28 jours du béton ;

σ_{c28} : Classe vrai du ciment à 28 jours ;

G : Coefficient granulaire ;

C : Dosage en ciment ;

E : Dosage en eau ;

De ce qui précède, nous trouvons facilement le rapport $\frac{C}{E}$ par la relation 2-12 :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \cdot \sigma_{c28}} + 0,5 \quad (2-12)$$

Le tableau 2-3 nous donne les valeurs du coefficient granulaire G en fonction de la qualité des granulats.

Tableau 2-3 Valeurs du coefficient granulaire G en fonction de la qualité des granulats[5]

Qualité des granulats	Granulats fins ($D_{max} < 16mm$)	Granulats moyens ($25 < D_{max} < 40mm$)	Gros granulats ($D_{max} > 63mm$)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,60
Passable	0,35	0,40	0,45

b. Dosage en ciment

Le rapport C/E nous donne accès au calcul du dosage en ciment 'C'. Sachant l'affaissement A considéré dans les données, l'abaque ci-dessous contenant en abscisse le rapport C/E et en

ordonné l'affaissement A permet de déterminer les dosages en ciment qui sont sous forme des courbes équipotentielles.

La figure 2-5 permet d'évaluer la quantité C, en fonction du rapport ciment sur eau C/E et de la consistance exigée du béton.

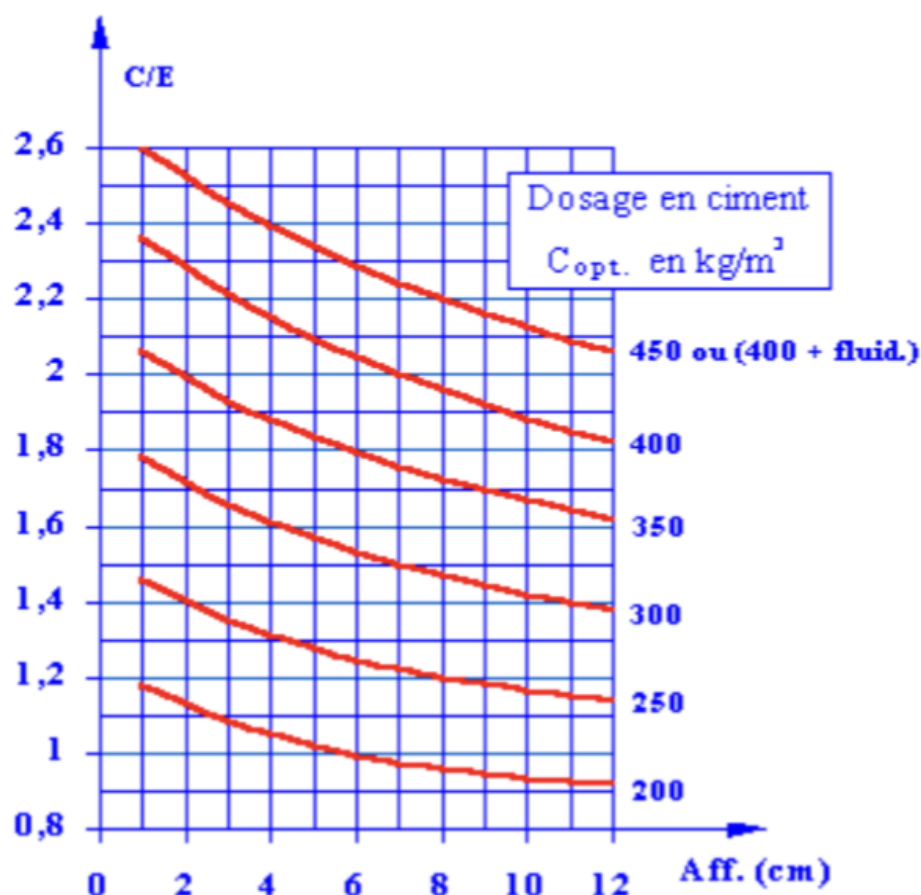


Figure 2-4 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'affaissement au cône).

c. Dosage en eau

Après avoir trouvé le dosage en ciment et sachant qu'ils sont liés par la valeur du rapport C/E, on en déduit la valeur du dosage en eau 'E' ; qui subira évidemment une correction en fonction de la taille du plus gros granulat D_{max}.

o Correction du dosage en eau

En effet, si les dimensions des granulats sont supérieures ou inférieures à celle considérer hypothétiquement. La méthode de Dreux-Gorisse prévoit des corrections sur le dosage en eau

en pourcentage pris soit en excès soit en défaut. Car plus les dimensions des granulats sont petites, la surface spécifique des grains augmente, et la plasticité équivalente aussi. Il faudra légèrement majorer le dosage en eau et inversement. Après la correction, nous retenons la valeur E qui prend en compte les dimensions des granulats.

Le tableau 2-4 nous donne les valeurs en pourcentage de la correction de E en fonction de la dimension maximale du gros granulat.

Tableau 2-4 Valeurs de la correction (en %) sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale « D » des granulats[5]

Dimension maximale des granulats en cm	5	10	15	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

d. Dosage des granulats

▪ **Traçage de la courbe granulaire de référence**

Une ligne brisée OAB représente la composition granulométrique optimale et cela sur un graphique d'analyse granulométrique de type AFNOR où :

- Le point 0 est situé à l'origine,
- Le point B est confondu avec le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat
- Le point A c'est le point de brisure ayant des coordonnées définies de la sorte :
 - ✓ Abscisse :
 - Si $D \leq 20$; l'abscisse est $n/2$.
 - Si $D \geq 20$, l'abscisse est située au milieu du segment limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à n.
 - ✓ Ordonnée : Elle est déterminée par la relation 2-13 :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25 D + K + K'} \quad (2-13)$$

Avec K et K' étant des coefficients correcteurs.

K dépend du dosage en ciment, de la qualité des granulats et du mode de vibration. Le tableau 2-5 présente les valeurs du coefficient K en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats.

Tableau 2-5 Valeurs du coefficient K en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats[5]

K	Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Granulat	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (Kg/m³)	400+	-2	0	-4	-2	-6	-4
	Fluidifiant						
	400	0	+2	-2	0	2	-2
	350	+2	+4	0	2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	200	+6	+8	+4	+6	+2	+4
Note : pour le béton pompé, on augmentera la plasticité en ajoutant un autre terme correcteur K'(K'=5 à 10 selon la plasticité voulue)							

Et pour déterminer la valeur de K', il suffit d'utiliser la relation 2-14 :

$$K' = 6Mf - 15 \quad (2-14)$$

Avec :

Mf : Module de finesse du sable.

Après avoir défini la courbe granulaire on trace la ligne de partage en reliant le point d'ordonnée 95% de la première courbe au point d'ordonnée 5% de la courbe suivante.

L'ordonnée du point d'intersection entre la ligne de partage et la courbe granulaire de référence indique les proportions respectives de chaque granulat.

▪ **Le dosage proprement dit**

La détermination du dosage en granulats s'effectue sur la base du coefficient de compacité (γ) qui est égal au rapport du volume absolu des matières solides sur volume total de bétons frais. Il est trouvé par la relation 2-15 :

$$\gamma = \frac{Vg + Vs + Vc}{Vt} \quad (2-15)$$

Avec :

Vg : Volume absolu de gravillons

Vs : Volume absolu du sable

Vc : le volume absolu du ciment

Vt : le volume total du béton frais.

Les valeurs de γ dépendent de la dimension « D » du plus gros granulat et de la consistance désirée du béton.

Le tableau 2-6 donne les valeurs du coefficient de compacité en fonction de la plasticité du béton, le mode de vibration, du dosage en ciment et de la dimension maximale des granulats.

Tableau 2-6 Valeurs du coefficient de compacité en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats[1]

Plasticité	Vibration	γ (Granulats roulés ; C=350Kg/m ³)					
		D=4	D=8	D=12,5	D=20	D=31,5	D=40
TP $A \leq 15$ 10 \leq	Puissante	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815
	Faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820
	Normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825
P $5 \leq 9$ \leq A	Puissante	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830
	Faible	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835
	Normale	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840
F $0 \leq 4$ \leq A	Puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,840	0,845
	Faible	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845
	Normale	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850
Correction sur γ	-0,01 (sable roulé, gravillon concassé)	Granulats légers -		En fonction du dosage en ciment : $\frac{C-350}{5000}$			
	-0,03 (sable et Gravillon concassé)	0,03					

Selon le dosage en ciment retrouvé, on effectue une correction car le tableau 2-6 est à un dosage de 350Kg/m³ pour le ciment.

Nous savons aussi, la relation 2-16 :

$$V = V_g + V_s \quad (2-16)$$

Si V est le volume du granulat, il en découle donc la formule 2-17 :

$$V = V_t \times \gamma - V_c \quad (2-17)$$

Pour la formulation, nous allons travailler avec 1m³ de béton, que l'on modifiera plus tard selon le volume prévu, ce volume est donné par la relation 2-18 :

$$V = 1000 \times \gamma - V_c \quad (2-18)$$

Les volumes absolus de gravillons, sable et ciment sont données par les relations 2-19, 2-20, 2-21, 2-22 :

$$V_s = V * S\% \quad (2-19)$$

$$S = V * S\% * \rho_s \quad (2-20)$$

$$V_G = V * G\% \quad (2-21)$$

$$G = V * G\% * \rho_G \quad (2-22)$$

Avec :

- V : Le volume total absolu des granulats
- S % : Les pourcentages en volume absolu de sable
- G % : Les pourcentages en volume absolu de gravier
- V_s : Les volumes de sable
- V_G : Les volumes des graviers
- S : La masse de sable
- G : La masse des graviers
- ρ_s : La masse volumique absolue du sable
- ρ_G : La masse volumique absolue des graviers

➤ **La formulation théorique proprement dite**

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, du ciment C et de gravier G.

La masse totale d'un mètre cube de béton est obtenue par la relation 2-23 :

$$\rho_{\text{beton}} = (E+C+S+G) \quad (2-23)$$

Avec :

- $\rho_{\text{béton}}$: La masse totale d'un mètre cube de béton ;
- E : La quantité d'eau ;
- C : La quantité du ciment ;
- S : La quantité du sable ;
- G : La quantité des graviers ;

Cette formulation étant théorique, nous aurons à effectuer des essais au laboratoire pour tester et corriger cette dernière avant de l'utiliser.

2.5 Formulation à base de la méthode tabulaire

La méthode de composition prescrite, également appelée méthode tabulaire, repose sur l'utilisation de tableaux de dosage standardisés pour la formulation du béton. Ces tableaux sont élaborés à partir de nombreuses expérimentations et sont généralement publiés dans des guides techniques ou des normes comme NF EN 206, NF P 18-305 et d'autres documents similaires. Cette méthode est largement utilisée dans les projets où la simplicité et la rapidité de mise en œuvre priment, notamment dans des zones où les ressources techniques pour des études détaillées sont limitées.

2.5.1 Mode opératoire

Le premier paramètre à déterminer est le dosage en ciment du béton (par exemple, 350 et/ou 400) en fonction des exigences structurelles. À partir des proportions, on calcule les quantités réelles des matériaux nécessaires pour 1 m³ de béton, tout en tenant compte de la masse volumique des granulats [6].

Les proportions des matériaux sont extraites directement des tableaux, où le dosage du ciment est souvent exprimé en kg/m³ et les granulats en pourcentage ou en volume. Le dosage pour certaines applications du Béton est donné dans le tableau 2-7.

Tableau 2-7 Calcul du dosage pour 1m³ [6].

Application	Ciment	Gravier	Sable	Eau
Béton de fondation	350 kg	1050 kg	800 kg	175 L
Dallage béton	300 kg	1100 kg	830 kg	155 L
Béton armé	400 kg	980 kg	720 kg	195 L

2.6 Caractérisation du béton

La détermination des caractéristiques du béton a été effectuée par l'essai d'ouvrabilité et celui de compression. Nous allons présenter en donnant en détail ces essais.

2.6.1 Caractérisation du béton à l'état frais

I. L'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité est, en effet, la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise, avant que le matériau ne durcisse, la fluidité du béton et se fait suivant la norme NF EN 12350-2 [5].

a. But de l'essai

Le but de l'essai est de quantifier la maniabilité (ouvrabilité) qui est une qualité, évolutive dans le temps, du béton avant prise. Les essais de consistance classent les bétons suivant une échelle de fluidité croissante : ferme, plastique, fluide.

b. Principe de l'essai

Le principe de l'essai d'ouvrabilité du béton consisté à mesurer l'affaissement à l'aide du cône d'Abrams.

c. Mode opératoire

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;

- Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- Le cône est arasé avec une tige ;
- Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler ;
- L'affaissement du béton frais est mesuré.

d. Appareillage

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- La plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;
- Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm. Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams;
- Une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.

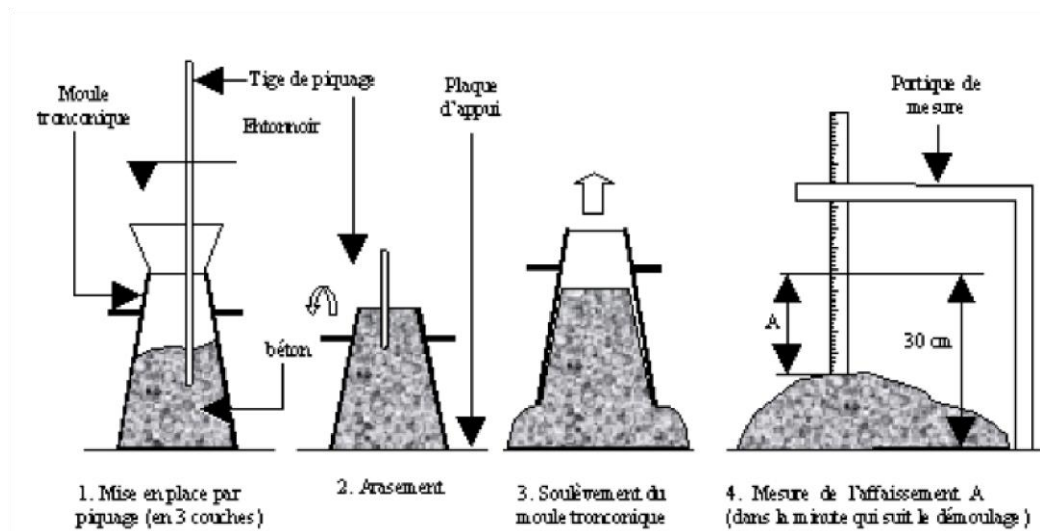


Figure 2-5 Illustration de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

2.6.2 Caractéristique du béton à l'état durci

I. L'essai de compression

L'essai de compression mesure la résistance à la compression du béton sur une presse à béton suivant un protocole normalisé. Dans cette section nous allons présenter le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage [5].

a. But de l'essai

Le but de l'essai est de déterminer la résistance à la compression de l'éprouvette de béton.

b. Principe de l'essai

Comme pour le mortier, l'essai de compression sur le béton consiste à soumettre une éprouvette, placée entre les plateaux d'une presse à mortier, à deux forces axiales opposées.

c. Mode opératoire

- Préparation et positionnement des éprouvettes en essuyant toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.
- Positionner les éprouvettes de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou du diamètre pour les éprouvettes cylindriques.
- Avec des machines d'essai à deux colonnes, il convient de placer la surface moulée des éprouvettes cubiques en face de l'un des montants.
- Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette, la vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 0.5 MPA/s, avec une tolérance de ± 0.20 Mpa/s.

d. Appareillage

La machine d'essai est une presse de force, conforme aux normes NFP 18-411. Les plateaux ou contre plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celle des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

e. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de la résistance en compression du béton sont obtenus à l'aide de la relation 2-24 :

(2-24)

Avec :

$$R_{cj} = \frac{F}{A}$$

- ✓ R_{cj} : Résistance à la compression à j jours (en MP_a ou en N/mm^2)
- ✓ F : Valeur de la charge de rupture (en N)
- ✓ A : section de l'éprouvette cylindrique (en mm^2)

2.7 Préparation des éprouvettes

Dans cette partie, nous présenterons comment la préparation des éprouvettes se feront, la matière première sera mélangée pour obtenir un mélange homogène. Des moules seront remplis par le béton qui sera confectionner et formerons des éprouvettes sous forme des cylindres 160x320 mm conformes à la norme NF EN 12390-2.

Pour notre travail portant sur : **l'étude comparative des propriétés mécaniques du béton à composition prescrite et celui à composition méthodique** ; où nous traitons sur le béton ordinaire dosé à 350 et 400, considéré comme étant le plus utiliser dans notre région ; nous aurons à confectionner 3 éprouvettes pour chaque tranche d'âge.

2.8 Conclusion partielle

De la description des matériaux utilisés à la caractérisation des bétons d'étude, ce chapitre met en évidence respectivement : tous les essais de caractérisation des matériaux, les méthodes utilisées dans la formulation des bétons d'étude, d'une part la méthode de composition méthodique (avec celle de Dreux-Gorisse) et d'autre part celles de composition tabulaire (prescrite) et enfin les essais de caractérisation des bétons d'études.

Chapitre 3

Présentation et interprétation des résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre présente et interprète les résultats obtenus lors des divers essais réalisés en laboratoire. Sont abordés notamment les résultats des caractérisations des constituants, incluant les masses volumiques des matériaux, l'analyse granulométrique des granulats, l'essai de Los Angeles, l'équivalent de sable, la consistance et la prise du ciment, ainsi que les résultats de la formulation des bétons. Les caractéristiques des bétons d'étude, tant à l'état frais qu'à l'état durci, sont également discutées.

3.2 Présentation des résultats des essais d'identification des matériaux

Dans cette section il sera présenté les résultats d'essais d'identification des matériaux, entre autres : les masses volumiques des matériaux, l'analyse granulométrique des granulats, l'essai de Los Angeles, l'équivalent de sable, la consistance et la prise du ciment.

3.2.1 Résultat de l'identification du sable

Le sable utilisé est un sable roulé d'Idjwi de classe 0/5. Dans les lignes qui suivent, se trouve la présentation des caractéristiques de ce type des sables : Le degré de propreté, les essais de détermination des masses volumiques, l'analyse granulométrique constituent les caractéristiques qui ont été déterminées pour notre sable.

I. Résultats de l'analyse granulométrique du sable

La Figure 3-1 présentent la courbe de l'analyse granulométrique du sable roulé d'idjwi de classe 0/5.

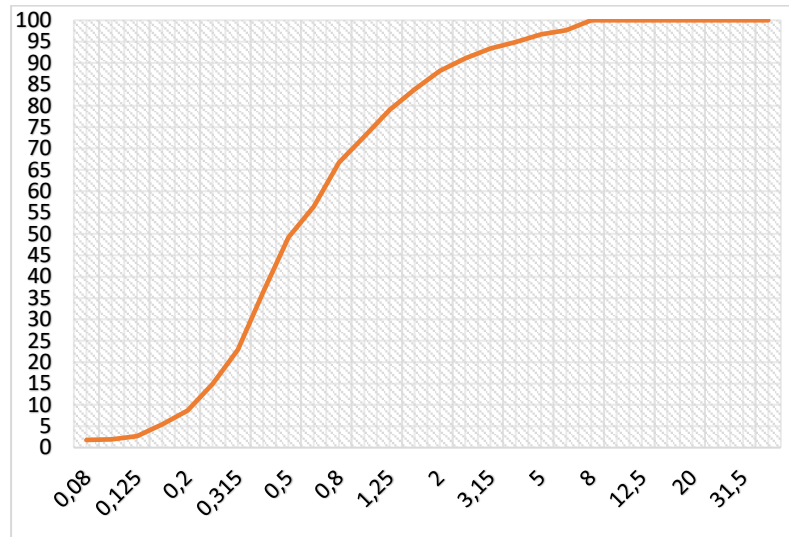


Figure 3-1 courbe de l'analyse granulométrique du sable

Les valeurs du coefficient d'uniformité ainsi que celles du coefficient de courbure sont respectivement : $C_u = 4$ et $C_z = 1$; l'interprétation de ces valeurs montre que nous sommes en présence d'un sable à granulométrie étalée et bien graduée. Le module de finesse obtenue était de 2,5026. Valeur comprise entre 2,2 et 2,8 ; d'où le sable était bon pour la confection du béton.

II. Le degré de propreté du sable

L'équivalent de sable a été déterminé à partir de la norme NF P 18-598 et a pour valeur 94,53%. Il advient que ce sable est très propre.

Le Tableau 3-1 présente les résultats de degré de propreté du sable.

Tableau 3-1 Résultat de degré de propreté du sable

Essai	Es à vue	Es à piston	Moyenne en %
Equivalent sable	96,62	92,45	94,53

Comme ES est supérieur à 80, ce sable est très propre : cela veut dire 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 [5].

III. Résultats des essais de détermination des masses volumiques

Les résultats des essais de détermination de la masse volumique absolue et apparente du sable sont présentés dans le Tableau 3-2. Ces résultats sont obtenus à partir de la relation 3-5 pour la masse volumique absolue et de la relation 3-4 pour la masse volumique apparente.

Tableau 3-2 Résultats des essais de détermination de la masse volumique absolue et apparente du sable

Matériaux	Masse volumique absolue en g/cm ³	Masse volumique apparente en g/cm ³
Sable roulé	2,727	1,377

3.2.2 Le résultat de l'identification du Gravier

Les masses volumiques, l'analyse granulométrique et l'essai Los Angeles constituent les essais qui ont été effectués pour déterminer les caractéristiques des graviers concassés 15/25mm.

I. Résultat de l'analyse granulométrique du Gravier

La Figure 3-2 présentent la courbe de l'analyse granulométrique du Gravier concassé de classe 15/25.

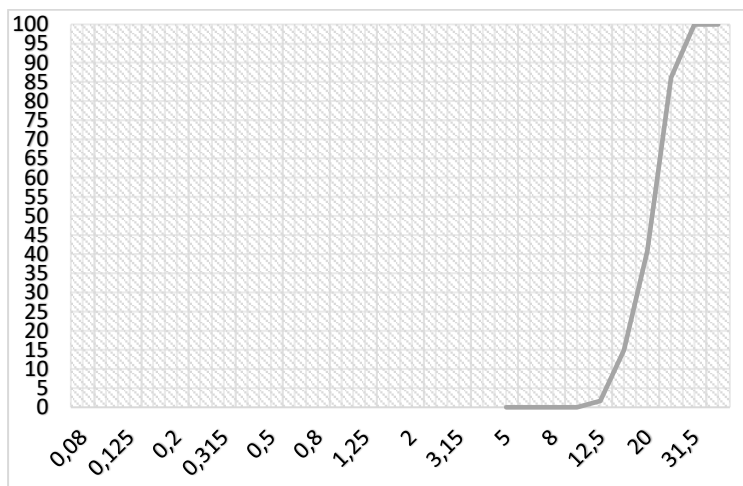


Figure 3-2 courbe de l'analyse granulométrique du Gravier

II. Résultats des essais de détermination des masses volumiques

Les résultats de l'essai de détermination de la masse volumique absolue et apparente sont présentés dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique absolue et apparente

Matériaux	Masse volumique absolue en g/cm ³	Masse volumique apparente en g/cm ³
Graviers concassés 15/25mm	2,727	1,216

La masse volumique absolue indiquée dans le Tableau 3-3 est de 2,727 g/cm³. Cette valeur est supérieure à 2 et inférieure à 3 ; d'où les graviers sont courants et donc destinés pour le béton courant.

III. Résultat de l'essai Los Angeles

La valeur à l'essai de Los Angeles obtenue est de 13,6%. Cette valeur étant inférieure à 45%, les granulats sont bons pour la confection du béton.

3.2.3 Les résultats de l'identification du Ciment

Dans cette section, nous présentons les différents résultats des essais effectués sur le ciment utilisé dans notre étude.

I. La Masse volumique absolue du Ciment

Le résultat obtenu lors de l'essai de la masse volumique absolue du ciment est donné dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 Masse volumique absolue du ciment

Matériaux	Masse volumique absolue en g/cm ³
Ciment de marque CIMERWA	3,01

II. La consistance normale

La consistance du ciment trouvée est de 6mm de hauteur avec 35% de quantité d'eau pour un échantillon de ciment de 500g.

3.2.4 Résultats de la formulation par la composition Méthodique

Dans cette section sont présentés les résultats de la formulation par la méthode de Dreux-Gorisse pour les deux dosages, en présentant notamment les données de base de la formulation et les différents dosages des constituants. Les figures 3-3 et 3-4 nous donnent une présentation graphique de la composition granulométrique du béton pour le dosage de 350 Kg et 400 Kg.

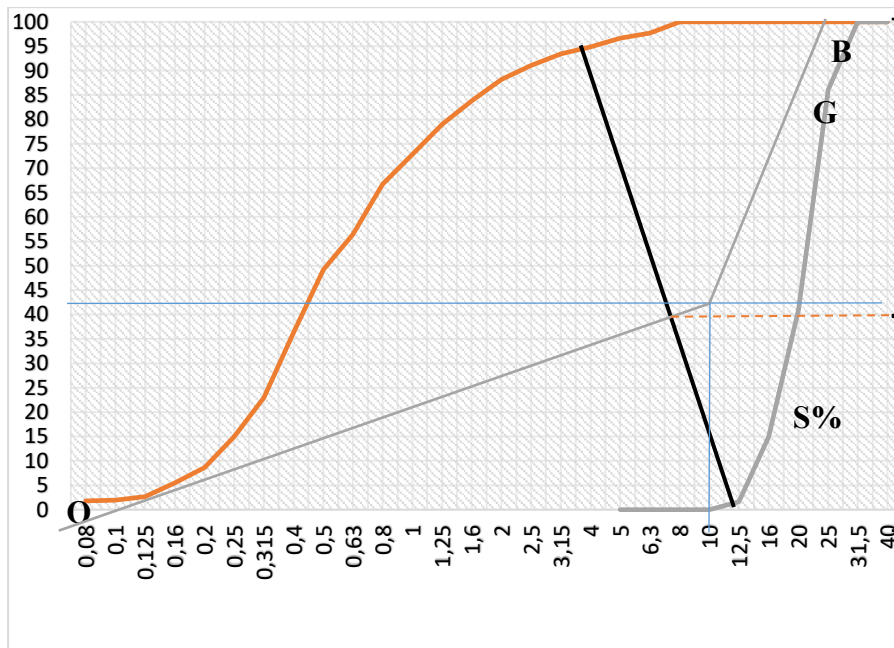


Figure 3-3 courbe de la composition granulométrique du Béton dosé à 350 Kg/m³

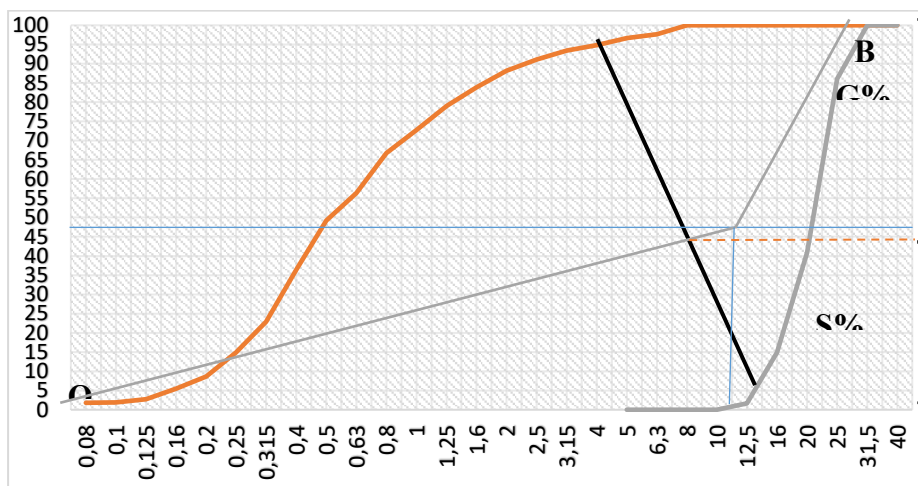


Figure 3-4 courbe de la composition granulométrique du Béton dosé à 400 Kg/m³

À la vue de la figure 3-3 et 3-4, il se fait remarquer que pour le béton dosé à 350 kg de Ciment ; le sable entre dans la composition à 43% et les graviers à 57% et Pour le béton dosé à 400 kg de Ciment ; le sable entre dans la composition à 42% et les graviers à 58%.

i. Données de base

Le tableau 3-5 représente les données qui seront utilisées pour la confection du béton.

Tableau 3-5 Données de base pour la formulation

Données	Valeurs
Résistance souhaitée (σ_n')	20 Mp
Résistance vraie du ciment	37
Coefficient Granulaire (G)	0,5
Dmax	25 mm
Qualité des granulats	Courant
Consistance	Plastique

ii. Détermination du rapport C/E

Avec un béton de :

- Coefficient granulaire $G = 0,5$ (valeur obtenue grâce au tableau 9)
- $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$
- $\sigma'_{28} = 37 \text{ MPa}$

Selon la formule (3-12) : $C/E = 1,74$

iii. Détermination des dosages en eau E

Avec $C/E = 1,74$:

→ Pour un béton dosé à 350 kg/m³ de Ciment :

$$E = 201,14 \text{ kg/m}^3$$

→ Pour un Béton dosé à 400 kg/m³ de Ciment :

$$E = 229,88 \text{ kg/m}^3$$

Comme D_{max} est égal à 25 mm, alors la correction sur le dosage en eau (%) $Er = 0$

iv. Détermination des dosages en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide des proportions du sable et graviers obtenues à partir de la courbe de référence OAB. Dans le Tableau 3-6 sont repris les coordonnées de la courbe de référence

Désignations	Béton dosé à 350 kg de Ciment			Béton dosé à 400 kg de Ciment		
	O	A	B	O	A	B
X (mm)	0,08	11,5	25	0,08	11,5	25
Y (%)	0	46,42	100	0	44,42	100

Tableau 3-6 *Coordonnée de la courbe de référence OAB*

- Pour le béton dosé à 350 kg de Ciment ; le sable entre dans la composition à 43% et les graviers à 57%.
- Pour le béton dosé à 400 kg de Ciment ; le sable entre dans la composition à 42% et les graviers à 58%.

Ces pourcentages sont exprimés en fonction de 100% des granulats. De ce fait les dosages massiques des granulats pour un m³ de béton sont repris dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7 *Dosage massique des granulats pour la composition methodique*

Désignation	Béton dosé à 350 kg de Ciment	Béton dosé à 400 kg de Ciment
	Dosage massique (Kg/m ³)	
Sable	815,809	789,264
Graviers	1081,421	1089,936

3.3 Résultats de la formulation selon la composition prescrite

Les résultats pour les différents dosages massique des constituant selon la composition tabulaire sont représenter dans le tableau 3-8.

Tableau 3-8 *Dosage massique des granulats pour la composition tabulaire*

Désignation	Béton dosé à 350 kg de Ciment (kg/m ³)	Béton dosé à 400 kg de Ciment (kg/m ³)
Ciment	350	400
Sable	800	830

Gravier	1050	980
Eau	175	195

3.4 Caractérisation du Béton à l'état durci

Les éprouvettes cylindriques 16*32 confectionnées dans cette étude par les deux compositions : d'une part la composition méthodique (par la méthode de Dreux G.) et d'autre part la composition Tabulaire ; ont été soumises à un essai de la résistance à la compression, après 28 jours d'immersion dans l'eau, dont les résultats sont présentés dans cette section.

3.4.1 Résistance à la compression du Béton formulé selon la composition Méthodique

Le Tableau 3-9 présente les résultats de l'essai de la résistance à la compression du béton formulé à partir de la composition méthodique (par la méthode de Dreux-Gorisse)

Tableau 3-9 Valeurs de la résistance à la compression pour la composition méthodique

Dosages	Ages (jours)	Masse (kg)	Force appliquée (KN)	Résistance moyenne R_{cj} (MPa)
350 kg/m ³	7	14.813	242.768	12.074
	21	14.550	283.150	14.088
	28	14.538	323.691	16.10
400 kg/m ³	7	14.382	266.153	13.238
	21	14.673	316.611	15.747
	28	14.463	354.87	17.65

L'évolution des résistances montre une croissance régulière avec le temps de cure. Toutefois, même à 28 jours, les résistances obtenues (maximum de 17,650 MPa) restent inférieures à la résistance minimale recommandée de 20 MPa pour un béton courant, avec un déficit d'environ 11,75 %. Le tableau 3-10 présente la densité apparente des éprouvettes avec leur résistance moyenne à la compression.

Tableau 3-10 *la densité apparente des éprouvettes et résistance moyenne à la compression pour la composition méthodique*

Dosage (kg/m³)	Âge (jours)	Densité (kg/m³)	Résistance Rcj (MPa)
350	7	2302.31	12.074
	21	2261.43	14.088
	28	2259.57	16.10
400	7	2259.57	13.238
	21	2280.55	15.747
	28	2247.91	17.650

Le tableau 3-10 met en relation la densité apparente des éprouvettes avec leur résistance moyenne à la compression. On observe que les densités varient légèrement autour de 2250–2300 kg/m³, ce qui reste cohérent avec les valeurs attendues pour un béton courant. La figure 3-5 donne l'histogramme représentant les variations des résistances à la compression (Rcj) en fonction des âges du béton pour les deux dosages.

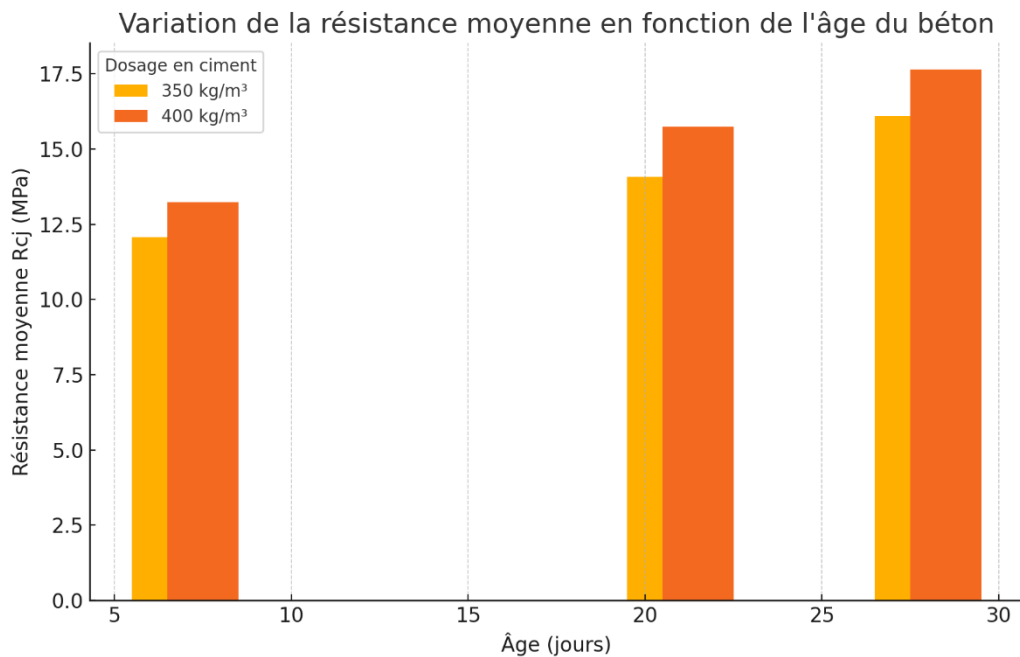


Figure 3-5 variations des résistances à la compression (R_{cj}) en fonction des âges du béton pour la composition méthodique

Ici on voit clairement que : La résistance augmente avec le temps pour chaque dosage et le béton dosé à 400 kg/m³ est systématiquement plus résistant que celui dosé à 350 kg/m³, à tous les âges. Cela met en évidence l'impact positif de l'augmentation du ciment sur les performances mécaniques du béton formulé selon la composition méthodique.

3.4.2 Résistance à la compression du Béton formulé selon la composition Tabulaire

Le Tableau 3-11 présente les résultats de l'essai de la résistance à la compression du béton formulé à partir de la composition Tabulaire

Tableau 3-11 Valeurs de la résistance à la compression pour la composition tabulaire

Dosages	Ages (jours)	Masse (kg)	Force appliquée (KN)	Résistance moyenne R_{cj} (MPa)

350 kg/m³	7	14.500	242.959	12.084
	21	14.636	286.874	14.268
	28	14.350	323.945	16.112
400 kg/m³	7	14.223	211.551	10.522
	21	14.049	258.377	12.851
	28	14.245	282.07	14.03

Les résistances obtenues par la méthode tabulaire évoluent progressivement entre 7 et 28 jours, mais demeurent largement inférieures à la plage normale de 20 à 40 MPa pour les bétons à usage courant. La résistance maximale atteinte à 28 jours est de 16,112 MPa, soit un déficit de 19,44 % par rapport au seuil minimal requis (20 MPa). En comparaison avec la méthode méthodique, qui a atteint 17,650 MPa pour le même dosage, la méthode tabulaire montre une performance légèrement inférieure, ce qui peut indiquer un manque d'optimisation dans l'ajustement des proportions de matériaux. Le tableau 3-12 présente la densité apparente des éprouvettes avec leur résistance moyenne à la compression.

Tableau 3-12 *la densité apparente des éprouvettes et résistance moyenne à la compression pour la composition tabulaire*

Dosage (kg/m³)	Âge (jours)	Densité (kg/m³)	Résistance Rcj (MPa)
350	7	2255,05	12.084
	21	2276,52	14.268
	28	2231,42	16.112
400	7	2212,60	10.522

	21	2185,85	12.851
	28	2215,71	14.03

Les densités apparente du béton à composition tabulaire oscillent entre 2185,85 et 2272,52 kg/m³, ce qui reste acceptable pour un béton courant. Cependant, on constate que même avec des densités raisonnables, la résistance reste nettement inférieure à la norme. Le dosage de 400 kg/m³ à 28 jours affiche une densité correcte (2215,71 kg/m³) mais une résistance décevante (14,03 MPa). Ces résultats soulignent l'intérêt de recourir à une formulation méthodique plus adaptée aux matériaux locaux. La figure 3-6 donne l'histogramme représentant les variations des résistances à la compression (R_{cj}) en fonction des âges du béton pour les deux dosages.

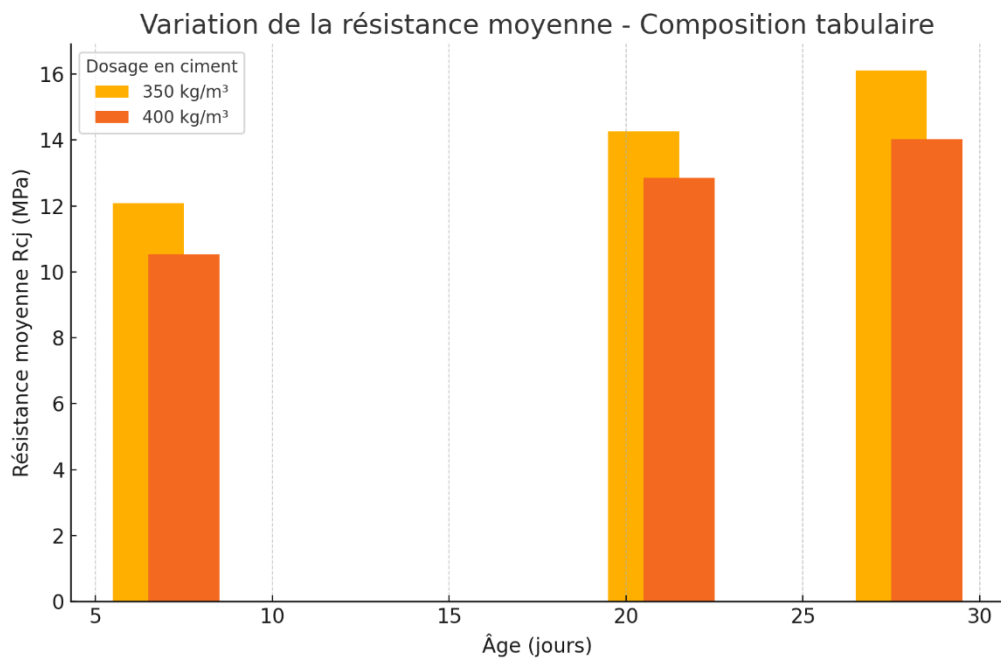


Figure 3-6 variations des résistances à la compression (R_{cj}) en fonction des âges du béton pour la composition tabulaire

Ici on constate que les résistances restent toutes inférieures au minimum de 20 MPa requis pour les bétons à usage courant, avec un écart de prêt de 19,44 % pour la valeur maximale atteinte. Comparativement à la composition méthodique, les résistances de la composition tabulaire sont légèrement inférieures, suggérant une formulation moins optimisée.

La figure 3-7 présente les résistances à la compression à 28 jours de quatre types de bétons, formulés selon deux composition (méthodique et tabulaire) et deux dosages en ciment (350 kg/m³ et 400 kg/m³).

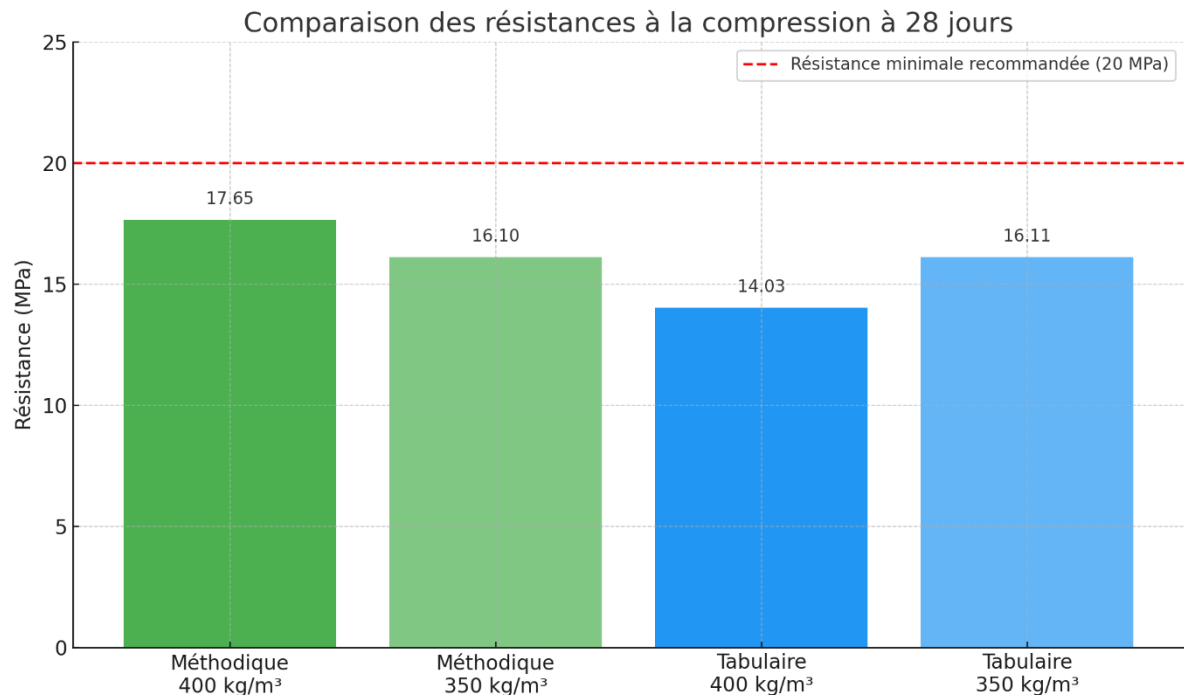


Figure 3-7 graphique comparatif des résistances à 28 jours

On observe que :

- La composition méthodique avec un dosage de 400 kg/m³ donne la meilleure performance avec une résistance de 17,65 MPa, supérieure de 25,8 % à celle de la méthode tabulaire pour le même dosage (14,03 MPa).
- Pour le dosage de 350 kg/m³, les deux méthodes donnent des résultats très proches, avec un léger avantage pour la méthode tabulaire (16,11 MPa contre 16,10 MPa en méthodique), mais l'écart est négligeable (0,087 %).

Le résultat montre que : la composition méthodique permet une meilleure maîtrise des paramètres, notamment du rapport Eau/Ciment, ce qui améliore la compacité et la résistance

du béton ; ces résultats suggèrent que, pour des projets exigeant des performances élevées, la composition méthodique est plus fiable et plus adaptée.

3.5 Conclusion partielle

Le présent chapitre a porté sur la présentation et l'interprétation des résultats obtenus lors des expérimentations au laboratoire. Tout au long de ce dernier, il a été question de présenter les résultats sur la caractérisation des matériaux utilisés, les résultats de la formulation du béton ainsi que les propriétés des bétons d'étude.

Conclusion Générale

Le béton est un matériau composite dont les propriétés dépendent de la nature, de la qualité et des proportions de ses composants. Le présent travail a porté sur une étude comparative des propriétés mécaniques d'un béton fait à base de la composition Tabulaire et celui à base de la composition méthodique.

La première phase de cette étude a permis de caractériser les matériaux intervenant dans la confection des bétons moyennant des essais entre autres : l'analyse granulométrique, l'essai d'équivalent de sable, les masses volumiques absolues et relatives (du sable et du gravier), l'essai Los Angeles, la prise du ciment et la consistance du ciment.

Après la caractérisation des constituants du béton, la formulation du béton a été effectuée pour la composition Méthodique (selon la méthode de Dreux-Gorisse) et pour la composition Tabulaire. Il sied de rappeler ici que la formulation a été à deux niveaux pour les deux compositions : d'une part un dosage de 350 kg/m³ et d'autre part 400 kg/m³.

La troisième phase de cette étude a consisté à caractériser les bétons d'étude (Cette caractérisation est passée par la détermination des propriétés des bétons d'étude à l'état durci). Les résultats obtenus après 28 jours de cure ont révélé que, pour un même dosage de 350 kg/m³, la composition tabulaire a présenté une légère supériorité avec une résistance de 16,112 MPa contre 16,10 MPa pour la composition méthodique, soit une différence de 0,087 % en sa faveur, En revanche, pour le dosage de 400 kg/m³, la composition méthodique s'est avérée nettement plus performante avec une résistance de 17,65 MPa contre 14,03 MPa pour la composition tabulaire, soit un écart de 25,8 % en sa faveur.

Ces résultats montrent que la méthode de formulation influe considérablement sur les performances mécaniques du béton, en particulier lorsque le dosage en ciment est élevé. Ils mettent aussi en évidence les limites de la composition tabulaire qui, ne tenant pas compte des caractéristiques spécifiques des matériaux locaux ni du rapport optimal Eau/Ciment, peut entraîner un excès d'eau, réduisant ainsi la compacité et la résistance du béton. Il ressort de cette étude qu'aucun des bétons formulés, quelle que soit la méthode, n'a atteint les valeurs de résistance recommandées pour un béton ordinaire (comprise entre 20 et 40 MPa), soulignant ainsi l'importance d'une formulation adaptée et optimisée en fonction des matériaux

disponibles. Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé deux formulations l'une selon la méthode tabulaire (prescrite) et l'autre selon la méthode méthodique en évaluant les performances du béton à travers des essais de compression sur éprouvettes cylindriques. En définitive, la composition méthodique, bien qu'exigeant plus de rigueur dans sa mise en œuvre, s'avère être une meilleure alternative pour atteindre des performances mécaniques plus élevées, surtout pour des bétons nécessitant une plus grande résistance, tandis que la composition tabulaire reste limitée du fait de son caractère standardisé.

Cette recherche présente cependant certaines limites : Seules deux valeurs de dosage (350 et 400 kg/m³) ont été testées, ce qui limite l'analyse des tendances sur une plage plus large ; La durabilité, l'économie et la performance à long terme n'ont pas été abordées ; Les essais ont été réalisés sans adjuvants, alors que ceux-ci peuvent influencer significativement l'ouvrabilité et la résistance du béton.

Comme recommandation pour des chercheurs futures, Afin de renforcer les conclusions de cette étude et d'améliorer la qualité des ouvrages en béton à Goma, plusieurs pistes peuvent être explorées : Étendre les tests à d'autres dosages et inclure des adjuvants (plastifiants, accélérateurs, etc.) ; Étudier l'effet de l'optimisation du rapport Eau/Ciment (E/C) sur les performances du béton ; Comparer les aspects économiques des deux méthodes de formulation.

Bibliographie

- [1] G. G. Jean FESTA, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, EYROLLES, 8ème Edition 1998, 48p
- [2] NF EN 12620+A1, *Granulats pour béton*, AFNOR, Juin 2008..
- [3] P. GUIRAUD., *Caractéristiques et types des granuts*..
- [4] G. MUHIWA, *Cours de physique et technologie du béton*, cours inédit, FSTA, ULPGL, 2020-2021.
- [5] G. MUHIWA, *Cours de laboratoire des matériaux*, cours inédit, FSTA, ULPGL, 2020-2021.
- [6] Tout sur le béton, "*Le calcul du dosage béton*". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.toutsurlebeton.fr>. [Accédé le : 23-Janv-2025].
- [7] Travaux béton, "*Le dosage du béton : calcul des quantités, infos*". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.travauxbeton.fr>. [Accédé le : 23-Janv-2025].
- [8] Fédération Calédonienne du Bâtiment et des Travaux Publics (FCBTP), *le béton : Guide des bonnes pratiques*. Nouvelle-Calédonie : FCBTP, 2019.
- [9] N. M. Mwamini, *INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAVIERS SUR LE BETON : CAS DES GRAVIERS COURAMMENT UTILISE*, GOMA: ULPGL/GOMA, 2022-2023.

Annexes

1. Composition granulométrique des graviers concassés 15/25

OUVERTURE (en mm) AFNOR	REFUS CUMULES CONCASSE 15/25			TAMISAT	REMARQUE
	(g)	Cumulés (en g)	%	%	
80				100	
63				100	
50				100	
40				100	
31,5				100	
25	397	397	13,233333	86,766667	
20	1376	1773	59,1	40,9	
16	779	2552	85,066667	14,933333	
12,5	399	2951	98,366667	1,633333	
10	0	2951	98,366667	1,633333	
8	0	0	0	100	
6,3	0	0	0	100	
5	0	0	0	100	
4	0	0	0	100	
3,15				100	
2,5				100	
2				100	
1,6				100	
1,25				100	
1				100	
0,8				100	
0,63				100	
0,5				100	
0,4				100	
0,315				100	
0,25				100	
0,2				100	
0,16				100	
0,125				100	
0,1				100	
0,08				100	
TOTAL	2951				

2. Composition granulométrique du sable roulé 0/5

N° TAMIS		OUVERTURE (mm)		Refus	Refus cum		Tamisât
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	(g)	%	%
1/4''	39	6.35	6.3	70	70	2,33	97,67
3/16''	38	4.76	5	30	100	3,33	96,67
5	37	4	4	54	154	5,13	94,87
6	36	3.36	3.15	44	198	6,60	93,40
8	35	2.38	2.5	70	268	8,93	91,07
10	34	2	2	87	355	11,83	88,17
12	33	1.68	1.6	131	486	16,20	83,80
16	32	1.19	1.25	144	630	21,00	79,00
18	31	1	1	184	814	27,13	72,87
20	30	0.84	0.8	184	998	33,27	66,73
30	29	0.59	0.63	310	1308	43,60	56,40
35	28	0.5	0.5	216	1524	50,80	49,20
40	27	0.4	0.4	385	1909	63,63	36,37
50	26	0.315	0.315	403	2312	77,07	22,93
60	25	0.25	0.25	240	2552	85,07	14,93
70	24	0.2	0.2	188	2740	91,33	8,67
100	23	0.16	0.16	96	2836	94,53	5,47
120	22	0.125	0.125	83	2919	97,30	2,70
140	21	0.1	0.1	23	2942	98,07	1,93
200	20	0.08	0.08	4	2946	98,20	1,80
		Fines	Fines	6	2952	98,40	1,60

3. Masse volumique apparente du gravier

Données	Tare 1	Tare 2	Tare 3	Tare 4
Volume du moule en cm^3	955,555	955,555	955,555	955,555
Masse du moule	4325	4325	4325	4325
Masse du moule + granulats	5596	5573	5584	5584
MOYENNE g/Cm^3	1,317			