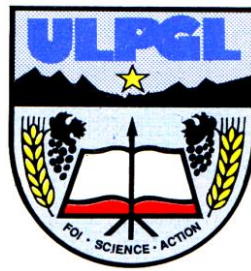


*Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les
Propriétés mécaniques des bétons.*

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES**

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

**ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA SUBSTITUTION PARTIELLE DU
CIMENT PAR LA POUDRE DES POUZZOLANES NATURELLES SUR
LES PROPRIETES MECANQUES DES BETONS**

Par REGIZE BANYANGA Keza

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

Orientation : *Structures et Ouvrages d'Arts.*

Directeur : *Prof. Dr. Ing. François NGAPGUE*

Encadreur : *Ass. Ir. GABRIEL KASHALA Djibril*

ANNEE ACADEMIQUE 2020 - 2021

EPIGRAPHE

« Le motif le plus important du travail à l'école, à l'université, dans la vie, est le plaisir de travailler et d'obtenir, de ce fait, des résultats qui serviront à la communauté »

Albert Einstein

DEDICACES

A mes parents Laurent BANYANGA et Jacqueline NTAWIRINDA

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail n'est pas le résultat de nos seules propres forces mais plutôt des efforts conjugués de plusieurs personnes à qui nous devons la profonde gratitude.

Nos profonds remerciements s'adressent tout d'abord à l'Eternel Dieu tout puissant qui n'a cessé de faire des merveilles pour nous.

Nos sentiments de profonde gratitude s'adressent au professeur NGAPGUE François qui a accepté de diriger ce travail et à l'assistant Ingénieur GABRIEL KASHALA Djibril pour son encadrement de mérite.

Nos grandes reconnaissances s'en valent aux autorités académiques de l'ULPGL, et plus particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées, Département de Génie civil pour leurs efforts fournis ainsi que pour avoir accordé le laboratoire pour y effectuer les différents essais nécessaires pour l'élaboration du présent travail, qu'elles trouvent ici leur couronnement.

Nos sincères remerciements restent méritoires à nos très chers parents, Laurent BANYANGA et Jacqueline NTAWIRINDA pour leur affection, conseils, sacrifices et les encouragements qu'ils n'ont pas cessé de consentir pour la promotion de notre éducation et notre avenir.

Nous aimerions exprimer notre gratitude à nos ami(e)s, sœurs, frères, qui nous ont aidé à atteindre nos objectifs ; nous citons entre autres Espérance BANYANGA, Amani BANYANGA, Olivier BANYANGA, Emmanuel BANYANGA, Angel BANYANGA, Adeline BANYANGA, Alice BANYANGA, Benjamin BANYANGA.

Nous n'oublions pas tous nos amis et camarades de promotion qui ont été là tout au long de notre parcours, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Que toutes les connaissances qui n'ont pas été citées ne se sentent pas oubliées pour leur apport de tout genre qu'ils ont à notre égard ; qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

RESUME

La présente étude a pour but d'évaluer les caractéristiques et d'illustrer le potentiel des pouzzolanes volcaniques utilisées comme un matériau de substitution partielle du ciment dans la confection des bétons dans le but de réduire tant soit peu la production très polluante du ciment Portland et de valoriser les matériaux locaux comme la pouzzolane. Cette étude expérimentale vise à valoriser ce matériau présentant certaines propriétés similaire au ciment, ensuite l'utiliser dans la confection des bétons en différents pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%), afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment et le comportement mécanique des bétons. Les bétons d'études ont été formulés par la méthode des abaques de Dreux Gorisse avec le ciment NYATI 32.5, le sable lavé d'Idjwi et les graviers concassés de classes 5/15 et 15/25. Cela a permis de réaliser des éprouvettes de béton pour lesquelles une quantité de ciment est substituée partiellement par la poudre des pouzzolanes. Le béton testé à 28 jours a donné des résistances de 16,525 MPa ; 15,956MPa ; 13,958MPa; 12,773 MPa; 11,797MPa respectivement à 0 %, 5%, 10%, 15% et 20% de substitution de ciment. Ces résultats ont permis de conclure que la substitution du ciment par la poudre des pouzzolanes est possible jusqu'à 20%; car, à ce seuil, elle offre une moindre variation de la résistance à la compression.

Mots clés : Pouzzolane, Substitution, Résistance.

ABSTRACT

The purpose of this study is to assess the characteristics and illustrate the potential of natural pozzolan powder used as a partial replacement material for cement in the preparation of concretes with the aim of reducing somewhat the highly polluting production of Portland cement and to enhance the pozzolan powder. This experimental study aims to enhance this material having some properties of cement, then partially replace it in the preparation of concrete, in different percentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%), in order to ” study its effect on the physic-chemical properties of cement and the mechanical behavior of concretes. The study of concretes were formulated using the Dreux- Gorisse abacus method with NYATI 32.5 cement, Idjwi washed sand and crushed chippings of respective classes 5-15 and 15-25. This allowed us to produce test specimens of concrete substituted in quantity of cement by the powder of pozzolan in various percentages. The compressive strength of concrete at 28 days, the results obtained after preparation under the same conditions as a function of the different substitution are 16,525 MPa; 15,956 MPa; 13,958 MPa; 12,773 MPa; 11,797 MPa respectively at 0 %, 5%, 10%, 15% and 20% of cement replacement. These results allowed us to conclude that the substitution is possible thru 20% of cement by powder of pozzolan as offers a lower variation in compressive strengths.

Keys words: Pozzolan, Replacement, Resistance.

SOMMAIRE

EPIGRAPHE.....	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	v
SOMMAIRE	vi
SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre premier : ETAT DE L'ART	4
INTRODUCTION	4
I.1 GENERALITES SUR LE BETON	4
I.1.1. Définition.....	4
I.1.2. Constituants du béton	4
I.1.3. Classification des bétons	11
I.1.4. Domaines d'emploi du béton.....	13
I.1.5. Principaux avantages et inconvénients du béton	14
I.1.6. Processus de mise en œuvre du béton	15
I.1.7. Propriétés du béton	17
I.1.8. Quelques pathologies du béton et leurs traitements [2].....	20
CONCLUSION PARTIELLE	22
Chapitre deuxième : MATERIAUX ET METHODES DE RECHERCHE	23
INTRODUCTION	23

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

II.1. NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS.....	23
II.2. TRAVAUX SUR TERRAIN	24
II.2.1. Echantillonnage	24
II.2.2. Prélèvement sur le tas par quartage.....	24
II.3. ESSAIS SUR LES MATERIAUX.....	25
II.3.1. Ciment.....	25
II.3.2. Granulats	27
II.4. TRAVAUX EN LABORATOIRE.....	35
II.4.1. Méthode de formulation des bétons	36
II.4.2. Choix de la méthode de formulation.....	38
II.4.2.1. Détermination du rapport C/E.....	38
II.4.3. Formulation du béton	45
II.4.4. Confection des éprouvettes de béton.....	45
II.5. CARACTERISATION DU BETON	46
CONCLUSION PARTIELLE	50
Chapitre troisième : PRESENTATION, ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	51
INTRODUCTION	Erreur ! Signet non défini.
III.1. PRESENTATION DES CONSTITUANTS	51
II.1.1. Ciment	51
III.1.2. Eau de gâchage	52
III.1.3. Sable.....	52
III.1.4. Gravier	52
III.1.5. La poudre de la pouzzolane	53
III.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR LE CIMENT	54
III.2.1. Essais de consistance	54
III.2.2. Essais de prise	54
III.2.3. Masse volumique absolue	54
III.3. RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRANULATS.....	54

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

III.3. 1. Composition granulométrique	54
III.3.2. Module de finesse	56
III.3.3. Masses volumiques	56
III.3.4. Degré de propreté de sable.....	57
III.4. RESULTAT DES ESSAIS SUR LA POUDRE DE POUZZOLANE NATURELLE	57
III.5. FORMULATION DU BETON PAR APPLICATION NUMERIQUE	57
III.6. RESULTAT DE LA FORMULATION DU BETON	61
III.7. CARACTERISTIQUES DES BETONS	63
III.7.1. Ouvrabilité du béton	64
III.7.2. Résistance à la compression du béton.....	64
III.8. INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS	66
CONCLUSION PARTIELLE	68
CONCLUSION GENERALE.....	69
Bibliographie.....	71
Annexe 1 : TABLEAU D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 5-15	74
Annexe 2 : TABLEAU D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 15-25	75
Annexe 3: ESSAIS SUR LE CIMENT NYATI	76
Annexe 4: MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES GRANULATS ET DE LA POUDRE DE POUZZOLANE	77
Annexe 5: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES GRANULATS.....	79
Annexe 6: Equivalent de sable.....	80
Annexe 7 : RESULTATS DES RESISTANCES	81
Annexe 8 : EPROUVETTES DU BETON	82

SYMBOLES ET ABBREVIATIONS

CO_2	Dioxyde de carbone
cm	Centimètre
D_{max}	Diamètre du plus gros granulat
E/C	Rapport eau sur ciment
ES	Equivalent de sable
f_{c28}	Résistance caractéristique du béton à 28 jours
f_{cm}	La résistance moyenne en compression à 28 jours en MPa
FSTA	Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
G	Coefficient granulaire
Kg	kilogramme
MF	Module de finesse
MPa	Méga pascal
ULPGL	Université Libre des Pays des Grands Lacs
ρ	masse volumique
σ_c	La classe vraie du ciment

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I. 1 : Différents types des ciments courants normalisés [3]</i>	<i>6</i>
<i>Tableau I. 2 : Classe de résistance du béton [12]</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I. 3 : Consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams [13] ...</i>	<i>18</i>
<i>Tableau II. 1 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable</i>	<i>32</i>
<i>Tableau II. 2 : Valeurs du coefficient granulaire (G) [13].....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau II. 3 : Valeurs de l'affaissement selon le type des bétons</i>	<i>39</i>
<i>Tableau II 4 : Correction du dosage en eau en fonction de Dmax si (Dmax ≠ 25mm) [13]</i>	<i>40</i>
<i>Tableau II. 5 : Valeur du terme correcteur K en fonction de la vibration et forme des granulats (du sable en particulier) [13]</i>	<i>42</i>
<i>Tableau II. 6 : Valeurs du coefficient de compacité en fonction du serrage et de la consistance [13]</i>	<i>44</i>
<i>Tableau II. 7 : Confection des éprouvettes de béton</i>	<i>46</i>
<i>Tableau III. 1 : Résultats de l'essai de consistance.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III. 2 : Résultats de l'essai de consistance.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III. 3 : Résultats de la masse volumique absolue.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III. 4 : Masses volumiques absolues et apparentes des granulats</i>	<i>56</i>
<i>Tableau III. 5 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable</i>	<i>57</i>
<i>Tableau III. 6 : Masse volumique de la poudre de pouzzolane</i>	<i>57</i>
<i>Tableau III. 7 : Données fondamentales de béton d'étude</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III. 8 : Dosage en ciment et en eau</i>	<i>62</i>
<i>Tableau III. 9 : Valeurs des coordonnées OAB</i>	<i>62</i>
<i>Tableau III. 10 : Dosage volumétrique et massique des constituants du béton</i>	<i>63</i>
<i>Tableau III. 11 : Formulation des échantillons de 3 éprouvettes de béton</i>	<i>63</i>
<i>Tableau III. 12 : Formulation des échantillons de 3 éprouvettes des bétons</i>	<i>64</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure II. 1 : Illustration de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure II. 2 : Illustration de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II. 3 : Pycnomètre de LE CHATELIER</i>	<i>27</i>
<i>Figure II. 4 : Illustration de la tamiseuse avec les tamis.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II. 5 : Eprouvette pour équivalent de sable.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure II. 6 : Agitateur électrique</i>	<i>31</i>
<i>Figure II. 7 : Eprouvettes pour la masse volumique absolue</i>	<i>35</i>
<i>Figure II. 8 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [3]</i>	<i>40</i>
<i>Figure II. 9: Détermination des pourcentages des granulats dans le mélange.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II. 10 : Affaissement au cône d'Abrams</i>	<i>48</i>
<i>Figure II. 11: Presse à béton</i>	<i>49</i>
<i>Figure III. 1 : Ciment NYATI 32.5</i>	<i>51</i>
<i>Figure III. 2 : Sable lavé d'Idjwi</i>	<i>52</i>
<i>Figure III. 3 : Graviers concassés</i>	<i>52</i>
<i>Figure III. 4 : Pouzzolanes</i>	<i>53</i>
<i>Figure III. 5 : Poudre des pouzzolanes.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III. 6 : Courbe granulométrique du sable</i>	<i>55</i>
<i>Figure III. 7 : Courbe granulométrique du gravier 5-15</i>	<i>55</i>
<i>Figure III. 8 : Courbe granulométrique du gravier 15-25</i>	<i>56</i>
<i>Figure III. 9: Courbe granulométrique de référence.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure III. 10 : Evolution de la résistance du béton en fonction des pourcentages</i>	<i>65</i>
<i>Figure III. 11 : Diagramme du rapport du taux de réduction de la résistance du béton par rapport au pourcentage de substitution.....</i>	<i>66</i>

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, le développement durable est devenu une nécessité dans l'ensemble d'activités du monde, il passe inévitablement par l'augmentation des infrastructures. Ces infrastructures utilisent en grande partie le béton comme matériau principal dans leurs réalisations, dont le ciment portland est l'un des constituants. La fabrication du ciment portland qui est le liant le plus utilisé dans les mortiers et les bétons, est un procédé très polluant qui contribue annuellement à environ 5% d'émission de CO_2 [1]. D'où une nécessité de réduire sa quantité dans le béton afin de minimiser son degré de pollution environnementale.

L'utilisation de ressources disponibles, pour l'élaboration des matériaux de construction connaît un regain d'intérêt dans les pays fortement industrialisés depuis la fin du $XX^{\text{ème}}$ siècle. Cette technique permet une utilisation de ces ressources comme matériaux de substitution cimentaire, ce qui permet de remplacer partiellement le ciment très polluant. Nous avons quelques matériaux de substitution disponible à l'occurrence de la chaux, des charbons de bois, de la cendre de bois,...pour des raisons soit environnementales ou structurelle dans le but de la recherche de l'accroissement de la résistance des matériaux cimentaires [1].

Il est de nombreuses voies de valorisation imaginable. Matériau de remplissage, de remblaiement, couche d'assise de chaussées, béton etc... Il apparaît rapidement que la voie de valorisation du béton est celle qui offre le plus de variantes possibles. Ne sachant pas quelles performances attendre du matériau valorisé, il était important d'avoir une grande liberté d'action. Le béton offre cette liberté : choix des quantités à substituer, du type de matériau, liant à utiliser, des conditions de cures, des conditions d'utilisation. En fonction des résultats des études de valorisation, nous disposons d'une large palette de paramètres sur lesquels il faut jouer pour parvenir à l'obtention d'un matériau valorisable.

L'utilisation des additions minérales, comme substitution au ciment, aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi, est une pratique inconnue par les constructeurs de notre pays. C'est pourquoi il nous a paru important d'étudier et d'évaluer l'influence de l'addition des poudres des pouzzolanes comme substitution au ciment, sur les propriétés du béton durci.

A la suite des éruptions volcaniques antérieures et récentes dans la ville de Goma, une diversité des matériaux est disponible et qu'il faut valoriser, particulièrement les scories pouzzolaniques faisant l'objet de cette étude du fait qu'elles sont seulement utilisées comme matériaux pour couche d'assise dans la construction routière.

Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier la possibilité de substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles dans le béton afin de valoriser ces matériaux disponibles et moins chers dans la ville de Goma.

Ce travail mobilise les efforts de recherche en vue de répondre aux questions suivantes :

- Quelles seraient les caractéristiques (résistance & ouvrabilité) d'un béton confectionné par substitution partielle du ciment par la poudre pouzzolanique ?
- Quel serait le taux de réduction de résistance à la compression d'un béton confectionné par substitution partielle du ciment par la poudre pouzzolanique ?

A ces questions, nous émettons les hypothèses suivantes :

- Le béton confectionné par substitution partielle du ciment par la poudre pouzzolanique présenterait des bonnes caractéristiques. Particulièrement, la résistance à la compression se retrouverait dans la plage (20 à 10MPa).
- La réduction de résistance serait proportionnellement variable au pourcentage du ciment substitué.

Pour faire cette étude, il sera nécessaire de :

- Caractériser les constituants des matériaux cimentaires à utiliser,
- Formuler et confectionner des éprouvettes de béton,
- Substituer le liant en différents pourcentages par la poudre des pouzzolanes naturelles,
- Tester ces éprouvettes à la compression au laboratoire afin de déterminer la résistance,
- Comparer les différentes résistances obtenues pour dégager le taux optimum de réduction de la résistance.

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

Mises à part l'introduction et la conclusion générales, ce travail contient trois chapitres dont : le chapitre premier présente l'état de l'art, qui consiste à la présentation du matériau béton, ses propriétés, ses constituants, son mode d'obtention ainsi que la substitution partielle du liant. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés ainsi que la démarche méthodologique des essais. Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux de différents bétons confectionnés à différent pourcentage de la poudre de pouzzolane que l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre premier

ETAT DE L'ART

INTRODUCTION

Le béton est un composite qui résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats ; d'eau et parfois, d'ajouts minéraux et de faible quantité d'adjuvant. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après le durcissement, un produit solide dont les capacités de résistance dépassent celles des meilleures roches naturelles. Ce présent chapitre présente premièrement les généralités sur le béton notamment ses constituants, sa typologie, ses caractéristiques, sa mise en œuvre, ses domaines d'utilisation, ses pathologies courantes, leurs traitements, ainsi que ses différentes méthodes de formulation. Deuxièmement il présente la substitution du liant dans le béton.

I.1 GENERALITES SUR LE BETON

I.1.1. Définition

Le béton est un matériau artificiel obtenu par un mélange d'un liant (généralement du ciment), d'eau et de granulats choisis de façon rationnelle, et éventuellement quelques proportions d'adjuvant et additions minérales. Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton.

Le béton est un matériau artificiel car il est produit par une technique et non par la nature. Ses constituants étant bien mélangés, le béton est une masse plastique qui peut être coulée dans un moule de forme et dimensions prédéterminées.

I.1.2. Constituants du béton

Le béton est un mélange de constituant actifs comme le ciment, ou non actifs comme les granulats, l'eau et éventuellement des adjuvants dont les proportions varient selon les

propriétés recherchées à l'état frais ou durci. Si le type de liant utilisé n'est pas le ciment, on parle alors soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire.

La pâte (ciment+ eau), élément actif du béton, enrobe les granulats ; l'objectif étant de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci [2]. La composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, de dosage en ciment et eau de gâchage, afin de réaliser un béton répondant aux qualités recherchées.

Généralement, les méthodes de formulation ne considèrent que l'affaissement et la résistance à la compression à 28 jours comme critère de caractérisation.

I.1.2.1. Ciment [3]

Le ciment est un liant hydraulique se présentant sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée à l'eau, forme une pâte faisant prise et développant une constance de volume. A l'air, comme sous l'eau, il durcit par hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, par la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment.

Ils existent plusieurs types des ciments, nous pouvons citer :

- Le ciment Portland (aussi appelé clinker Portland) : Il s'agit d'un mélange, finement moulu de roche calcaire (craie) et de schiste (argile), homogénéisé, séché, décarbonaté puis fondu partiellement (1500°C) dans un four rotatif. Ensuite ce mélange est refroidi rapidement et enfin broyé. Le clinker est finement broyé pour donner un ciment.

Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, gros cylindres chargés de boulets d'acier et mis en rotation. Lors de cette étape, le gypse (3 à 5%), indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment. Les matières premières (calcaire, argile) sont obtenus à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Ils sont extraits des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. C'est la raison pour laquelle les cimenteries sont situées près des carrières de calcaire.

- Les autres types de ciment : Au clinker Portland peuvent être additionnés un ou plusieurs ajouts suivants :
- Laitier de haut-fourneau : produit granulé qui est obtenu par le refroidissement brusque de la gangue en fusion des hauts fourneaux. Constituant à hydraulicité latente, c.-à-d. que l'hydratation doit être activée. Le rôle de démarreur est joué par le clinker Portland.
 - Cendre volante : réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du clinker.
 - Calcaire : constituant inerte. Intervient physiquement comme plastifiant dans le béton frais.

Les types de ciments sont en fonction de la teneur en clinker ainsi que d'autres constituants secondaires, il en existe plusieurs. Le tableau I.1 reprend les différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs des constituants qu'ils comportent.

Tableau I. 1 : Différents types des ciments courants normalisés [3]

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

I.1.2.2 Granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons : c'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm (sables, gravillons, graviers) dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant du recyclage des matériaux qui sont quelque fois encore appelés « agrégats » et sont destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballast de voies ferrées, des remblais [4].

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles. Le choix des classes granulaires est fonction des exigences de l'ouvrage (dimensions, espacement des aciers, enrobage, bétonnage correct, état de surface, etc.). Généralement le bon choix des granulats est celui qui permettra l'enrobage correct des aciers, l'obtention d'un parement conforme aux prescriptions des clauses techniques particulières de l'ouvrage [5].

a) Types de granulats

Nous distinguons principalement deux catégories de granulats : les granulats naturels et les granulats artificiels [6].

- Les granulats naturels : proviennent de deux sources, les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ; géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches : éruptives, sédimentaires, métamorphiques.
- Les granulats artificiels : les granulats artificiels se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés. Le laitier des hauts fourneaux, le laitier cristallisé concassé, le laitier expansé ou bouleté, les scories d'aciérie, les schistes houillers, les granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement et les granulats allégés par expansion ou frittage sont les sous-produits et déchets de l'industrie.
- Les granulats recyclés : les granulats recyclés constituent un nouveau débouché. Ce sont des granulats résultant de la transformation de matériaux inorganiques

antérieurement utilisés en constructions. Dans cette catégorie se rangent les bétons concassés, le fraisât d'enrobés bitumineux.

b) Classification des granulats

Les granulats sont classés en fonction de leur diamètre en [mm]. Pour ce faire, deux paramètres sont pris en considération : le plus petit diamètre et le plus grand. On distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Selon les dimensions, la norme européenne (NF EN 933-2) distingue les familles de granulat suivantes :

- Filler 0/D où $D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0,063mm,
- Sablons 0/D où $D < 1$ mm avec au moins 70% de passant à 0,063mm,
- Sables 1/D où $1 < D < 6,3$ mm,
- Graves 0/D où $D > 6,3$ mm,
- Ballast d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm,
- Gravillons d/D où $d > 1$ et $D < 125$ mm

c) Choix des granulats

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- Le facteur G/S « proportion relative gravillons/sable », il doit être inférieur à 2,
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

I.1.2.3. Eau

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle est nécessaire au durcissement du ciment, puisque la réaction chimique du ciment (hydratation) est induite par l'eau. D'autre part, elle est dispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais. En augmentant la quantité de l'eau, la concentration en solide diminue, et le béton devient fluide. Cependant, en plus de diminuer la résistance mécanique du béton mature, l'introduction excessive d'eau provoque des problèmes de ségrégation [7].

L'eau utilisable pour la confection du béton fait l'objet de l'analyse NF EN 1008. Cette norme définit les prescriptions pour l'eau convenant à la production du béton et décrit les méthodes permettant d'apprécier son aptitude à l'emploi.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Lorsque l'eau est en excès, celle qui n'entre pas en réaction chimique avec le ciment (eau libre) s'évapore du béton en y formant des pores dont la présence réduit la compacité, et par conséquent, diminue la résistance du béton. La réduction de l'eau par contre rend le béton frais difficilement maniable, avec comme conséquence des désordres difficilement réparables voire irréparables au moment du décoffrage [8].

I.1.2.4. Adjuvants

L'emploi d'adjuvant qui était destiné aux bétons spéciaux devient de plus en plus utiliser dans la composition classique du béton. Ils sont introduits avec de faible pourcentage pour améliorer les propriétés du béton selon certaines exigences d'utilisation: la fluidité, la résistance, le temps de durcissement et l'imperméabilité. Les adjuvants sont solubles dans l'eau. Lorsque les quantités utilisées sont plus importantes, on utilise le terme adjonction ou ajout. Les adjuvants sont donnés en pourcentage du ciment, tandis que les adjonctions sont données plutôt en pourcentage du béton.

Un adjuvant se caractérise par la fonction principale pour laquelle il est agréé et par ses fonctions secondaires éventuelles. Le critère permettant de classer les adjuvants est le résultat de leur action. Ainsi on distingue les adjuvants suivants :

a) Adjuvants modifiant les propriétés physiques

- Hydrofuge de masse :

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons durcis, ce qui procure une bonne étanchéité aux matériaux. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés. Ils peuvent également comporter des matières fines ainsi que des agents fluidifiants [9].

b) Adjuvant modifiant la rhéologie et la teneur en air

- Entraîneurs d'air :

Le rôle des entraîneurs d'air est d'incorporer des millions de petites bulles d'air d'un diamètre compris entre 10 et 300 μm dans le béton afin d'augmenter la résistance aux cycles de gel - dégel. Il en résulte également une amélioration de l'ouvrabilité et une diminution du ressuage.

- Super plastifiants:

Les super plastifiants permettent de défloculer les grains de ciment. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place.

c) Adjuvants modifiant la prise et le durcissement:

Ces adjuvants sont des produits chimiques, qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Ce sont généralement des sucres ou des ligno-sulfonates. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution de seuil de cisaillement dans le temps, en fonction de l'adjuvant utilisé [9].

- Accélérateurs de prise :

Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement avancent le début de prise ou accélèrent le processus de durcissement en libérant la chaleur d'hydratation plus rapidement. L'hydratation étant plus rapide, le béton peut être décoffré avant 28 jours. L'effet des accélérateurs dépend beaucoup de ciment utilisé. Les accélérateurs entraînent souvent une perte plus ou moins importante de la résistance finale du béton. Ces adjuvants peuvent avoir une influence majeure sur les caractéristiques du béton frais et durci.

- Retardateurs de prise :

Les retardateurs de prise ont pour effet de retarder le début de la prise du ciment et de prolonger ainsi le délai de transport et mise en place du béton.

d) Produits de cure

Sont des produits à pulvériser sur la surface d'un béton ou mortier frais pour empêcher l'évaporation de l'eau de gâchage.

I.2.2.5. Additions minérales

Pendant la formulation d'un béton, différentes additions peuvent être mélangées au Ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les Fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulométrique d'un granulats qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique [10]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [11].

I.1.3. Classification des bétons

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général, le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- Béton très lourd : > 2500 kg/m³ ;
- Béton lourd (béton courant) : 1800 - 2500 kg/m³ ;
- Béton léger : 500 - 1800 kg/m³ ;
- Béton très léger : < 500 kg/m³.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse) et
- Béton asphalte ou bitumineux (bitume).

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment que dans les travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2003 kg/m³ environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.

Les bétons lourds dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000 kg/m³ servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.

Les bétons de granulats légers dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.

Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de 500 kg/m³, sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.

Les bétons de fibrés, plus récents, correspondent à des usages très variés : dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau I.2. Dans ce tableau f_{ckCyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindre (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2) ; f_{ckCub} est la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

Tableau I. 2 : Classe de résistance du béton [12]

Classe	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ckCyl} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_{ckCub} [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60

I.1.4. Domaines d'emploi du béton

I.1.4.1. Bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normale lorsqu'on considère son utilisation dans la construction de logements : pour les murs, 80% des techniques en individuelle, plus de 90% en collectif pour les structures ; pour les planchers, le béton est pratiquement le matériau idéal. Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux, ainsi que dans grands édifices publics et les bâtiments industriels.

I.1.4.2. Travaux publics

a. Pont

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

b. Tunnel

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

c. Barrage

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

d. Routes

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

e. Autres ouvrages

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

I.1.5. Principaux avantages et inconvénients du béton

I.1.5.1. Avantages du béton

Le béton présente plusieurs avantages, parmi ceux-ci l'on cite :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

I.1.5.2. Inconvénients du béton

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il en reste quelques-uns, parmi lesquels on cite:

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation) théorique,
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux),
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

I.1.6. Processus de mise en œuvre du béton

I.1.6.1. Le malaxage

Cette opération consiste à assurer un béton homogène et que tous ses granulats soient bien enrobés du liant. La séquence d'introduction des différents matériaux doit respecter la norme. En pratique, l'homogénéisation des différents constituants, peut ne pas être assurée si les temps de mélange ou les procédures d'introduction des constituants ne sont pas respectés. On comprend l'importance primordiale de cette étape : il n'est pas suffisant d'avoir la bonne composition de béton, si on ne se donne pas les moyens d'assurer son homogénéité en fin de malaxage.

Le temps du malaxage est un paramètre très important pour l'homogénéisation du béton. Il dépend de type de l'équipement de malaxage ainsi que de type de béton. La mise au point de nouveaux bétons : bétons à hautes performances (BHP), bétons auto nivelant (BAN), bétons autobloquants (BAP), bétons fibres ultra performants (BFUP)... demande des temps de malaxage très élevés pouvant parfois dépasser 5 minutes.

En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à defloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air. Ceci accroît donc la densité et la compacité du béton.

Un malaxage trop long et une vitesse de rotation du malaxeur trop longue peuvent conduire à une dégradation des propriétés du matériau et à une ségrégation des constituants.

I.1.6.2. Vibration du béton

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction de favoriser l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton et a pour effet de casser le réseau de contacts entre les agrégats et facilite l'écoulement du matériau. Le béton obtenu présente une compacité plus forte, avec moins de vides d'air (effets de serrage). Par conséquent, il est possible de faire des bétons avec un taux d'eau de gâchage plus faible, ce qui a pour effet de diminuer leur porosité, d'accroître leurs caractéristiques mécaniques et leur durabilité et d'améliorer leur aspect de surface. Il existe trois types de vibration :

- a. Vibration interne (pervibration) : Vibration transmise directement dans la masse du béton par des aiguilles vibrantes,
- b. vibration externe. Vibration transmise au béton par le coffrage ou par le moule, elle est utilisée quand la densité des armatures à l'intérieur des coffrages est trop importante et pour le béton préfabriqué, elle se fait par fixation des vibrateurs sur les coffrages,
- c. La vibration de surface : Vibration transmise directement au béton par sa surface au moyen d'une règle vibrante, utilisée pour le serrage d'éléments horizontaux de faible épaisseur (15 à 20 cm au maximum), telles les dalles de béton, les couches de roulement, etc.

I.1.6.3. Cure du béton

La cure du béton sur les surfaces non coffrées et les surfaces après décoffrage permet d'obtenir d'une part de bonnes caractéristiques de surface grâce à une hydratation correcte de la peau du béton et de limiter d'autre part la microfissuration engendrée par le retrait plastique et le retrait de dessiccation à jeune âge.

I.1.7. Propriétés du béton

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- le béton frais : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage,
- le béton durci : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

I.1.7.1. Propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci, elle est définie aussi comme la propriété déterminant l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité du béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité.

De l'ouvrabilité dépendent la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton, enrobage et adhérence des armatures. La cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation.

Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant,
- La forme des granulats,
- La granularité et la granulométrie,
- Le dosage en eau.

Parmi les essais qui nous permettent de déterminer l'ouvrabilité d'un béton on situe :

- Affaissement au cône d'Abram,

- Table à choc

a. Mesure et contrôle de l'ouvrabilité

➤ Essai d'affaissement au cône d'Abrams

Le moyen utilisé pour le contrôle de l'ouvrabilité du béton est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, il s'agit de constater l'affaissement du béton sous l'effet de son poids propre. Selon la norme [NF P 18 -451], l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Cet essai permet de caractériser la consistance d'un béton frais.

Tableau I. 3 : Consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams [13]

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

b. Influence de la forme des grains sur la fluidité

Lorsque la surface de grains est arrondie et lisse, la surface totale et le frottement entre eux sont plus petits que si la forme est angulaire et la surface rugueuse. C'est pour cela que le béton frais au gravier et au sable roulé est plus fluide que celui formé des pierres concassées de sable de forme angulaire. Le choix de la fluidité d'une pâte de béton doit tenir compte de dimensions et du type de construction, de la simplicité de l'armature et des méthodes de mise en œuvre [14].

I.1.7.2. Pathologies du béton frais

Elles sont liées à la sédimentation. A ce niveau on distingue deux principales pathologies : le ressuage et la ségrégation.

a. Ressuage

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

b. Ségrégation

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

I.1.7.3. Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années. Ainsi, pour le béton durci, l'on retiendra que :

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.

- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.
- Les propriétés physiques d'un béton sont l'étanchéité, la porosité, la perméabilité, absorption capillaire), etc...

De ces propriétés susmentionnées, la résistance caractéristique en la compression s'avère la plus importante.

En effet, Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement, l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité. Son comportement dépend d'un grand nombre de paramètres tels que la qualité et le dosage des matériaux et les conditions de réalisation. Les bétons couramment utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil tels que les bâtiments, les ponts, les murs de soutènement, présentent des résistances à la compression f_{c28} variant de 20 à 50 MPa.

I.1.8. Quelques pathologies du béton et leurs traitements [2]

Les pathologies du béton à l'état frais étant la ségrégation et le ressuage ; à l'état durci qui se classe en pathologies mécaniques notamment le fluage, le retrait, la fissuration et en pathologie physicomécanique dont le gonflement dû aux sulfates, les alcalis réactions.

I.1.8.1. Prévention des pathologies

Plusieurs moyens existent pour la prévention de ces pathologies à l'état frais et à l'état durci. Nous allons présenter ces moyens dans cette section.

a. Prévention à l'état frais

- ❖ Un dosage optimum des constituants du béton lors de la formulation

Les excès des constituants lors de la formulation du béton engendre des désordres que l'on peut déjà observer à l'état frais jusqu'à l'écoulement de la structure. Il faut éviter l'excès de l'eau de gâchage aussi utilisée, selon le type d'ouvrage, un ciment approprié qui souvent ne pas réactif avec les granulats qui eux aussi ne doivent pas l'être.

❖ La vibration

Une bonne vibration du béton réduit les vides dans le squelette du béton qui pouvait être occupé par les eaux interstitielles qui peuvent créer un ressuage, les vides eux-mêmes qui augmentent le retrait. La vibration renforce aussi le squelette du béton ce qui aide à long terme à la diminution des effets du fluage.

b. Prévention à l'état durci

Quelques moyens Pour prévenir les pathologies du béton à l'état durcis on cite :

○ La cure du béton

La cure c'est l'humidification régulière de la surface libre du béton pour éviter le retrait plastique et les fissurations qui en découlent. Si on ne détient pas la quantité nécessaire qui en découle, on peut placer une couche de sable à la surface libre pour créer un écran au rayonnement solaire.

○ Désactivation de la surface du béton

Cette technique consiste à laver la surface du béton, laissant les granulats s'exposer au soleil au profit de toute la matrice du béton.

○ Finissage de la structure

Lors de la construction d'une structure, selon les préventions de la classe d'expositions ou si l'état de mise en place du béton est médiocre, on peut procéder à l'ajout d'une couche mince des mortiers qui aiderait à projeter la surface et être directement un aspect architectural de la structure.

I.1.8.2. Traitement des pathologies

Les pathologies du béton sont traitées par des procédés soit physiques, physico-mécaniques ou électromécaniques. Nous allons dans cette section présenter ces différents procédés.

a) Procédées physiques

Lors du recensement des pathologies on procède à la protection de la fissure ou bien d'un renforcement de la structure. Il y a aussi des fissures qui sont réparables. Ici on englobe toutes les méthodes de traitement des pathologies souscrites dans les fascicules de génie civil traitant sur traitement des techniques des pathologies.

b) Procédées physico-mécaniques et électromécanique

L'état d'avancement des effets pathologiques de la structure engendre des méthodes complexes de traitement des effets causés, pour d'autres pathologies il est impossible de réparer les dégâts si ce n'est la démolition de la structure pour la sécurité de la société. Il s'agit là des procédés dont la mise en œuvre est relativement lourde et plus particulièrement adaptée à la remise en état d'ouvrage d'art. Généralement, le procédé comporte deux opérations, l'une consiste à faire pénétrer dans le béton un produit faisant remonter son pH au-dessus de 9,5 ; l'autre consiste à extraire les sels contenant des chlorures (désalinisation).

CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre nous avons présenté le matériau béton en abordant les différents constituants, la typologie, les domaines d'utilisation, les propriétés, les méthodes de formulation, les pathologies et leurs traitements. Le chapitre suivant traite de matériaux et méthodes de la recherche.

Chapitre deuxième

MATERIAUX ET METHODES DE RECHERCHE

INTRODUCTION

Ce chapitre présente les matériaux et méthodes en vue d'effectuer l'étude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre de la pouzzolane naturelle. La présente partie du travail est divisée ainsi en deux sections, la Première, consiste à la présentation de la nature et origines des constituants du béton à utiliser, le travaux sur terrain, la détermination des caractéristiques de ses constituants par une série d'essais à savoir l'analyse granulométrique par tamisage et les essais de détermination des propriétés physiques des granulats. La deuxième section de ce chapitre présente d'une part de la méthode de formulation des bétons étudiés, et d'autre part l'ensemble des essais qui permettent de caractériser qualitativement et quantitativement les propriétés du béton à savoir la consistance du béton, et la résistance à la compression du béton à 28 jours.

II.1. NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS

Les constituants des bétons utilisés sont de diverses natures et origines. Le ciment utilisé est un ciment dénommé NYATI de classe 32.5 et courant dans la ville de Goma en République Démocratique du Congo. Le sable roulé (sable de mer), provenant de la région d'Ijwi. Les graviers sont issus du concassage de la roche basaltique présente dans la ville de Goma, ils sont de deux classes à savoir les 5-15 et les 15-25. La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle issue de la carrière de Ndosho dans la ville de Goma, cette pouzzolane est essentiellement formée des scories et des pierres ponce de couleur variant du rouge au noir. Pour pouvoir la substituer au ciment portland, nous avons d'abord procéder à son étuvage afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage. Nous avons ensuite complètement broyé puis passé au tamisage.

L'ensemble du tamisât du tamis de dimension 0.080 millimètre est récupéré pour obtenir une fine poudre et utiliser en substitution au ciment à différentes proportions. L'eau de gâchage utilisée est une eau potable de la REGIDESO, selon la norme NF P18-303, seule l'eau potable peut être utilisée pour la fabrication des bons bétons.

II.2. TRAVAUX SUR TERRAIN

Les travaux sur le terrain ont constitué essentiellement au prélèvement des échantillons de sable, de gravier, et des pouzzolanes ainsi qu'à l'acquisition du stock de ciment portland nécessaire.

II.2.1. Echantillonnage

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

II.2.2. Prélèvement sur le tas par quartage

II.2.2.1. Prélèvement sur le tas (sable et gravier)

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

II.2.2.1.1. Quartage

Les échantillons de granulats ont été prélevés par quartage. On appelle quartage l'opération de l'échantillonnage qui consiste à diviser l'échantillon en quarts. A l'aide d'une truelle, l'échantillon est partagé d'abord en deux, puis en quatre quarts sensiblement égaux. La division se fait respectivement jusqu'à ce que les différentes fractions deviennent moins importantes. Les différentes fractions permettent au final l'obtention de la quantité nécessaire par consommation [17].

II.3. ESSAIS SUR LES MATERIAUX

II.3.1. Ciment

II.3.1.1 Essais de consistance

L'essai de consistance normale est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10mm, selon la norme NF EN 196-3 [18]. Le but est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour trouver la pâte à consistance normale de ciment. La consistance normale est atteinte lorsque la distance entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule atteint 6 ± 1 mm. L'image II.1 présente l'appareil de Vicat équipé d'une sonde.



Figure II. 1 : Illustration de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde

II.3.1.2. Essai de prise

L'essai de prise est fait à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille selon la norme NF EN 196-3 [19] ; avec pour objectif de déterminer le temps de début de prise, qui correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, et la fin de prise qui correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se

transforme en un matériau rigide. L'image II.2 présente l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille.



Figure II. 2 : Illustration de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille

II.3.1.3. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue du ciment a été évaluée à partir du pycnomètre de LE CHATELIER [20]. Le calcul de celui-ci s'est fait par la relation (II.1).

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} (g/m^3) \quad (II. 1)$$

- M_1 est la masse du pycnomètre avec le pétrole
- M_2 est la masse du pycnomètre, pétrole et ciment
- V_1 est le volume initial du pétrole
- V_2 est le volume obtenu après avoir mis le ciment dans le pétrole.

L'image II.3 présente le pycnomètre de LE CHATELIER.



Figure II. 3 : Pycnomètre de LE CHATELIER

II.3.2. Granulats

Les caractéristiques du sable ainsi que des graviers ont été déterminé par des essais normalisés dont l'analyse granulométrique et l'équivalent de sable, la masse volumique apparente et l'essai de la masse volumique absolue.

Cette section nous présente les différents essais ci-haut, en donnant plus de détail que possible.

II.3.2.1 Analyse granulométrique

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique normalisé selon la norme NF EN P 18-560 [21]. Dans cette section nous allons présenter le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage et l'expression des résultats.

a. But

L'essai d'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition pondérale des grains d'un échantillon donné de granulats selon leurs dimensions en pourcentage afin d'en étudier les caractéristiques quantitatives.

b. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtée les uns sur les autres, dont les dimensions de ouvertures sont décroissantes du hauts vers le bas.

c. Mode opératoire

- Peser à l'aide de la balance électrique la masse de l'échantillon ;
- Ranger les tamis sur la tamiseuse dans l'ordre décroissant respectant les dimensions des mailles en mm selon la norme ;
- Mettre l'échantillon dans le tamis supérieur, couvrir puis procéder au tamisage pendant 20 minutes ;
- Après tamisage, peser le refus partiel de chaque tamis à l'aide de la balance électrique et dresser le tableau de résultats et la courbe granulométrique correspondante.

d. Appareillage

Pour l'analyse granulométrique nous avons besoin d' (de la) :

- Une tamiseuse électrique et tamis
- Une balance de précision
- Une brosse métallique et pinceau
- Tare

La figure II.4 présente la tamiseuse avec les tamis superposés.



Figure II. 4 : Illustration de la tamiseuse avec les tamis

e. Expression des résultats

Les résultats sont interprétés par le tableau en calculant le refus de chaque tamis en gramme et en pourcentage et le tamisât de chaque tamis en pourcentage ce qui permet de tracer la courbe qui détermine la contenance en pourcentage des différents granulats faisant partie de l'analyse. La valeur du module de finesse est exprimée selon la norme NF P 18-540 [22], par la relation (II.2):

$$MF = \frac{1}{1000} \sum \text{Refus cumulés en \% de tamis}(0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\text{mm}) \quad (\text{II. 2})$$

II.3.2.2. Equivalent de sable

La vérification du degré de propreté du sable a été fournie par l'essai d'équivalent de sable (ES). Selon la norme NF P 18-597 [23]. Cette section présente le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage, et l'expression des résultats.

a. But de l'essai

L'essai d'équivalent de sable permet de définir la proportion de la poussière fine nuisible dans un matériau. Il permet de séparer les sables de particules fines comme les limons et argiles.

b. Principe de l'essai

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans une éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sables de l'échantillon.

c. Mode opératoire

L'opération d'équivalent de sable passe par diverses étapes à savoir :

- A l'aide de 2mm, procéder au tamisage du sable, ensuite peser à l'aide de la balance électrique un échantillon de 120g
- Introduire la solution lavante dans le tube en plexiglass jusqu'au premier trait repère ;
- Verser les 120g de l'échantillon dans le tube en plexiglass contenant déjà la solution lavante ;
- Agiter verticalement pour éliminer les bulles d'air, ensuite laisser reposer pendant 10 minutes.
- Placer les tubes bouchés sur l'agitateur électrique, puis mettre en marche l'agitateur ;
- Ajouter l'eau jusqu'au deuxième trait repère ;
- Laisser reposer le tube pendant 20 minutes ;
- Effectuer premièrement la lecture à vue, à l'aide de la règle métallique graduée, des hauteurs h_1 (hauteur du sable propre y compris le flocculat) et h_2 (hauteur du dépôt du sable propre). Deuxièmement, effectuer la lecture à piston, à l'aide bien entendu du piston qu'on introduit dans le tube jusqu'à niveler la surface du sable propre pour besoin de précision.

d. Appareillage

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

Les éléments d'appareillage principaux sont deux éprouvettes graduées, dans lesquelles 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 40cm, munies d'un bouchon en caoutchouc et graduées. Les images II.5 et II.6 présentent respectivement l'éprouvette pour équivalent de sable et l'agitateur électrique.



Figure II. 5 : Eprouvette pour équivalent de sable



Figure II. 6 : Agitateur électrique

e. Expression des résultats

L'expression des résultats se fait à partir de la formule (II.4).

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100\% \quad (\text{II. 1})$$

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. Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau II. 1 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

$ES_v(\%)$	$ES_p(\%)$	Interprétations
$ES_v > 65$	$ES_p > 60$	Sable argileux, non convenable pour les bétons de qualité
$65 \leq ES_v < 75$	$60 \leq ES_p < 70$	Sable légèrement argileux, convenable pour les bétons courants
$75 \leq ES_v < 85$	$70 \leq ES_p < 80$	Sable propre à faible pourcentage des fines argileux, parfaitement convenable pour les bétons de Qualité
$ES_v \geq 85$	$ES_p \geq 85$	Sable très propres, risque d'un défaut de plasticité du béton

II.3.2.3. Masse volumique apparente (ρ_{app})

La masse volumique apparente du matériau est la masse volumique 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. Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 [24] pour les graviers et NF P 18-555 [25] pour les sables. Cette section présente le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage, et l'expression des résultats.

a. But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer le rapport de la masse par unité de volume pour un échantillon donné préalablement séché à l'étuve.

b. Principe de l'essai

L'essai consiste à remplir un récipient dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient.

c. Mode opératoire

La détermination de la masse volumique apparente se passe par des étapes suivantes :

- Tamiser l'échantillon avec un tamis de maille de dimension 2mm, remplir le volume intérieur des éprouvettes avec d'échantillon ;
- Peser à l'aide de la balance électrique les éprouvettes contenant du sable et obtenir les masses ;
- Effectuer la pèse des éprouvettes à vide et obtenir les masses M_i ;
- Déterminer le volume des échantillons utilisés dans les éprouvettes V_i .

d. Appareillage

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

e. Expression des résultats

L'expression des résultats se fait à partir de la formule (II.5).

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \text{ (g/cm}^3 \text{)} \quad \text{(II. 2)}$$

Où M est la masse sèche du matériau en g et V le volume du récipient en cm^3 .

II.3. 2.4. La masse volumique absolue (ρ_{abs})

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. La masse volumique apparente a été déterminée selon les normes NF P 18-554 [24] pour les graviers et NF P 18-555 [25] pour les sables.

a. But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer le rapport de la masse par unité de volume pour un échantillon donné à l'état naturel.

b. Principe de l'essai

L'essai consiste à remplir un récipient dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient.

c. Mode opératoire

La détermination de la masse volumique absolue se passe par des étapes suivantes :

- Tamiser l'échantillon avec un tamis de maille de dimension 2mm, remplir le volume intérieur des éprouvettes avec d'échantillon ;
- Peser à l'aide de la balance électrique les éprouvettes contenant du sable et obtenir les masses ;
- Effectuer la pèse des éprouvettes à vide et obtenir les masses M_i ;
- Déterminer le volume des échantillons utilisés dans les éprouvettes V_i .

d. Appareillage

L'essai nécessite les éprouvettes graduées, un tamis des mailles de dimension 2mm, une balance électrique de précision. L'image II.7 présente l'éprouvette de la masse volumique absolue.

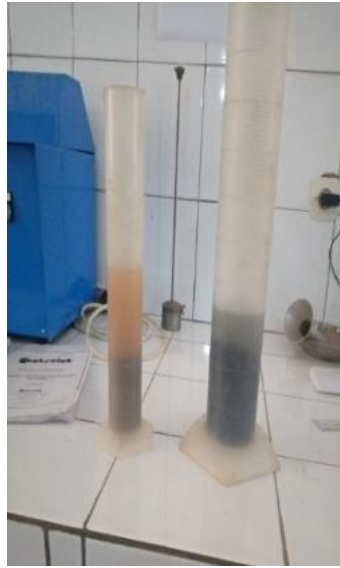


Figure II. 7 : Eprouvettes pour la masse volumique absolue

e. Expression des résultats

L'expression des résultats se fait à partir de la formule (II.6).

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ (g/cm}^3 \text{)} \quad \text{(II.3)}$$

Avec :

- M la masse sèche du matériau en gr ;
- V_2 et V_1 la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du granulat en ml.

II.4. TRAVAUX EN LABORATOIRE

En laboratoire, les travaux consistent à la formulation des bétons et à l'application des essais sur le béton. La formulation du béton revient à déterminer les différentes proportions optimales en sable, en gravier, en ciment ainsi que l'eau pour un mètre cube de béton. Nous allons présenter dans cette section le choix de la méthode de formulation, la formulation du béton, les données de base pour la formulation et la confection des éprouvettes de béton.

II.4.1. Méthode de formulation des bétons

Les méthodes de calcul de la composition du béton sont nombreuses et il n'existe pas de méthode qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. Une composition de béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre (ouvrabilité) avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important.
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- La méthode de Baron,
- La méthode de Bolomey ;
- La méthode de Faury ;
- La méthode d'Abrams ;
- La méthode de Dreux-Gorisse.

Les différences principales entre ces méthodes résident entre autres dans la définition de la courbe granulométrique de référence, selon que l'on inclue ou non le ciment dans les matières fines. Pourtant, toutes ont un point commun, elles dépendent de paramètres qui sont intimement reliés aux caractéristiques morphologiques des matériaux utilisés (nature et qualité des granulats, type de liant, etc.).

C'est pourquoi, connaissant la nature éminemment variable des composants du béton et surtout des granulats, il est absolument nécessaire lors de la définition d'une composition de béton de compléter le calcul théorique des quantités des divers composants par un essai de

gâchage et par des essais de résistance après durcissement. Pour le béton frais, l'essai de gâchage permet de contrôler que les propriétés du béton frais sont conformes aux exigences, ou sinon d'effectuer les corrections nécessaires (soit en agissant sur la composition, soit au moyen d'adjuvants).

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme (NF EN 206-1), laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée.

➤ **Méthode de Dreux-Gorisse**

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique. Sur base d'une analyse statistique d'un grand nombre de bétons, Dreux a mené une large enquête. En combinant les courbes granulaires obtenues, il a pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique.

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

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

➤ **Principe de la méthode**

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau. Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, etc.

Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose. Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré.

II.4.2. Choix de la méthode de formulation

La méthode choisie pour le cadre de cette recherche est celle des abaques de Dreux Gorisse. Les abaques de Dreux permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois cette composition déterminée, elle devra, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués. En général, les données telles que la résistance à la compression du béton comprise entre 20 et 40 MPa à 28 jours ainsi que la maniabilité sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux [26].

II.4.2.1. Détermination du rapport C/E

Le rapport dosage en ciment sur dosage en eau (C/E) est calculé grâce à la formule (II.7):

$$f_{cm} = G \times \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

- f_{cm} la résistance moyenne en compression à 28 jours en MPa
- G le coefficient granulaire en fonction de la taille et la qualité du plus gros granulat
- σ_c la classe vraie du ciment à 28 jours en MPa
- C le dosage en ciment en $\frac{kg}{m^3}$

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

- E le dosage en eau en $\frac{kg}{m^3}$

➤ **Le coefficient granulaire G**

Les valeurs du coefficient granulaire G données dans le tableau II.2 supposent que le serrage du béton est effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe). D_{max} est le diamètre du plus gros granulat.

Tableau II. 2 : Valeurs du coefficient granulaire (G) [13]

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Granulats fins $D_{max} < 16mm$	Granulats moyens $25mm \leq D_{max} \leq 40mm$	Gros granulats $D_{max} > 63mm$
Excellentes	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

➤ **Evaluation de la qualité de ciment C et de l'eau E**

Le tableau II.3 donne à titre indicatif les dénominations d'affaissement selon la norme NF-EN-206/CN.

Tableau II. 3 : Valeurs de l'affaissement selon le type des bétons

Plasticité	Serrage	Affaissement en cm	Dénomination NF-EN-206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1/S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S2
Béton mou	Piquage	10 à 13	S3
Béton liquide	Leger piquage	+14	S3/S4/S5

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 6 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

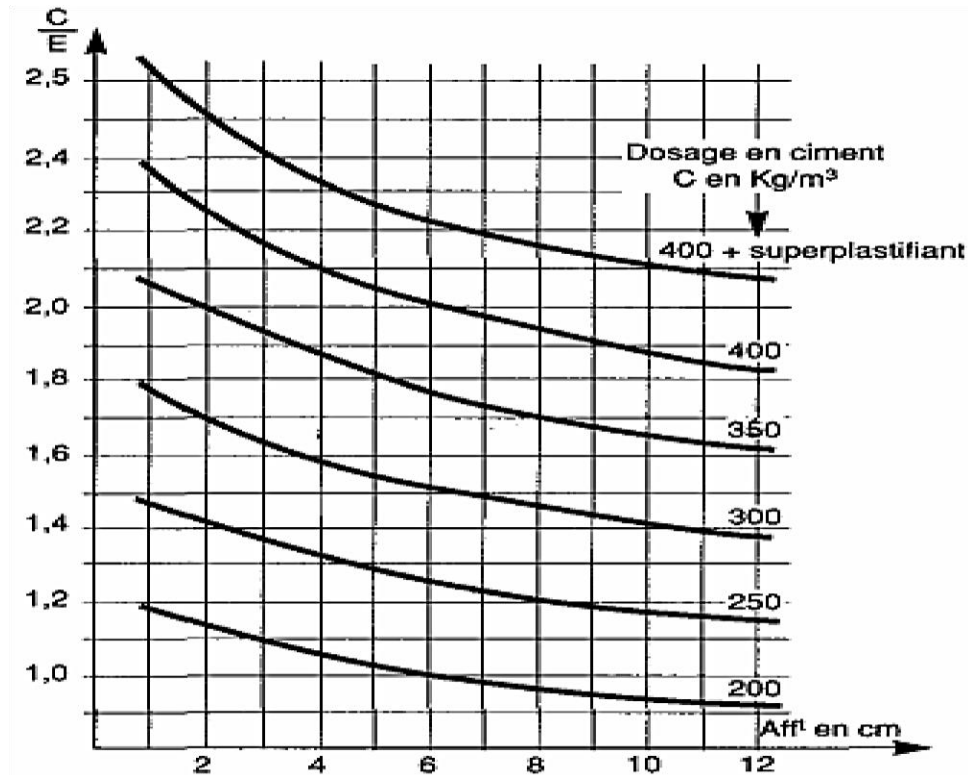


Figure II. 8 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [3]

Moyennant cet abaque, le dosage en Ciment est déduit du rapport C/E, ainsi que celle de l'eau. Cette quantité est ensuite corrigée en fonction de la taille du plus gros granulat à l'aide du tableau II.4, afin de prendre en compte l'influence de la surface spécifique des granulats.

Tableau II 4 : Correction du dosage en eau en fonction de D_{max} si ($D_{max} \neq 25mm$) [13]

Dimension maximale des plus gros granulats	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau E (%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

- **Choix et dosage des granulats**

Les graviers doivent être de bonnes qualités minéralogiques, suffisamment dures et bien propres mais de préférence alluvionnaire. Le sable quant à lui a sur le béton, une influence prépondérante selon ses qualités. Ses propriétés à vérifier sont l'Equivalent sable (ES), le module de finesse MF, et la courbe granulométrique.

- **Tracé de la courbe granulaire de référence**

Après le tamisage des granulats, on trace leurs courbes granulométriques. Ensuite on trace la courbe granulaire de référence OAB : le point 0 étant l'origine, le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D_{max} du plus gros granulat et le point A dit le point de brisure a les coordonnées ainsi définies en abscisse à partir de D_{max} .

L'abscisse X_A est déterminée par la formule II.8.

$$X_A = \frac{D_{max}}{2} \quad (II.4)$$

En abscisse : si $D_{max} \leq 20mm$, $X_A = D_{max}/2$

$$\text{Si } D_{max} > 20mm \text{ , Module}(x) = [\text{module}(D_{max}) + 38]/2 \quad (II.9)$$

$$\text{- En ordonnée : } Y_A = 50 - \sqrt{1,25D_{max}} + K + Ks \quad (II.10)$$

Avec K et Ks des coefficients correcteurs. K dépend du dosage en ciment, de la vibration et de la forme des granulats (en particulier la forme du sable).

Deux cas nécessitent une correction supplémentaire du terme correcteur Ks:

- Si le module de finesse est supérieur à 2,5 (la valeur de 2,5 correspond à une valeur optimale), une correction supplémentaire peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6M_F - 15$, avec M_F étant le module de finesse du sable,
- Si le module de finesse est inférieur à 2,5 (la valeur de 2,5 correspond à une valeur optimale) $K_s = 0$,
- Si la qualité du béton est précisée pompable, il convient de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

courante ; le terme correcteur K sera majoré par un terme $K_p = +5$ à $+10$ environs, selon le degré de plasticité désiré. Ces valeurs sont présentées dans le tableau II.5.

Tableau II. 5 : Valeur du terme correcteur K en fonction de la vibration et forme des granulats (du sable en particulier) [13]

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	concassé	Roulé	Concassé
400+ Super plastifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	+0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+7	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

➤ **Utilisation de la courbe granulaire de référence**

Figure II.9 présente la méthode d'utilisation de la courbe granulaire de référence afin de déduire les pourcentages des granulats utilisés. Le segment A'B' relie le point A' à 95% de tamisât cumulés d'un granulat avec le point B' à 5% de tamisât cumulés de la courbe granulométrique du granulat directement supérieur en dimension.

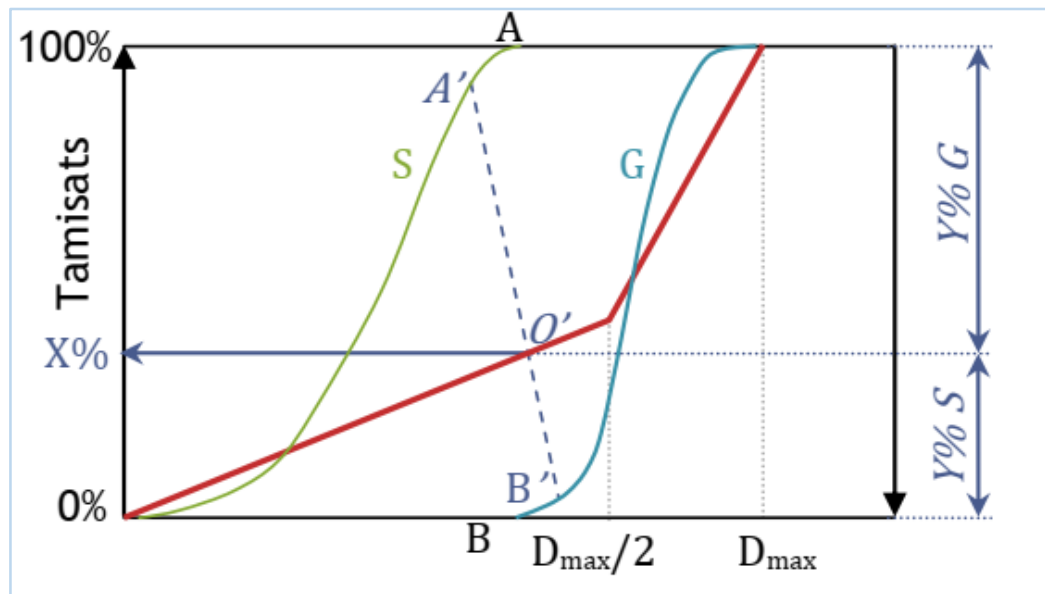


Figure II. 9: Détermination des pourcentages des granulats dans le mélange

➤ **Estimation du coefficient de compacité**

Le coefficient de compacité γ estimé à l'aide du tableau 10 permet de déduire la quantité des différents autres composants de la formulation. La compacité γ est définie comme le rapport entre le volume de solide (V_s) et le volume total du béton ($V_{béton}$) :

$$\gamma = \frac{V_s}{V_{béton}} \quad (\text{II. 11})$$

Sachant que le volume de solides est la somme du volume de ciment V_c ainsi que celle des granulats V_G :

$$V_s = V_c + V_G \quad (\text{II. 12})$$

Tableau II. 6 : Valeurs du coefficient de compacité en fonction du serrage et de la consistance [13]

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

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter une correction : sable roulé et gravier concassé= -0,01 ; sable et gravier concassé= -0,03 [13].

II.4.3. Formulation du béton

La formulation d'un béton se fait en lien avec une opération de construction. Dans l'objectif de déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier de charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, granulats G en kg/m^3). Nous nous placerons dans le cadre de la formulation d'un matériau pouvant servir à fabriquer des éléments structurels à l'intérieur d'un bâtiment d'habitation.

II.4.3.1. Données de base pour la formulation

Les caractéristiques visées pour notre béton sont :

- Consistance recherchée pour la mise en œuvre
- La résistance minimum en compression du béton à 28jours

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

- Détermination du rapport C/E ;
- Détermination de C et E ;
- Détermination de la compacité du squelette granulaire maximum ;
- Détermination des masses de granulats et de la masse volumique théorique du béton.

II.4.4. Confection des éprouvettes de béton

Les éprouvettes sont confectionnées en fonction des calculs de la formulation de la méthode de Dreux Gorisse au chapitre, donnant les dosages en différents constituants en fonction de l'affaissement, de la résistance escomptée ainsi que la classe vraie du ciment.

Le tableau II.7 présente le pourcentage de la substitution de ciment par la poudre de pouzzolane.

Où : B1 est le béton de référence,

- B2 le béton offrant 5% de substitution de ciment par la poudre de pouzzolane ;
 B3 le béton offrant 10% de substitution de ciment par la poudre de pouzzolane ;
 B4 le béton offrant 15% de substitution de ciment par la poudre de pouzzolane ;
 B5 le béton offrant 20% de substitution de ciment par la poudre de pouzzolane.

Tableau II. 7 : Confection des éprouvettes de béton

Béton	Substitution du ciment en %
B1	0%
B2	5%
B3	10%
B4	15%
B5	20%

II.5. CARACTERISATION DU BETON

Nous allons caractériser le béton en fonction des différents essais de caractérisation effectués en l'occurrence celui de l'ouvrabilité sur le béton frais ainsi que celui de la compression sur le béton durcis.

La détermination des caractéristiques du béton est effectuée par l'essai d'ouvrabilité et celui de compression sur les éprouvettes de béton de dimension 16X32cm. Dans cette section nous allons présenter en détails ces essais.

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 fait suivant la norme NF EN 12530-2. Dans cette section nous allons présenter le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage [27].

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 consiste à mesurer l'affaissement à l'aide du cône d'Abrams.

c. Mode opératoire

L'essai se déroule selon 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. A 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 200mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100mm et une hauteur de 300mm. Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams ;
- Une tige d'acier lisse de diamètre 16mm et à extrémité arrondie.

L'image II.10 nous présente l'essai d'affaissement au cône d'abrams.



Figure II. 10 : Affaissement au cône d'Abrams

II.5.1. Résistance à la compression du béton

L'essai de compression mesure la résistance à la compression du béton sur une presse à béton suivant un protocole normalisé. Les résultats sont obtenus par la formule (II.11)

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

- F est la force qui agit sur l'éprouvette en Newton
- A est la section de l'éprouvette en mm

Dans cette section nous allons présenter le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage [27].

a. But de l'essai

Le but de l'essai est de déterminer la résistance à la compression de l'éprouvette de béton de dimension $16 \times 32 \text{ cm}$.

b. Principe de l'essai

L'essai de compression sur le béton consiste à soumettre une éprouvette, placée entre les plateaux d'une presse à compression, à deux forces 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.

d. Appareillage

La machine d'essai est une presse de force, conforme aux normes BS 1881 partie 116 [28]. Les plateaux où contre plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celle de faces de l'éprouvette soumise à l'essai. L'image II.11 présente la presse à béton.



Figure II. 11: Presse à béton

CONCLUSION PARTIELLE

Ce deuxième chapitre présente la nature, l'origine, méthode de formulation des abaques de DREUX qui est utilisé dans la confection des éprouvettes cylindriques de béton

16 × 32 *cm*, les différents essais effectués sur les matériaux (ciment, sable et gravier) ainsi que ceux effectués sur le béton frais et durcis. Le chapitre suivant présente alors les résultats obtenus et leurs interprétations.

Chapitre troisième

PRESENTATION, ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Ce chapitre présente premièrement les résultats des essais auxquels ont été soumis les différents matériaux entrant dans la formulation des bétons, deuxièmement il présente les résultats de la formulation du béton en donnant la composition des éprouvettes. Et en fin il présente les caractéristiques des bétons confectionnés notamment la résistance à la compression à 28 jours pour le béton.

III.1. PRESENTATION DES CONSTITUANTS

II.1.1. Ciment

Le liant utilisé dans le présent travail est le ciment NYATI (CEM/32.5) couramment utilisé dans la ville de Goma. Il est de couleur grise et sa classe vraie est de 31MPa. L'image en figure III.1 nous présente le ciment NYATI.



Figure III. 1 : Ciment NYATI 32.5

III.1.2. Eau de gâchage

L'eau de gâchage employée est potable fournie par la Régie de Distribution d'Eau (REGIDESO) pour la confection des éprouvettes de béton.

III.1.3. Sable

Le sable utilisé dans la présente étude est d'Idjwi, sable roulé. La figure III.2 présente l'image dudit sable.



Figure III. 2 : Sable lavé d'Idjwi

III.1.4. Gravier

Les graviers utilisés dans la présente étude sont concassés à KIBATI. Ils sont issus de la roche volcanique présente dans la ville de Goma. De classe 5/15 et 15/25. La figure III.3 présente l'image de ces graviers.



Figure III. 3 : Graviers concassés

III.1.5. La poudre de pouzzolane

La poudre utilisée comme substituant partiel du ciment est issue du broyage de la pouzzolane nature présente dans la ville de Goma. Ce broyage est suivi du tamisage au tamis de 0,08 mm. Les figures III.4 et III.5 présentent respectivement la pouzzolane et la poudre de pouzzolane.



Figure III. 4 : Pouzzolanes



Figure III. 5 : Poudre des pouzzolanes

III.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR LE CIMENT

Les tableaux III.1, III.2, et III.3 reprennent les résultats des essais sur les ciments.

III.2.1. Essais de consistance

Tableau III. 1 : Résultats de l'essai de consistance

Marque de ciment	Quantité d'eau en %
NYATI	36

III.2.2. Essais de prise

Le tableau III.2 présente le temps de début et de fin de prise de ciment Nyati obtenus sur la pâte à consistance normale.

Tableau III. 2 : Résultats de l'essai de consistance

Marque de ciment	Début de prise	Fin de prise
NYATI	3h 15min 18sec	5h13min 06sec

III.2. 3. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue de ciment obtenu est reprise dans le tableau III.3.

Tableau III. 3 : Résultats de la masse volumique absolue

Marque de ciment	Masse volumique absolue en g/cm^3
NYATI	2,86

III.3. RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRANULATS

III.3. 1. Composition granulométrique

La composition granulométrique de sable 0/5 et des graviers 2/15, 15/25 est présentée sur les figures III.6, III.7 et III.8, ainsi que dans les tableaux 1, 2 et 3 de l'annexe.

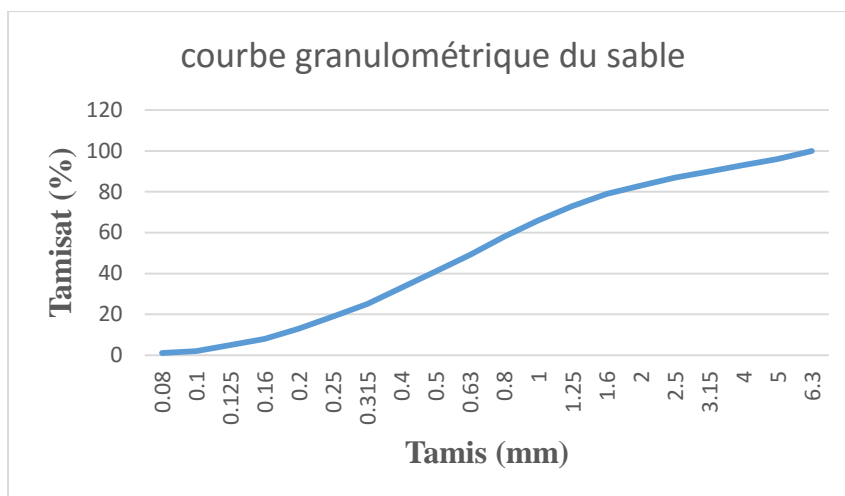


Figure III. 6 : Courbe granulométrique du sable

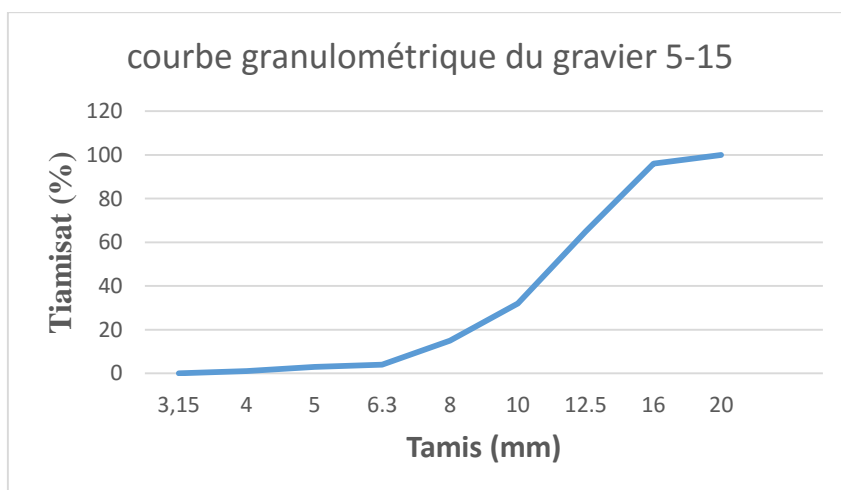


Figure III. 7 : Courbe granulométrique du gravier 5-15

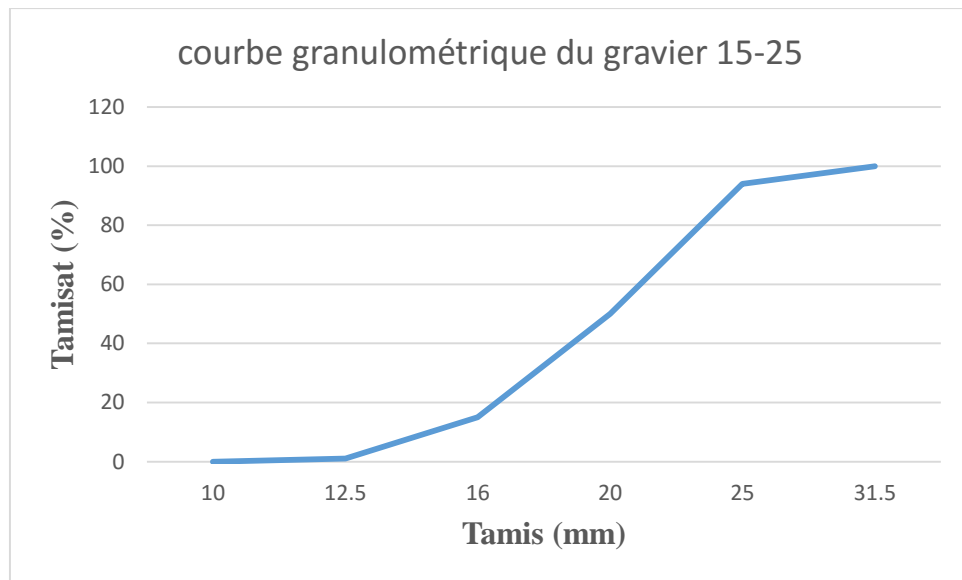


Figure III. 8 : Courbe granulométrique du gravier 15-25

III.3.2. Module de finesse

La valeur du module de finesse de ce sable est de 2,6 Valeur comprise entre 2,2 et 2,8 ce qui atteste ainsi que sa granulométrie est convenable pour la confection des bétons.

III.3.3. Masses volumiques

Le tableau III.4 présente les masses volumiques absolues et apparentes du sable et des graviers.

Tableau III. 4 : Masses volumiques absolues et apparentes des granulats

Matériaux	Masse volumique absolue en g/cm^3	Masse volumique apparente en g/cm^3
Sable roulé (0/5)	2,55	1,74
Gravier concassé (5/15)	2,34	1,11
Gravier concassé (15/25)	2,05	1,06

III.3.4. Degré de propreté de sable

Les résultats d'équivalent de sable sont présentés dans le tableau 16.

Tableau III. 5 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable

Equivalent de sable	
A piston	76%
Visuel	82%

Au vu des résultats présentés dans ce tableau, on constate que l'équivalent de sable visuelle est supérieur à l'équivalent de sable au piston. Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable montrent que la valeur de l'équivalent de sable trouvée dans l'intervalle entre 75 et 85 offre un sable propre à faible pourcentage des fines argileuse, parfaitement convenable pour les bétons de qualité.

III.4. RESULTAT DES ESSAIS SUR LA POUDRE DE POUZZOLANE NATURELLE

La valeur de la masse volumique absolue de la poudre de pouzzolane est présentée dans le tableau III.6.

Tableau III. 6 : Masse volumique de la poudre de pouzzolane

Constituant	Masse volumique absolue en g/cm^3	Masse volumique apparente en g/cm^3
Poudre de pouzzolane naturelle	2,54	1,86

III.5. FORMULATION DU BETON PAR APPLICATION NUMERIQUE

I. FORMULATION DE BASE

1) Données

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

- Résistance visée $f_{c28} = 20\text{MPa}$
- Consistance désirée = 8cm
- Résistance du ciment = 31MPa
- Mode de vibration = Normal
- Etat des granulats = Passable
- Coefficient granulaire = 0,5
- Diamètre du plus gros granulat $D_{max} = 25\text{mm}$

2) Détermination du dosage C et E

$$f_{cm} = 1,15 f_{c28} = 1,15 \times 20 = 23\text{MPa}$$

$$f_{cm} = \sigma_{c28} \times G \times \left(\frac{C}{E} - 0,5\right)$$

$$\text{On a alors, } \frac{C}{E} = \frac{23\text{MPa}}{G \times \sigma_{c28}} + 0,5$$

$$\frac{C}{E} = \frac{23\text{MPa}}{0,5 \times 31\text{MPa}} + 0,5$$

$$\frac{C}{E} = 1,98$$

Avec le rapport $\frac{C}{E} = 1,98$ on trouve qu'en positionnant ce point sur l'axe de la courbe $\frac{C}{E}$ sur la figure 7 Selon l'affaissement ; on trouve un dosage en ciment de $400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

D'où, $\frac{C}{E} = 1,98$ donne $E = 202 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ et comme $D = 25\text{mm}$ alors la correction sur l'eau est obtenue suivant le tableau.

D	E
20	0
25	X
31.5	-4

$$\frac{20-25}{20-31.5} = \frac{0-X}{0+4} \rightarrow X = -1,74$$

$$E = 202 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} - 1,74\% \text{ de } 202 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 198,49 \frac{\text{l}}{\text{m}^3}$$

3) traçage de la courbe granulaire de référence OAB et détermination de proportion de chaque granulat

a. ligne de référence OAB

- 0 est l'origine
 - B est le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique de plus gros granulat.
 - Recherche du point A.
- ❖ Comme $D = 25\text{mm}$ on trouve que $X_A = \frac{D+38}{2} = \frac{25+38}{2} = 31,5\text{mm}$ car $D > 20\text{mm}$
- ❖ $Y_A = 50 - \sqrt{1.25 \times D} + K + K_s$; K dépend du dosage en ciment et lu sur le tableau...
comme $C = 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $K = 0$ et $K_s = 6\text{MF} - 15$ avec $\text{MF} = 2,6 > 2,5$

$$K_s = 6 \times 2,6 - 15 = 0,6$$

Nous trouvons alors que : $Y_A = 50 - \sqrt{1.25 \times 250} + 0,6 = 45\text{mm}$

D'où A (31,5 ; 45)

Ceci donne : %S= 32 % ; G1= 7 % ; G2= 61%.

4) Dosage en granulat

$$V_{\text{Granulat}} = \gamma \times V_{\text{tot.béton}} - V_C$$

$$\gamma = \frac{V_G + V_S + V_C}{V_{\text{tot.béton}}}, \text{ Avec } V_G + V_S = V_{\text{Granulat}}$$

$$V_C = \frac{C}{\rho_C}, \text{ avec } \rho_C = 2,86 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 2860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ alors : } V_C = \frac{400\text{kg}}{2860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,140\text{m}^3 = 140\text{l}$$

Comme $A = 8\text{mm}$, $D = 25\text{mm}$ et la vibration est normal alors γ est obtenu par interpolation, on

a :

γ	D
0,825	20
X	25
0,830	31,5

$$\frac{31,5-20}{31,5-25} = \frac{0,830-0,825}{0,830-X} \rightarrow \gamma = 0,8272$$

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

Et comme les granulats sont des : sable roulé et gravier concassé, $\gamma = 0,8272 - 0,001 = 0,8172$

$$V_C = 0,140\text{m}^3 = 140\text{kg}$$

$$\gamma = 0,8172$$

$$V_{\text{Granulat}} = 1000 \times 0,8172 - 140\text{l} = 677,2\text{l} = 0,6772\text{m}^3$$

$$V_{\text{Sable}} = \%S \times V_{\text{Granulat}} = 0,32 \times 0,6772\text{m}^3 = 0,217\text{m}^3$$

$$V_{\text{Gravier1}} = \%G1 \times V_{\text{Granulat}} = 0,07 \times 0,6772\text{m}^3 = 0,05\text{m}^3$$

$$V_{\text{Gravier2}} = \%G2 \times V_{\text{Granulat}} = 0,61 \times 0,6772\text{m}^3 = 0,413\text{m}^3$$

5) Apport en eau des matériaux

$$W_s = 4,28\%$$

$$W_{G1} = 1,64\%$$

$$W_{G2} = 1,35\%$$

$$\rho_{a,S} = 1,74 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}, \quad \rho_{a,G1} = 1,11 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad \text{et} \quad \rho_{a,G2} = 1,06 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_S = 2,55 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}, \quad \rho_{G1} = 2,34 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad \text{et} \quad \rho_{G2} = 2,05 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

- $S = \rho_{\text{Sable}} \times V_{\text{Sable}} = 2550 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,217\text{m}^3 = 553,35\text{kg}$
- $G1 = \rho_{\text{Gravier1}} \times V_{\text{Gravier1}} = 2340 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,05\text{m}^3 = 117\text{kg}$
- $G2 = \rho_{\text{Gravier2}} \times V_{\text{Gravier2}} = 2050 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,413\text{m}^3 = 846,65\text{kg}$

$$V_{a,S} = \frac{S(1+W_s)}{\rho_{a,S}} = \frac{553,35\text{kg}(1+0,0428)}{1740 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0,332\text{m}^3$$

$$V_{a,G1} = \frac{G1(1+W_{G1})}{\rho_{a,G1}} = \frac{117\text{kg}(1+0,0164)}{1110 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0,107\text{m}^3$$

$$V_{a,G2} = \frac{G2(1+W_{G1})}{\rho_{a,G1}} = \frac{846,65\text{kg}(1+0,0135)}{1060 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0,81\text{m}^3$$

$$E_a = E - E_{\text{Sable}} - E_{G1} - E_{G2}$$

$$E_a = 198,49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - (553,35\text{kg} \times 0,0428) - (117\text{kg} \times 0,0164) - (846,65\text{kg} \times 0,0135)$$

$$E_a = 198,49 - 23,7 - 1,92 - 11,45 = 161,42\text{l}$$

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

Pour 1m³ de béton on a :

$$C= 140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$E= 161,42 \frac{1}{\text{m}^3}$$

$$S= 553,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G1= 117 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G2= 846,65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

III.6. RESULTAT DE LA FORMULATION DU BETON

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse nous a permis d'obtenir les différents dosages des constituants nécessaire d'un mètre cube de béton. Les données fondamentales du béton d'étude à savoir la résistance visée, la consistance désirée, le type de vibration, la résistance du ciment, l'état des granulats, le coefficient granulaire ainsi que le diamètre du plus gros granulat sont repris dans le tableau III.7.

Tableau III. 7 : Données fondamentales de béton d'étude

Données	Valeur
Résistance visée f_{c28}	20MPa
Consistance désirées	8cm
Type de vibration	Normal
Résistance du ciment	31MPa
Etat des granulats	Passable
Coefficient granulaire G	0,8172
Diamètre du plus gros granulat D_{max}	25mm

Le dosage en ciment et en eau été déterminées avec la formule déterminant le rapport ciment sur eau, ainsi que l'abaque en figure 8 présente le dosage en ciment et en eau.

Tableau III. 8 : Dosage en ciment et en eau

Désignation	Valeur ($\frac{Kg}{m^3}$)
Ciment	400
Eau	202

Le dosage en granulats du béton s'exprime en pourcentage obtenu en fonction du tracé de la courbe granulométrique de référence. Le tableau III.9 présente les coordonnées des points OAB.

Tableau III. 9 : Valeurs des coordonnées OAB

Point	X	Y
O	0	0
A	31,5	45
B	45	100

La figure III.9 présente la courbe granulométrique de référence permettant de déterminer le pourcentage des granulats qui entrent dans la formulation du béton.

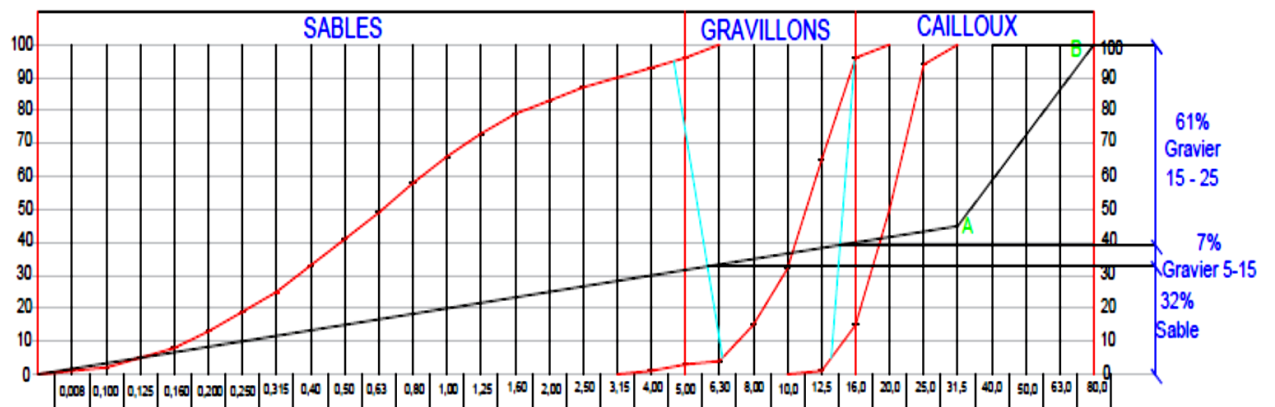


Figure III. 9: Courbe granulométrique de référence

La courbe granulométrique de référence montre que nous avons besoin de 32% de sable, 7% de gravier de classe 5-15 et 61% de gravier 5-25. Le tableau III.10 présente le dosage

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

volumétrique et massique des constituants du béton par mètre cube ainsi que la masse volumique théorique du béton.

Tableau III. 10 : Dosage volumétrique et massique des constituants du béton

Constituants	V (m³)	m (kg)
Ciment	0,14	400
Eau	0,162	202
Sable	0,217	553,35
Gravier 5/15	0,05	112,32
Gravier 15/25	0,413	848,7
Masse vol.th. (kg/m ³)	2116,37	

La composition massique du béton réduite à 3 moules est reprise dans le tableau III.11.

Tableau III. 11 : Formulation des échantillons de 3 éprouvettes de béton

Béton	Ciment CEM II 32.5 (g)	Poudre (g)	Sable Idjwi 0/5	Gravillons Concassés 5/15	Gravillon Concassés 15/25	Eau de gâchage (g)
B1	7716	0	10674	2256	16331	3896,58
B2	7330,2	385,8	10674	2256	16331	3971,58
B3	6944,4	771,6	10674	2256	16331	4046,58
B4	6558,6	1157,4	10674	2256	16331	4121,58
B5	6172,8	1543,2	10674	2256	16331	4196,58

III.7. CARACTERISTIQUES DES BETONS

Nous allons présenter dans cette section les résultats de l'ouvrabilité et de l'essai de compression des bétons B1, B2, B3, B4 et B5. Les éprouvettes des bétons confectionnés ont

été soumises à l'essai de la résistance à la compression uni axiale et à la mesure de l'ouvrabilité. Nous allons présenter dans cette section les résultats obtenus.

III.7.1. Ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton a été déterminé selon la norme NFP 18-451 [29]. Le tableau III.12 nous donne les résultats de l'essai de l'ouvrabilité du béton en étudiant l'affaissement au cône d'Abrams sur les différents pourcentages de substitution du ciment.

Tableau III. 12 : Formulation des échantillons de 3 éprouvettes des bétons

Nom de l'échantillon	Eau de gâchage (g)	Affaissement (cm)
B1	1298,86	8
B2	1323,86	8
B3	1348,86	8
B4	1373,86	8
B5	1398,86	8

Il ressort du tableau III.12 que la valeur de l'affaissement a été maintenue constante et que le matériau de substitution notamment la poudre de pouzzolane a nécessité la variation du dosage en eau.

III.7.2. Résistance à la compression du béton

Les éprouvettes du béton confectionnées ont été soumises à la compression selon la norme NF EN 206/CN. Les valeurs de la résistance à la compression sur des éprouvettes cylindriques formulées à l'aide de la méthode de Dreux en fonction des différentes substitutions sont présentées dans le tableau III.13.

Tableau III. 13 : Résultats de l'essai de compression du béton

Béton	Résistance moyen à la compression(MPa)
B1	16,525
B2	15,956
B3	13,958
B4	12,773
B5	11,797

Ces résultats sont interprétés sur le graphique de la figure III.10.

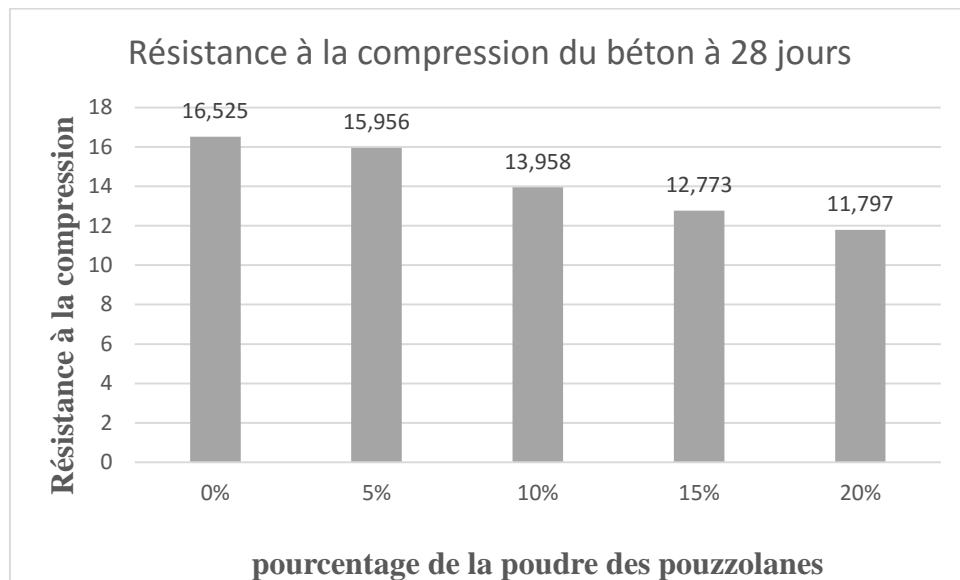


Figure III. 10 : Evolution de la résistance du béton en fonction des pourcentages

Il est remarqué que la formulation du béton B1, la résistance obtenue est de 16,525MPa, et pour la formulation du béton B5, la résistance obtenue est de 11,797MPa.

III.8. INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Après substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes, la résistance du béton diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de substitution. La figure III.11 illustre le rapport du taux de réduction de la résistance du béton par rapport au pourcentage de substitution.

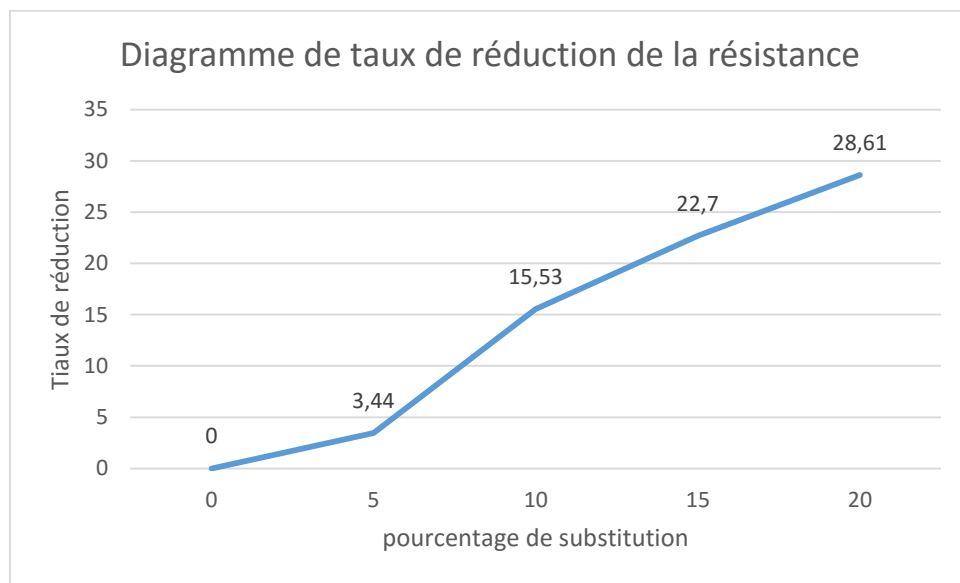


Figure III. 11 : Diagramme du rapport du taux de réduction de la résistance du béton par rapport au pourcentage de substitution

La figure III.11 montre que le taux optimum de réduction de résistance est de 3,44% pour le béton à 5% de substitution du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles. Néanmoins elle montre que le rapport à 10% de substitution du ciment par la poudre des pouzzolanes est de 15,53%, à 15% le rapport est à 22,7% et à 20% le rapport est de 28,61%. Il y a lieu de réaliser la substitution du ciment par la poudre des pouzzolanes. Pour obtenir le taux de réduction de la résistance nous sommes partis de la formule :

$$\text{Formule : } \theta_i = 100 \times \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right) (\%)$$

$$\theta_1(\%) = 100 - \tau_1$$

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

$$= 100 - \frac{R_1}{R_0} \times 100$$

$$= 100 \left(1 - \frac{R_1}{R_0}\right) \quad (\%)$$

$$\theta_1 = 100 \left(1 - \frac{15,956}{16,525}\right) = 3,44\%$$

$$\bullet \theta_2 = 100 - \frac{R_2}{R_0} \times 100$$

$$= 100 \left(1 - \frac{R_2}{R_0}\right) \quad (\%)$$

$$\theta_2 = 100 \left(1 - \frac{13,958}{16,525}\right) = 15,53\%$$

$$\bullet \theta_3 = 100 - \frac{R_3}{R_0} \times 100$$

$$= 100 \left(1 - \frac{R_3}{R_0}\right) \quad (\%)$$

$$\theta_3 = 100 \left(1 - \frac{12,773}{16,525}\right) = 22,7\%$$

$$\bullet \theta_4 = 100 - \frac{R_4}{R_0} \times 100$$

$$= 100 \left(1 - \frac{R_4}{R_0}\right) \quad (\%)$$

$$\theta_4 = 100 \left(1 - \frac{11,797}{16,525}\right) = 28,61\%$$

Où : R_0 est la résistance du béton de référence à 0% de la pouzzolane (B1)

R_1 , la résistance du béton au taux de substitution de 5% du ciment par la poudre de pouzzolane (B2) ;

R_2 , la résistance du béton au taux de substitution de 10% du ciment par la poudre de pouzzolane (B3) ;

R_3 , la résistance du béton au taux de substitution de 15% du ciment par la poudre de pouzzolane (B4) ;

R_4 , la résistance du béton au taux de substitution de 20% du ciment par la poudre de pouzzolane (B5) ;

θ_i étant le taux de réduction de résistance.

CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a été consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats afin d'exprimer l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes sur les propriétés mécaniques du béton notamment l'ouvrabilité et la résistance à la compression à 28 jours.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail s'est articulé sur l'étude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur la résistance à la compression et l'ouvrabilité des bétons. Pour y arriver, en premier lieu, il a fallu caractériser et identifier les constituants entrant dans la formulation du béton notamment le ciment, le sable, les graviers ainsi que la poudre. En deuxième lieu faire la formulation des bétons en troisième lieu faire la caractérisation des bétons.

La caractérisation des granulats a montré que le sable est de classe 0/5, avec un module de finesse de 2,6 ; l'équivalent sable à piston est de 76% et de masse volumique absolue $2,55g/cm^3$. Le gravier G1 est de classe 5/15 de masse volumique $2,34g/cm^3$. Et le gravier de classe 15/25 est de masse volumique $2,05g/cm^3$.

Les éprouvettes cylindriques de béton (quinze éprouvettes) de dimension $16 \times 32\text{ cm}$ ont été confectionnées par la méthode de Dreux Gorisse ; celles-ci ont été écrasées après 28 jours d'Immersion dans l'eau. Les substitutions sont faites en remplaçant la quantité du ciment par la poudre des pouzzolanes à 0% pour avoir le béton de référence, puis 5%, 10%, 15%, 20%. Des toutes substitutions faites, la résistance en compression se situe dans la plage de 11,375MPa à 16,761MPa à 28 jours. Jusqu'à 20% de substitution on constate que le taux de réduction est en dessous de 100%, d'où il y a lieu de substituer le ciment par la poudre de pouzzolane à 20%.

Les résistances obtenues permettent de conclure que la poudre de pouzzolanes peut être utilisée comme matériau de substitution cimentaire dans la construction comme l'ossature des bâtiments ne supportant pas beaucoup de charges.

Nous ne pouvons pas prétendre aborder tous les aspects liés à l'étude de l'influence de la poudre de pouzzolanes c'est ainsi que nous encourageons les autres chercheurs à élargir ces études sur le retrait du béton en cours de durcissement, l'utilisation d'un adjuvant pour améliorer la résistance, l'utilisation du ciment de classe commerciale 42,5 afin d'évaluer le comportement mécanique des bétons. De même une étude comparative économique (financière) entre des structures réalisées avec et sans substitution de la poudre de pouzzolane,

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

les charges sur la structure étant exactement prises égales reste à envisager pour avoir une position juste si la substitution jusqu'à 20% crée un gain.

Bibliographie

- [1] M. W. M. Abdias, Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma, mémoire en département de génie civil, faculté des sciences et technologies appliquées, ULPGL, 2017.
- [2] CIMEBETON, "Fiche technique les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre."CIMEBETON,n% 1TOME II,, 2013.
- [3] G. J. F. George DREUX, nouveau guide du béton et de ses constituants, EYROLLES. 8ème édition, 1998.
- [4] A. CHAREF, "La problématique des granulats au Maroc", Push-Button Publishing,, 2007.
- [5] M. Créusé, Matériaux & composant: Gros oeuvre,Paris: DELAGRAVE,, 1997.
- [6] Ooreka,(Enligne).Avaible:<https://construction,maison.ooreka.fr/astuce/voir.618377/granulats..>
- [7] T.E.Center, Guide pratique du béton: Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables, Zurich:, Holicim (Suisse)SA, janvier 2015.
- [8] Dupain, Granulats,sols,ciments et bétons, Paris: CASTEILLA,, 2004.
- [9] CIMEBETON, "Le bétons: formulation,fabrication et mise en oeuvre"Tome 02, Paris, 2006.
- [10] A. P.C, (2001); béton haute performance, Editions Eyrolles, France, 683P..
- [11] L. R., "(1997); contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, mémoire des études graduées, université MCGILL, Montréal, canada, mai."
- [12] EDUCMAD, "" Le béton, caractéristiques du béton durci," EDUCMAD, 15 Juillet 2016".

- [13] F. NGAPGUE, cours de physique et technologie du béton, cour inédit, faculté des sciences et technologies appliquées, ULPGL 2016-2017 58p.
- [14] A.M. NEVILLE, "Propriétés des bétons, traduit par le CRIB, EYROLLES, 2000; 806P".
- [15] Norme française P 18-553, "Granulats-Préparation d'un échantillon pour essais, AFNOR,," 1990.
- [16] Norme française P 15-301, "Liants hydrauliques-définition, classification et spécification des ciments, AFNOR,," 1994.
- [17] Norme Française EN 196-3, "Méthode d'essai des ciments, partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité, AFNOR Tome3 ,," 1995..
- [18] François NGAPGUE, "Cours de mécanique des sols, cours inédit, faculté des sciences et Technologies appliquées, ULPGL,," 2016-2017, 55p.
- [19] N. Française, "P 18-560, Granulats-Analyse granulométrique par tamissage, AFNOR,," 1990.
- [20] N. française, "NF P 18-540, Granulats-Définitions, conformité, spécifications indice de classement : P 15-540,," 1997;.
- [21] N. Française, "XP P 18-597-2, "Granulats-Détermination de la propriété des sables : équivalent de sable à 10% de fines, AFNOR,," (1996).
- [22] N. Française, "P 18-554, " Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux",," 1990.
- [23] N. Française, "P 18-555, "Granulats- Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables", AFNOR,," 1990;.
- [24] G. DREUX, "Nouveau guide du béton. Eyrolles."
- [25] F. NGAPGUE, "Cours de mécanique des sols. Goma: inédit."
- [26] B. Standard, ", 1881-BS, partie 116,," 1983.
- [27] N. Française, "P 18-451, Béton frais essai d'affaissement au cône, Béton et constituants du béton, T2 ciment et chaux, recueil de normes français AFNOR,," 1990.

ANNEXES

Annexe 1 : TABLEAU D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 5-15

N° TAMIS		OUVERTURE EN [MM]		REFUS PARTIELS	REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(g)	(%)	(%)
3"	50	76.2	80				
2 1/2"	49	63.5	63				
2"	48	50.8	50				
1 1/2"	47	38.1	40				
1 1/4"	46	31.7	31.5				
1"	45	25.4	25				
3/4"	44	19.1	20	0	0	0	100
2/3"	43	16.9	16	80,75	80,75	4	96
1/2"	42	12.7	12.5	597,24	677,99	35	65
3/8"	41	9.52	10	645,6	1323,59	68	32
1/3"	40	7.93	8	315,04	1638,63	85	15
1/4"	39	6.35	6.3	218,49	1857,12	96	4
3/16"	38	4.76	5	42,58	1899,7	97	3
5	37	4	4	12,5	1912,2	99	1
fond				23,8	1936	100	0
Poids de l'échantillon (g)				2000			

Annexe 2 : TABLEAU D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 15-25

N° TAMIS		OUVERTURE EN [MM]		REFUS PARTIELS	REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(g)	(%)	(%)
3"	50	76.2	80				
2 1/2"	49	63.5	63				
2"	48	50.8	50				
1 1/2"	47	38.1	40				
1 1/4"	46	31.7	31.5	0	0	0	100
1"	45	25.4	25	120	120	6	94
3/4"	44	19.1	20	871,18	991,18	50	50
2/3"	43	16.9	16	705	1696,18	85	15
1/2"	42	12.7	12.5	270,32	1966,5	99	1
Fond				20	1986,5	100	0
Poids de l'échantillon (g)				2000			

Annexe 3: ESSAIS SUR LE CIMENT NYATI

1. Essais de consistance

Marque de ciment	Quantité du ciment en (g)	Quantité d'eau en %	Quantité d'eau en (g)	Affaissement
NYATI	500	36	180	6

2. Essais de prise

CIMENT	DESIGNATION	VALEUR
NYATI	Début de l'essai	10h 30'
	Fin de malaxage	10h 40'
	Début de prise	13h 55' 18"
	Fin de prise	15h 53' 06"
	Temps de début de prise	3h 15' 18"
	Temps de fin de prise	5h 13' 06"

3. Essais de masse volumique

CIMENT	DESIGNATION	VALEUR 1	VALEUR 2
NYATI	Masse sans échantillon de ciment (g)	330,35	330,73
	Masse avec échantillon de ciment(g)	381,77	387,26
	Volume initial du pétrole (cm^3)	0	0
	Volume final (cm^3)	18	20
	Masse spécifique (g/cm^3)	2,86	2,85
Moyenne		2,86	

Annexe 4: MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES GRANULATS ET DE LA POUDRE DE POUZZOLANE

1. Sable

N°	DESIGNATION	E1	E2	E3
1	Masse échantillon avant essai (g)	250	250	250
2	Masse initiale de l'eau (cm^3)	275	275	275
3	Volume final (cm^3)	372	372	375
4	Masse spécifique (g/cm^3)	2,57	2,57	2,5
5	Moyenne	2,55		

2. Gravier 5-15

N°	DESIGNATION	E1	E2	E3
1	Masse échantillon avant essai (g)	300	300	300
2	Masse initiale de l'eau (cm^3)	275	275	275
3	Volume final (cm^3)	401	405	403
4	Masse spécifique (g/cm^3)	2,38	2,30	2,34
5	Moyenne	2,34		

3. Gravier 15-25

N°	DESIGNATION	E1	E2	E3
1	Masse échantillon avant essai (g)	300	300	300
2	Masse initiale de l'eau (cm^3)	275	275	275
3	Volume final (cm^3)	419	421	424
4	Masse spécifique (g/cm^3)	2,08	2,05	2,01
5	Moyenne	2,05		

4. Poudre de la pouzzolane

Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.

POUDRE DE LA LOUZZOLANE NATURELLE			
N°	DESIGNATION	PYCNOMETRE	
		1	2
1	Masse sans échantillon de la poudre (g)	45,04	45,28
2	Masse avec échantillon de la poudre (g)	49,04	49,47
3	Masse du distillat (g)	76,21	75,66
4	Masse avec distillat (g)	125,25	125,13
5	Volume du distillat (cm^3)	96,70	98,42
6	Masse volumique du distillat (g/cm^3)	0,79	0,77
7	Masse spécifique (g/cm^3)	2,55	2,52
Moyenne		2,54	

Annexe 5: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES GRANULATS

1. Sable

N°	DESIGNATION	E1	E2	E3
1	Masse échantillon (g)	336,33	337,80	335,1
2	Volume (cm^3)	193,44	193,44	193,44
3	Masse apparente (g/cm^3)	1,74	1,75	1,73
4	Moyenne	1,74		

2. Gravier 5-15

N°	DESIGNATION	E1	E2	E3
1	Masse échantillon (g)	1015,4	1013,2	1015
2	Volume (cm^3)	918,45	918,45	918,45
3	Masse apparente (g/cm^3)	1,11	1,10	1,11
4	Moyenne	1,11		

1. Gravier 15-25

N°	DESIGNATION	E1	E2	E3
1	Masse échantillon (g)	970,9	971	973
2	Volume (cm^3)	918,45	918,45	918,45
3	Masse apparente (g/cm^3)	1,06	1,06	1,06
4	Moyenne	1,06		

Annexe 6: Equivalent de sable

Masse de l'échantillon (g)	120		
	E1	E2	E3
Temps de versement	10h52min	11h05min	11h10min
Début d'agitation	11h04min	11h19min	11h23min
Fin d'agitation	11h05min	11h20min	11h24min
Temps de lecture	11h25min	11h40min	11h44min
H1	12	12,5	11,5
H2 à vue	10,1	9,8	9,6
ES en %	84	78	83
Moyenne en %	82		
H2 à piston	9	9,5	9
ES en %	75	76	78
Moyenne en %	76		

Annexe 7 : RESULTATS DES RESISTANCES

❖ **Tableau des résistances en fonction de la substitution partielle du ciment par ma poudre de pouzzolane.**

N°	pourcentage	I	II	III
1	0%	16,761	16,086	16,728
		16,525		
2	5%	15,958	15,886	16,024
		15,956		
3	10%	13,902	14,200	13,774
		13,958		
4	15%	12,535	12,281	13,505
		12,773		
5	20%	11,885	12,131	11,375
		11,797		

Annexe 8 : EPROUVETTES DU BETON



Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre des pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des bétons.
