

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

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

ETUDE DE L'INFLUENCE DU MELANGE DES
CIMENTS DE CLASSES VRAIES DIFFERENTES SUR
LA RESISTANCE DU BETON

Rédigé par : FURAHA CHIZA Immaculée

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

Option : Génie Civil

Directeur : Master IR. MUHINDO WA MUHINDO Abdias

Encadreur : Ir. KOKO KATUMBI Pascal

ANNEE ACADEMIQUE 2021 - 2022

EPIGRAPHE

« La justice de l'intelligence est la sagesse. Le sage n'est pas celui qui sait beaucoup de choses, mais celui qui voit leur juste mesure. »

Platon

IN MEMORIUM

En mémoire de notre regretté petit frère **KWIZERA MUTAYOMBA Gloire** qui n'a pas cessé de nous encourager mais qui n'a pas pu partager cette joie.

DEDICACE

A nos très chers parents **KAREKEZI MUTAYOMBA Désire** et **UWIMANA CHIZA Bibiane** nous dédions ce travail.

FURAHA CHIZA Immaculée

REMERCIEMENTS

Nous ne pourrions jamais croire que la réalisation de ce travail soit le résultat de notre propre effort, mais elle a été atteinte avec l'apport de plusieurs intervenants ;

En premier lieu, nous adressons notre profonde gratitude à Dieu notre père, source de toute grâce et de tout bien.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre chère université, ULPGL, particulièrement notre faculté de sciences et technologies appliquées, à toutes les autorités académiques et tout le corps professoral pour la formation de qualité et l'accompagnement dont nous avons été bénéficiaire durant ce cycle.

Nous adressons notre reconnaissance très particulièrement au Master Ingénieur MUHINDO WA MUHINDO Abdias, qui malgré toutes les charges sous sa responsabilité a accepté de nous diriger afin de mener à bien ce travail ; et également à l'Ingénieur KOKO KATUMBI Pascal pour avoir encadré ce travail malgré ses multiples responsabilités.

Pour leur soutien indéfectible, nous adressons nos remerciements les plus distingués à nos chers parents KAREKEZI MUTAYOMBA Désire et UWIMANA CHIZA Bibiane, également à tous nos frères et sœurs, KALEMA KAVUNDERI Freddy, MBABAZI MUTAYOMBA Ruth, UWINEZA MUTAYOMBA Joséphine, TUZA KAREKEZI Nolan, MUTAYOMBA Cédric, MUTAYOMBA Claude, SAIBA Adidja, MUTAYOMBA Jacques, MUTAYOMBA Claudine, à toute ma famille, nous disons merci pour leur encouragement.

À nos chers camarades et frères BAHATI KHASHI Yvan, FALOPE, NAOMI MASASI pour le sacrifice consenti et l'accompagnement, dans la réalisation de ce travail, nous adressons notre sincère gratitude.

À tous nos amis et camarades, en particulier KAOZI MBAYO Sylvestre, CIRIGIRIH SOKI Marie-Jeanne, HATEGEKA GASORE Claude, MWAKA FUETA Etienne, BARAKA NZAMU Israël, MAYELE Guelord, nous adressons nos sincères remerciements. Nous ne pouvons pas oublier toutes les personnes, dans l'ombre, dont les noms ne sont pas cités ici mais qui de toutes les manières nous ont soutenu ; nous leur sommes très reconnaissant.

FURAHA CHIZA Immaculée

RESUME

Ce travail porte sur une étude d'influence du mélange des ciments de classes vraies différentes sur la résistance du béton. Plusieurs bétons ont été formulés dont deux bétons témoins l'un avec ciment de 32.5 et l'autre de 42.5, un béton contenant 50% de ciment 32.5 et 50% de ciment de 42.5, un béton contenant 75% de ciment de 32.5 et 25% de ciment de 42.5 et un autre contenant 75% de ciment de 42.5 et 25% de ciment de 32.5 en vue de la détermination de la proportion qui donnerai un béton dont les propriétés avoisineraient plus les propriétés d'un béton idéal. En confectionnant ces bétons, à l'état frais, le caractère d'ouvrabilité a été recherché en majorant les quantités d'eaux obtenues de quelques pourcentages dont 15% pour le béton de ciment de 42.5, 20% pour le béton de ciment de 32.5 , 20% pour le béton contenant 50% de ciment de 32.5 et 50% de ciment de 42.5, 10% pour le béton contenant 75% de ciment de 42.5 et 25% de ciment de 32.5, 15% pour le béton contenant 75% de ciment de 32.5 et 25% de ciment de 42.5. A l'état durci, la résistance à la compression était de 11.4653MPa pour un béton de ciment 42.5, 10.005MPa pour un béton de ciment de 32.5, 6.014MPa pour un béton contenant 50% de ciment de 32.5 et 50% de ciment de 42.5, 12.588MPa pour un béton contenant 75% de ciment de 42.5 et 25% de ciment de 32.5 et 11.0426MPa pour un béton contenant 75% de ciment de 32.5 et 25% de ciment de 42.5. La justification de l'obtention de ces faibles résistances serait l'utilisation des ciments conservés pendant trop longtemps.

TABLE DES MATIERES

EPIGRAPHE.....	i
IN MEMORIUM	ii
DEDICACE	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
RESUME	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	x
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : REVUE DE LA LITTERATURE	4
1.1 Les constituants du béton	4
1.1.1 LE CIMENT	4
1.1.2 LES GRANULATS	13
1.1.3 L'EAU [3].....	15
1.1.4 LES ADJUVANTS	17
1.2 LA METHODE DE FORMULATION DU BETON	22
1.2.1 Méthode de Bolomey [11]	23
1.2.2 Méthode d'Abrams [11]	23
1.2.3 Méthode de Faury [11].....	23
1.2.4 Méthode de Vallette [11]	24
1.2.5 Méthode de Baron et Lesage [11].....	24
1.2.6 Méthode de Dreux et Gorisse	24
1.3 LES PROPRIETES DU BETON	25

1.3.1	LES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS [7].....	25
1.3.2	LES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT DURCI	27
1.4	TYPES DES BETONS [13].....	28
1.4.1	Béton auto plaçant (BAP)	28
1.4.2	Le béton à haute performance (BHP)	28
1.4.3	Béton ordinaire.....	28
1.4.4	Béton de poudre réactive (BPR)	28
1.4.5	Béton de fibre.....	29
1.4.6	Béton armé	29
1.4.7	Béton léger	29
1.4.8	Béton lourd.....	29
1.4.9	Béton préfabriqué.....	30
1.4.10	Béton compacte au rouleau (BCR)	30
1.4.11	Béton réfractaire.....	30
1.4.12	Béton de terre	30
1.4.13	Béton à durcissement rapide	30
1.5	DOMAINE D'UTILISATION DU BETON [14].....	30
1.5.1	Le béton dans le bâtiment	31
1.5.2	Les travaux publics	31
1.6	CONCLUSION PARTIELLE.....	32
Chapitre 2 : MATERIELS ET METHODES DE RECHERCHE		33
2.1	NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS	33
2.1.1	Le ciment	34
2.1.2	Les granulats	34
2.1.3	L'eau de gâchage	35
2.2	CARACTERISATION DES CONSTITUANTS.....	35
2.2.1	ESSAIS SUR LES GRANULATS	35
2.2.2	Essais sur le ciment.....	42
2.3	CARACTERISATION DU BETON	43
2.3.1	Essais sur béton frais [3]	43
2.3.2	Essai sur le béton durci	45

2.4	MÉTHODE PRATIQUE POUR LA COMPOSITION DES BÉTONS - MÉTHODE DITE « DREUX-GORISSE » [4]	45
2.4.1	Données de bases	46
2.4.2	Détermination du dosage en ciment	47
2.4.3	Détermination du dosage en eau	48
2.4.4	Détermination du dosage en granulat	49
2.4.5	Coefficient de compacité	50
2.4.6	Proportions des granulats	52
2.5	CONCLUSION PARTIELLE	54
Chapitre 3 : PRESANTATION DES RESULTATS		55
3.1	CARACTERISTIQUES DES GRANULATS	55
3.1.1	L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE	55
3.1.2	MODULE DE FINESSE	59
3.1.3	DEGRE DE PROPRETE DU SABLE	60
3.1.4	MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS	60
3.1.5	ABSRPTION D'EAU	61
3.2	CARACTERISTIQUES DU LIANT	61
3.2.1	Masse volumique du ciment	61
3.2.2	Essai de consistance	61
3.3	RESULTATS DES ESSAIS SUR LE BETON	62
3.3.1	Résultats de la méthode de DREUX-GORISSE	62
3.3.2	Ouvrabilité du béton	64
3.3.3	Résistance à la compression	65
3.4	CONCLUSION PARTIELLE	66
CONCLUSION GENERALE		67
Annexe A Démonstrations		Erreur ! Signet non défini.
A.1	Formulation du béton de ciment	68
A.2	Essai sur les granulats	74
1.	Masse volumique	74
2.	Équivalent de sable	76
A.3	Essai sur le ciment	76

1. Masse volumique absolue du ciment	76
2. Consistance normale	77
Bibliographie.....	78

LISTE DES ABREVIATIONS

AG : Analyse granulométrique

BAP : Béton autoplaçant

CHF : Ciment de Haut Fourneau

CPA : Ciment Portland artificiel

CPJ : Ciment Portland Composé

Mg : Dosage en graviers

Ms : Dosage en sable

Mc : Dosage en ciment

Meau : Dosage en eau

g : grammes

kg : Kilogrammes

m : Mètre

Cm : Centimètres

EN : Norme Européenne

ES : Équivalent de sable

Mf : Module de finesse

% : Pourcentage

%_S : Pourcentage de sable

%_G : Pourcentage de gravier

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1-1 : Classes normalisées de résistance en compression du ciment [6]</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 1-2 : Valeurs minimales garanties pour chaque classe de résistance [6]</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 1-3 : Classe des bétons selon l'affaissement [7]</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 2-1 : Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [10].....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 2-2 : Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [16]</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 2-3 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 2-4 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 20\text{mm}$).....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 2-5 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence : $(y = 50 - \sqrt{D} + K)$.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 2-6 : Valeurs du coefficient de compacité γ</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 3-1 : Données d'analyse granulométrique du sable.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 3-2 : Données d'analyse granulométrique des graviers.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 3-3 : Résultat de l'essai de propreté du sable.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 3-4 : Valeurs masses volumiques des granulats.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 3-5 : Masses volumiques du ciment</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3-6 : Les résultats de l'essai de consistance.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3-7 : Données de base.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3-8 : Dosage en ciment et en eau</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 3-9 : Coordonnées de la courbe de référence OAB.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 3-10 : Dosages massiques des granulats.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 3-11 : Résultats des affaissements</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 3-12 : Résultats des essais de compression.....</i>	<i>65</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1-1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport ciment/eau et de l'ouvrabilité désirée (affaissement du cône) [8]</i>	16
<i>Figure 1-2 : Pourcentage d'air entraîné recommandé suivant la grosseur des granulats (d'après R. E. Hess) [4]</i>	19
<i>Figure 1-3 : Schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [4]</i>	21
<i>Figure 2-1 : ciment PRIME</i>	34
<i>Figure 2-2 : types des granulats utilisés</i>	35
<i>Figure 2-3 : Matériels utilisés pour l'analyse granulométrique</i>	37
<i>Figure 2-4 : Matériels utilisés pour l'équivalent de sable</i>	40
<i>Figure 2-5 : Cône d'Abrams</i>	44
<i>Figure 2-6 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (Affaissement au cône)</i>	48
<i>Figure 3-1 : Courbe granulométrique du sable</i>	57
<i>Figure 3-2 : Graphique de la courbe granulométrique des graviers concassés</i>	59
<i>Figure 3-3 : Histogramme des résistances</i>	66

INTRODUCTION GENERALE

La République Démocratique du Congo, notre pays comme d'autres pays en plein développement, exige des grandes et suffisantes connaissances sur les matériaux utilisés en construction car ce secteur dépend en grande partie des matériaux.

En effet, dans ce cadre de développement, le béton est le matériau le plus utilisé en génie civil vu sa présence dans tout genre des travaux de construction par exemple ceux des bâtiments, des constructions civiles, des ouvrages routiers, etc. mais aussi il fait partie du cadre de la vie de l'être humain à cause de ses performances et sa souplesse d'emplois. [1]

À la fin du XIXe siècle une des préoccupations les plus récurrentes du génie civil, était celle de pouvoir prédire les propriétés du béton tant à l'état frais que durci. En réalité, aujourd'hui au début du XXIe siècle, la préoccupation est toujours plus ou moins la même. Toutefois durant cette période la compréhension certains aspects et subtilités du matériau était important. [2]

La formulation d'un béton, revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, de gravier, de l'eau et éventuellement des adjuvants entrant dans la composition d'un m³ de béton partant des propriétés recherchées. Et donc c'est par les propriétés recherchées que sont définis les dosages en différents constituants du béton.

Le ciment est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. Le choix du type de ciment et de son dosage dépend à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature d'autres composants (granulométrie des granulats). Le dosage en ciment est dépendant de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés etc.

Il existe différents types de ciments en fonction de la composition, du mode de fabrication et de classe commerciale d'où il y a des ciments de classe commerciale 32.5N,32.5R,42.5N,42.5R, 52.5N, 52.5R qui sont utilisés en fonction des résistances recherchées. Comparativement au béton confectionné avec un ciment de classe commerciale 32.5N ou 32.5R, le béton confectionné avec un ciment de classe commerciale 42,5N ou 42.5R présente une résistance à

la compression élevée. Le grand problème qui se pose c'est l'ignorance des résultats que peut produire le mélange de deux classes vraies différentes mais aussi l'ignorance des proportions qui peuvent donner ou avoisiner les résistances désirées.

Vu le sujet, la grande question qui susciterait l'attention est : est-ce possible d'atteindre un mélange susceptible de produire les mêmes propriétés en terme de résistance qu'un béton témoin ?

Pour y arriver ,il serait important d'étudier les différents matériaux importants à la confection d'un béton ordinaire ;confectionner les bétons témoins de classe commerciale 42.5N et celui de 32.5N ;confectionner des bétons ayant différentes proportions en ciment de classe commerciale 42.5N et celui de 32.5N (50% de 42.5N sur 50% de 32.5N ;75%de 42.5N sur 25% de 32.5N ;25% de 42.5N sur 75% de 32.5N) ; soumettre les échantillons à l'essai de compression ;comparer les résultats obtenus après formulation et essais tout en comparant les différentes propriétés obtenues à l'état frais et durci ; et enfin interpréter les résultats en fonction des résistances obtenues et du dosage en ciment utilisé.

Étant donné que la préoccupation reste la même, celle de prédire les propriétés du béton, le choix de ce sujet a été motivé par le fait qu'aujourd'hui la construction ne tient plus compte des propriétés du béton vu que chaque maitre d'œuvre fait ce qui lui semble bon et qui l'arrange sans pour autant tenir compte des conséquences.

Trouver les résultats de ce mélange souvent fait arbitrairement et les proportions nécessaires du mélange de ces deux ciments de classes commerciales différentes pour l'obtention de la résistance désirée dans le cas où le mélange influe positivement constituent l'intérêt de ce travail.

Cette recherche vise à présenter les différents effets que peut avoir le mélange des ciments de classes vraies différentes comme la baisse ou l'augmentation de la résistance, son influence sur le temps de prise, sur la consistence, sur l'ouvrabilité, etc.

Plusieurs travaux ont été consultés dont celui de monsieur KAMBALE MBAVUMOJA Grace qui a plus attire notre attention. Son travail a porté sur l'étude des classes vraies des ciments

présents dans la ville de Goma de classe commerciale 32,5 en vue de leur meilleure utilisation. Après essai de compression, il a constaté que les ciments Interlac et Nyati ont une résistance supérieure à 90% de la classe commerciale respectivement 32,75MPa et 31MPa.

Hormis l'introduction et la conclusion générale, le travail est subdivisé en trois chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur le béton notamment sa définition ,ses constituants, la méthode de sa formulation, les types des bétons, le domaine d'utilisation enfin la conclusion partielle ; un deuxième chapitre parle de la revue de la littérature précisément de la nature des matériaux ,de la caractérisation des constituants, de la méthode pratique pour la composition du béton et la conclusion partielle et enfin un troisième chapitre qui porte sur la présentation et interprétation des résultats.

Chapitre 1 : REVUE DE LA LITTERATURE

INTRODUCTION

Le béton est une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement du mélange de liant, d'eau, de granulats avec éventuellement des adjuvants choisis de façon rationnelle. [1]

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde : environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement. [3]

Comme dit ci-haut, le béton est un ensemble de plusieurs matériaux. D'où ce présent chapitre se focalisera sur l'étude du béton et ses constituants surtout les ciments en particulier les constituants du ciment, les types des ciments et les classes de résistance du ciment qui constitue le point sensible de l'étude. Puisque le béton est constitué de plusieurs éléments, cette étude ne s'est pas arrêtée à l'étude du ciment mais aussi à l'étude des différentes méthodes de formulation du béton, l'étude des caractéristiques de celui-ci plus précisément les caractéristiques à l'état frais et celles à l'état durci, un autre point traite de la typologie des bétons, et un autre point s'attèle au domaine d'utilisation du béton et enfin la conclusion partielle du chapitre.

1.1 Les constituants du béton

Dans cette partie nous allons parler des constituants du béton qui sont : le ciment, les granulats, les adjuvants et l'eau.

1.1.1 LE CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de

chaux et de silice réactive devant être au moins de 50 % de la masse du ciment. [4] C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. [1]

1.1.1.1 Les constituants du ciment

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés, des fumées de silice. Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques. [4]

1.1.1.1.1 Clinker Portland (K)

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériau hydraulique présentant sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- silicate tricalcique également dénommé « alite », C_3S , dont la formule est $3CaO, SiO_2$;
- silicate bi calcique ou « bélite », C_2S , de formule $2CaO, SiO_2$;
- aluminate tricalcique C_3A , de formule $3CaO, Al_2O_3$;
- alumino-ferrite tétra calcique C_4AF , de formule $4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$ (Le ciment Portland contient au moins 95 % de clinker).

Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases sont en moyenne de : 50 à 70 % pour le C_3S ; 5 à 25 % pour le C_2S ; 2 à 12 % pour le C_3A ; 0 à 15 % pour le C_4AF .

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases, c'est ainsi que :

- Le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C_2S , donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.
- Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme ; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.

- L'aluminate tricalcique C3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale. Elle est par ailleurs facilement attaquée par les sulfates.
- L'alumine-ferrite tétra calcique C4AF, qui forme une solution solide de C2A et C2F, réagit moins vite que C, A ; son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

- De la chaux libre dont le pourcentage ne doit pas excéder 2% dans le clinker pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau ;
- De l'oxyde de magnésium MgO, encore appelé péri clase, qui, non combiné, peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

De ce qui précède, il ressort qu'un ciment contenant par exemple 60 % de C3S Ainsi qu'un pourcentage en C3A supérieur à 10 %, présentera de fortes résistances Initiales et pourra être avantageusement utilisé par temps froid, alors qu'un ciment dont le pourcentage en C3S est supérieur à 40 % et celui en C, A n'excède pas 5 %, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé par temps chaud. [4]

1.1.1.1.2 Laitier granulé de haut-fourneau (S)

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

1.1.1.1.3 Cendres volantes (V et W)

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être :

- siliceuses (V), auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est à dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation :

- ou calciques (W), auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes siliceuses (V) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

1.1.1.1.4 Pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %). D'alumine et d'oxyde de fer.

1.1.1.1.5 Schistes calcinés (T)

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800 °C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés. Actuellement les ciments fabriqués en France ne comportent pas de schistes calcinés.

1.1.1.1.6 Calcaires (L)

Les calcaires utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, c'est à dire lorsqu'ils représentent plus de 5 % de la masse totale du ciment, doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 , supérieure à 75 % en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit au plus de 1,20 g pour 100 g et une teneur en matières organiques (TOC) au plus égale à 0.5 %.

1.1.1.1.7 Fumées de silice (D)

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Elles doivent contenir au moins 85 % de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes.

1.1.1.1.8 Constituants secondaires

Les constituants secondaires peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion : S :5 %, exception faite du clinker ;
- Soit des fillers (F), leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3 %. Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment. Ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

1.1.1.1.8.1 Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium a pour effet de réguler la prise du ciment.

Le sulfate de calcium qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hémihydrate, doit être ajouté en faible quantité, c'est à dire de l'ordre de 3 à 5 % maximum.

1.1.1.1.8.2 Additifs

Les additifs ne doivent présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses

extrêmement faibles. Ils agissent comme défloculant, empêchant ainsi les phénomènes de réagglomération des grains en cours de broyage.

Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, bétons ou coulis qui, dans ce cas, agissent sur une caractéristique précise mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée en vue d'éviter d'éventuelles incompatibilités avec d'autres produits. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne devant pas dépasser 0,5 % de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CHF-CEM III/A ou B et des CLK-CEM III/C, pour lesquels la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1 %.

[4]

1.1.1.2 Types des ciments [5]

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [6]. Nous présentons les types des ciments ainsi que les classes de résistances du ciment.

1.1.1.2.1 Les ciments Portland

Il existe plusieurs types des ciments portland en fonction de la teneur en différents constituants dont le clinker et certains constituants secondaires.

1.1.1.2.1.1 Le ciment Portland : CEM I

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

1.1.1.2.1.2 Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

1.1.1.2.1.3 Le ciment de haut fourneau : CEM III

Il contient entre 36 et 95 % de laitier et 5 à 64 % de clinker.

1.1.1.2.1.4 Le ciment au laitier et aux cendres : CEM V/A ou B

Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.

1.1.1.2.1.5 Les autres ciments

Outre les ciments portland, il existe d'autres ciments qui sont utilisés en fonction du domaine d'utilisation.

1.1.1.2.1.5.1 Ciment prompt naturel (CNP) NF P 15-314

Le ciment prompt naturel est un produit, à prise rapide, et à résistances élevées à très court terme. La résistance du « mortier 1/1 » (une partie de ciment pour une partie de sable en poids) à 1 heure est de 6 MPa.

Le début de prise commence à environ 2 mn, s'achève pratiquement à 4 mn. Le ciment prompt naturel s'utilise en mortier avec un dosage généralement de deux volumes de ciment pour un volume de sable, et éventuellement en béton.

Dans les cas d'urgence nécessitant une prise immédiate (aveuglements de voies d'eau), il est possible de l'employer en pâte pure.

Parmi les nombreux emplois, on peut citer :

- Scellements ;
- Enduits de façade (en mélange aux chaux naturelles), bétons projetés, moulages ;
- Colmatage et travaux à la mer ;

Quelques précautions sont à prendre lorsqu'on emploie du ciment prompt naturel : ne pas rebattre un mortier ou lisser un enduit pour ne pas « casser » la prise ; éviter particulièrement l'excès d'eau.

1.1.1.2.1.5.2 Ciment alumineux fondu (CA) NF P 15-315

Le ciment alumineux fondu est particulièrement adapté aux domaines suivants :

- Travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels) ;
- Ouvrages en milieux agricoles, canalisations, assainissement ;
- Fours, cheminées (bétons réfractaires) ;
- Travaux de réparation ;

- Scellements (en mélange avec du ciment Portland pour la préparation de mortiers à prise réglable).

1.1.1.2.1.5.3 Ciment à maçonner (CM) NF P 15-307

Ces ciments, dont les résistances sont volontairement limitées par rapport aux ciments classiques, conviennent bien pour la confection des mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduit, crépit...). Ils peuvent être également utilisés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles.

Ces ciments ne conviennent pas pour les bétons à contraintes élevées ou les bétons armés.

1.1.1.2.1.5.4 Le ciment blanc

La teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et kaolin) débarrassées de toutes traces d'oxyde de fer. Les caractéristiques sont analogues à celles des ciments portland gris (norme NF EN 197-1). Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents. La pâte peut être elle-même colorée à l'aide de pigments minéraux, ce qui fournit des bétons avec une grande variété de teintes tant pour les bétons de structure que pour les bétons architectoniques et les enduits décoratifs. La composition du béton doit être bien étudiée en fonction des granulats et des effets recherchés.

1.1.1.3 Classes de résistance du ciment [6]

Les ciments sont répartis en trois classes, 32,5 ; 42,5 et de 52,5 définies par la valeur minimale de la résistance en compression du ciment normal à 28 jours.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours et exprimée en MPa. Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours. Le tableau 1-1 présente les classes de ciments et leurs résistances en compression caractéristique.

Tableau 1-1 : Classes normalisées de résistance en compression du ciment [6]

Désignation de la classe	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance à long terme	
	A 2 jours	A 7 jours	A 28 jours	
32,5 N	-	≥ 16	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 N	≥ 10	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 N	≥ 20	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	≥ 30	-		

La conformité d'un lot de ciment est appréciée pour ce qui concerne la résistance à la compression en fonction des valeurs du tableau suivant qui sont garanties (valeurs limites inférieures). Le tableau 1-2 présente les valeurs minimales garanties pour chaque classe de résistance.

Tableau 1-2 : Valeurs minimales garanties pour chaque classe de résistance [6]

Échéance	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
2 jours	-	8,0	8,0	18,0	18,0	28,0
7 jours	14,0	-	-	-	-	-
28 jours	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0

Toutefois, il est demandé de réaliser une série d'essai de résistance en compression, au laboratoire, sur le ciment pour voir si la résistance indiquée sur l'étiquette est conforme à la résistance voulue après 28 jours. La résistance qu'on trouve après les essais est appelé la résistance vraie ou encore la classe vraie du ciment.

1.1.2 LES GRANULATS

Par définition, on appelle « granulats » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation est abandonnée depuis fort longtemps. [4]

1.1.2.1 Type des granulats [7]

On distingue deux types des granulats qui sont les granulats naturels (roulés et concassés) et les granulats artificiels.

i. Les granulats naturels

Les granulats naturels sont faits des granulats roulés et des granulats concassés.

1) Les granulats roulés

Ce sont des granulats à forme arrondies et de nature calcaire ou silico- calcaire. Ils proviennent de dragages en rivière ou d'extraction dans les terrasses alluviales, ainsi ils sont lavés pour être débarrassé des argiles et d'autres impuretés.

2) Les granulats concassés

Ils sont issus des roches de carrière dures et compactes (granites, gneiss, basaltes, porphyres, diorites, pouzzolane, calcaires durs, grès etc.) Il faut éviter les roches décomposables ou donnant au concassage des granulats plats. Comparativement aux granulats roulés, les granulats concassés eux nécessitent un dépoussiérage en vue d'éliminer les fines particules inférieures à 0,8 mm, particules nuisibles à la résistance des bétons.

ii. Granulats artificiels et spéciaux

Ces granulats peuvent provenir soit des sous-produits industriels, soit des fabrications spéciales en usine, soit des minéraux dont l'emploi est réservé à des usages spéciaux.

1) Granulats de laitier

Le laitier de haut fourneau, refroidi lentement, est proche d'une roche artificielle cristallisée. Il est ensuite traité comme les granulats concassés.

2) Les granulats légers

Les granulats légers sont généralement l'argile expansée (cuisson au four à 1100-1300°C) de matière préalablement granulée. Après cuisson on obtient des granulats dont le cœur est alvéolaire et la périphérie plus dure ; le polystyrène expansé (polystyrène mélangé à du kaolin cuit à vapeur) ; la vermiculite fabriquée avec certains micas ; la perlite, à base de laves volcaniques, etc.

3) Les granulats spéciaux

Ces granulats servent à la fabrication des bétons spéciaux, tel que les bétons réfractaires (chromite, corindon, etc.) et les revêtements des sols des bâtiments industriels (limonite, magnétite, font en paillettes, corindon, hématite, etc.).

1.1.2.2 Le classement des granulats

Partant des dimensions extrêmes d et D des granulats, on distingue cinq classes granulaires principales (normes NF P 18-101) :

- Les fines : $0/d$ avec $d \leq 0,08$ mm
- Les sables : $0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm
- Les gravillons : d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm

- Les graves 0/D avec $6,3 \text{ mm} < D \leq 80 \text{ mm}$

Les valeurs de d et D des classes granulaires a/D ainsi définies sont déterminées en considérant que les granulats correspondant à ces dimensions doivent être prépondérant dans l'échantillon. La résistance mécanique des granulats peut s'exprimer par des résistances mécaniques à la fragmentation, à l'usure et au polissage. Elle est donc fonction des caractéristiques intrinsèques de la roche d'origine.

Le classement des granulats se fait par criblage. Lorsque l'on est en présence d'un sable pauvre en éléments fins de granularité constante (à l'exemple des sables de certains cours d'eau), on peut le corriger en y ajoutant un sable fin, soit naturels à grains ronds, soit broyé en proportion convenable pour obtenir un sable composite de granularité admissible. Il ne faudrait pas confondre la granularité, l'ensemble des caractéristiques définissant l'état granulaire d'un produit, de la granulométrie qui est la mesure des dimensions des grains ou fragments.

En présence d'un sable très hétérogène, tantôt pauvre en éléments fins, tantôt excédentaire, la solution consiste à procéder à une coupure interne, à une maille judicieusement choisie, généralement comprise entre 0,4 et 0,8mm. On obtient ainsi deux sables, un sable fin et un gros sable, qui correctement dosés lors de la fabrication du béton, permettent d'obtenir un sable composite acceptable.

1.1.3 L'EAU [3]

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue.

En réduisant la quantité d'eau en augmenter la résistance et pour une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les

adjuvants peuvent jouer un rôle. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303, a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure 1-1 montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé.

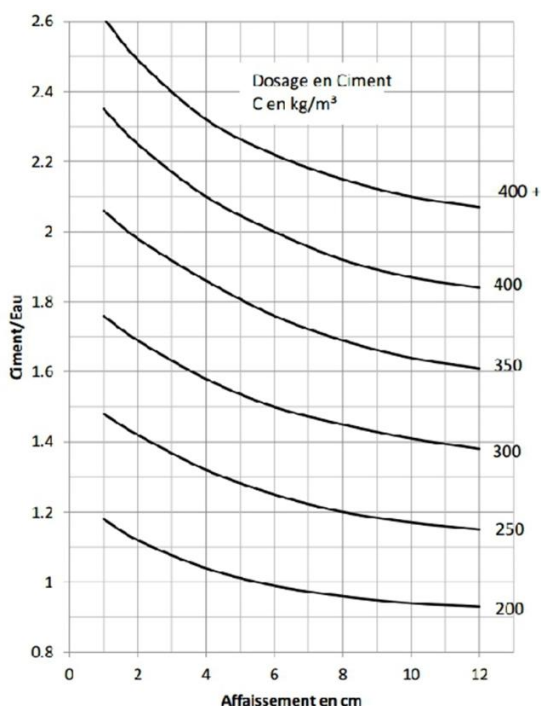


Figure 1-1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport ciment/eau et de l'ouvrabilité désirée (affaissement du cône) [8]

1.1.4 LES ADJUVANTS

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. [9] Les plus connus sont : Entraîneur d'air, Réducteur d'eau à moyen ou à forte action, accélérateur ou retardateur de prise etc.... L'addition de ces produits dans le béton engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes. [10]

1.1.4.1 Classification et utilisation [4]

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ». Les normes européennes retiennent la classification suivante : Plastifiants réducteurs d'eau, Superplastifiants hautement réducteurs d'eau, Rétenteurs d'eau, Entraîneurs d'air, Accélérateurs de prise, Accélérateurs de durcissement. Retardateurs de prise, et Hydrofuges.

Certains adjuvants peuvent avoir plusieurs de ces fonctions. On parle alors, en France, de fonction principale et de fonction secondaire. Exemple : plastifiant réducteur d'eau (ou superplastifiant hautement réducteur d'eau) et retardateur.

Il existe également d'autres adjuvants notamment : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, les générateurs de gaz, etc. Certains d'entre eux sont décrits et leurs caractéristiques définies dans les normes spécifiques.

1.1.4.1.1 Plastifiants réducteurs d'eau

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ils provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C, donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. Ils

doivent, par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110 % minimum et permettre une réduction du dosage en eau d'au moins 5%.

1.1.4.1.2 Superplastifiants hautement réducteurs d'eau

Cette désignation complexe, traduction de l'anglais Superplasticizers - High Range Water Reducers, se rapporte à des produits qu'en France on appelait auparavant « fluidifiants ».

Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport au béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant, à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12 %, en fait ce pourcentage est généralement réduit de 15 à 25 % suivant le dosage. Concernant les résistances à la compression elles doivent être de 140 % à 1 jour et de 115 % à 28 jours.

1.1.4.1.3 Rétenteurs d'eau

Ce sont des produits d'addition généralement en poudre qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons. On utilise généralement des méthyl cellulose (Methocel) qui ont la propriété d'augmenter de volume en fixant l'eau libre du béton.

Les rétenteurs d'eau sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment.

1.1.4.1.4 Entraîneurs d'air

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résines de synthèse : résine Vinsol, aryl alkyl sulfonates, acides gras, etc.

Les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage.

Ces adjuvants introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage sous forme d'un très grand nombre de micro-bulles, dont 80 % d'entre elles ont un diamètre inférieur à 100 microns, la plupart étant comprises entre quelques microns et quelques dizaines de microns. Ces microbulles ne doivent pas être confondues avec l'air occlus, constitué de bulles de tous diamètres généralement supérieurs à 1 mm, réparties aléatoirement dans le béton, qui se trouvent emprisonnées pendant la mise en place. Ils améliorent essentiellement :

- La plasticité et l'ouvrabilité du béton, les bulles agissant comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement,
- La résistance au gel du béton durci (antigélif) ; les très nombreuses petites bulles d'air disséminées dans la masse constituant en effet autant de petits vases d'expansion dans le réseau des canalicules internes pour l'eau interstitielle dont le volume augmente avant la prise en glace ; cela évite la désagrégation du béton par gel de cette eau. La quantité d'air entraîné pour une bonne protection contre le gel est d'autant plus grande que la dimension des granulats est plus faible d'où la figure 1-2 présente les pourcentages d'air entraînés qui sont recommandés suivant le type de grosseur des granulats.

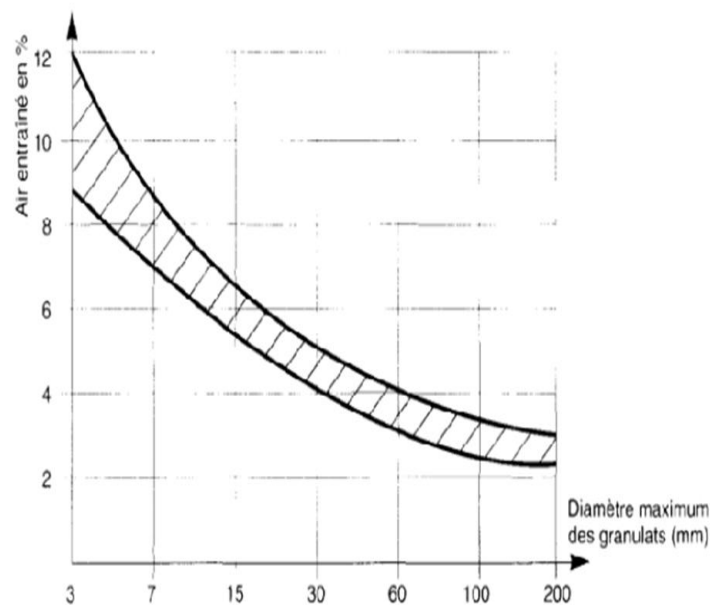


Figure 1-2 : Pourcentage d'air entraîné recommandé suivant la grosseur des granulats (d'après R. E. Hess)

[4]

Différents paramètres influencent le pourcentage d'air entraîné :

- Le dosage en ciment : plus il augmente, plus le % d'air diminue à dosage constant en adjuvant ;
- La nature et surtout la finesse du ciment ; plus le ciment a un Blaine élevé, plus le dosage en adjuvant doit être élevé ;
- Plus la granulométrie des graviers augmente plus le % d'air entraîné diminue.

1.1.4.1.5 Accélérateurs

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment ; cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froids ou pour les travaux urgents. On distingue :

- Les accélérateurs de prise : alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse, utilisés surtout par temps froid ;
- Les accélérateurs de durcissement : chlorures et carbonates, plus généralement employés afin de réduire certains délais pour décoffrer ou manutentionner les pièces.
En raison des risques de corrosion les produits à base de chlorure sont interdits pour certains travaux : béton précontraint, réservoirs, planchers chauffants, etc.

1.1.4.1.6 Retardateurs

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment. Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer :

- Les sucres et gluconates, les acides citriques et tartriques, l'oxyde de zinc, les phosphates alcalins. Les doses à utiliser sont en général très faibles (de l'ordre de 0,1 % en extrait sec) et les produits commerciaux sont dilués ; il convient de veiller à une bonne répartition du produit dans la masse.
La figure 1-3 montre comment les retardateurs diminuent évidemment les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales.

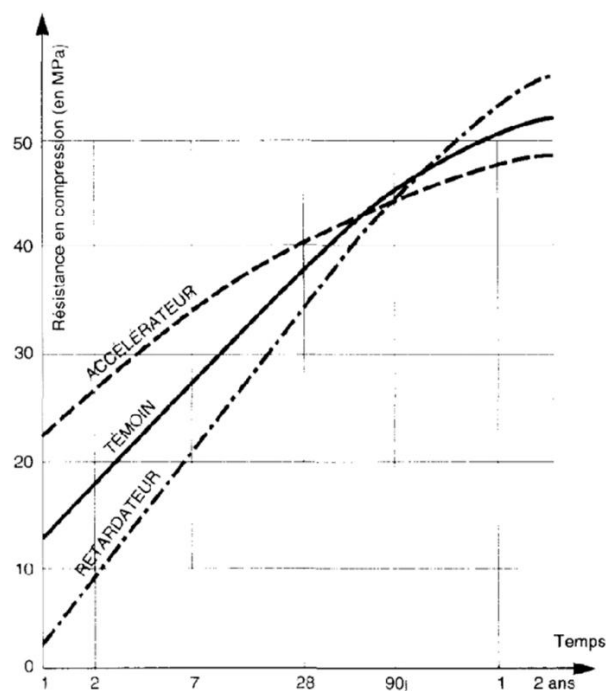


Figure 1-3 : Schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [4]

1.1.4.1.7 Hydrofuges

Ce sont des adjuvants qui, introduits dans la masse du béton, ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire.

Il ne faut pas les confondre avec les hydrofuges de surface qui s'appliquent au rouleau sur le béton durci et qui sont bien souvent à base de silicone.

Les hydrofuges de masse sont en général à base de stéarates solubles qui, en contact avec la chaux du ciment, forment des cristaux de stéarate de calcium insolubles qui viennent obstruer le réseau capillaire du béton. Ces produits ne sont vraiment efficaces que si le béton est bien compact et homogène, et que toutes les précautions sont prises afin d'éviter la formation de fissures.

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que lorsqu'on cherche à obtenir un béton étanche dans la masse, il est bien souvent préférable d'utiliser un superplastifiant qui permettra de réduire de façon importante la quantité d'eau de gâchage, donc la perméabilité.

1.1.4.1.8 Antigels et antigélifs

Il ne faut pas confondre antigels et antigélifs :

- les premiers évitent le gel du béton frais qui stoppe la prise du ciment et qui, du fait du gonflement réduit la compacité du béton. Quand on veut bétonner par temps froid, on a intérêt à accélérer la prise pour profiter du dégagement de chaleur provoqué par cette réaction et en même temps il convient de réduire le dosage en eau. Dans la pratique on utilise donc un accélérateur avec un plastifiant ou un superplastifiant, ou un produit unique combinant les deux fonctions.

L'utilisation d'un antigel ne dispense toutefois pas de l'observation des règles élémentaires de bétonnage par temps froid et notamment de proscrire l'emploi de matériaux gelés.

- Les seconds, les antigélifs évitent que le béton, une fois durci, ne se désagrège progressivement dans le temps par suite de gels successifs ; les entraîneurs d'air sont les meilleurs adjuvants antigélifs mais une bonne compacité et l'homogénéité du béton restent les conditions essentielles de la non-gélivité.

Il existe sur le marché certains produits qui combinent à la fois l'effet antigel (accélération + réduction d'eau) et l'effet antigélif (entraînement d'air).

1.1.4.1.9 Produits divers

Il existe plusieurs sortes d'adjuvant mais avec différentes fonctions d'où l'on a des adjuvants qui sont plus utilisés que les autres. Parmi les produits divers on distingue les produits de cure, les antipoussières, les durcisseurs des surfaces, les adjuvants pour injection, etc

1.2 LA METHODE DE FORMULATION DU BETON

Il existe plusieurs types de formulation du béton qui se différencient par les différents procédés d'obtention des dosages.

1.2.1 Méthode de Bolomey [11]

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 est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

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

Avec,

- p pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,
- D diamètre du plus gros grain,
- A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue

1.2.2 Méthode d'Abrams [11]

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

1.2.3 Méthode de Faury [11]

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

Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle

est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

1.2.4 Méthode de Vallette [11]

R. Vallette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par dosage des bétons à compacité maximale ou dosage des bétons à minimum de sable ou dosage des bétons à granularité discontinue. La méthode Vallette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes.

1.2.5 Méthode de Baron et Lesage [11]

Elle a pour objet d'obtenir sur chantier le béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peut être faite soit à partir de mesures de compacité (par exemple, par la méthode Vallette), soit à partir de mesures de temps d'écoulement, base de la présente méthode.

Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton, quelles que soient les conditions de mise en œuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste ainsi à déterminer les proportions des constituants pour que ladite fonction soit maximale.

1.2.6 Méthode de Dreux et Gorisse

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique, à la différence de la méthode de Faury qui lui est antérieure (Faury, 1942) et qui est basée sur la théorie de l'optimum granulaire de Caquot (Caquot, 1937). Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants. Sur la base d'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en

combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi- logarithmique.

La résistance et l'ouvrabilité désirée conduit 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, pompabilité, 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. Reste à exécuter, bien entendu, quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires. [12]

1.3 LES PROPRIETES DU BETON

En parlant des propriétés du béton, il est important de spécifier que le béton se présente sous deux états dont l'état frais et l'état durci, il est donc important de connaître les différentes propriétés du béton frais et celles du béton durci.

1.3.1 LES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS [7]

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

1.3.1.1 L'ouvrabilité

L'ouvrabilité ou la maniabilité est la principale propriété du béton frais. C'est l'indice qui indique l'aptitude à la mise en place du béton dans un moule. L'ouvrabilité du béton est mesurée à l'aide d'un cône d'Abrams. Les bétons sont ainsi classés suivant l'affaissement observé au cône d'Abrams tel que repris dans le Tableau 1-3.

Tableau 1-3 : Classe des bétons selon l'affaissement [7]

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

L'ouvrabilité d'une pâte de béton dépend de plusieurs facteurs notamment le genre de ciment, la teneur en eau et en mortier de ciment, la grosseur des graviers, la composition de sable. Des bétons de même composition, mais avec des ciments différents ont une ouvrabilité différente.

1.3.1.2 Autres propriétés du béton frais

Les autres propriétés du béton sont liées à la sédimentation. De ce fait, on distingue deux phénomènes : le ressuage et la ségrégation.

i. Le ressuage

Fraichement malaxé, le béton se tasse et une couche d'eau limpide apparaît en surface. Cette couche d'eau 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.

ii. La 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 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. Lorsque 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 c'est le phénomène de séparation des éléments les plus gros du mélange. Ces derniers tendent à descendre.

1.3.2 LES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT DURCI

Le béton durci est principalement caractérisé par sa résistance mécanique. Il s'agit ici de la résistance à la compression. Le béton est ainsi plus résistant à la compression mais moins résistant en traction.

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

- Les ciments qui ont une activité élevée, c'est-à-dire une résistance à 28jours élevée, donnent des bétons plus résistants.
- Lorsqu'il y a de l'eau en excès dans le béton, celle qui n'entre pas en réaction chimique avec le ciment s'évapore du béton en y formant des pores dont la présence réduit la compacité et par conséquent, réduit la résistance du béton.
- Plus le béton est compacté, plus il est résistant car le volume des pores est réduit. Il faut donc bien compacter son béton pour réduire le volume des pores autant que possible, mais tout en évitant la ségrégation.
- Les conditions de durcissement : le milieu ambiant influe beaucoup sur l'accroissement de la résistance du béton. Les conditions normales de durcissement du béton sont l'humidité relative de l'air entre 90 et 100% et une température de 20 ± 20 C.

Les bétons courants ont une résistance à la compression comprise entre 20 et 40 MPa pour un rapport E/C de l'ordre de 0,5 et cette résistance se détermine à l'aide des différents essais mécaniques destructifs ou non destructifs.

1.4 TYPES DES BETONS [13]

Le matériau, fait l'exception pour le remplacer dans la construction ; techniquement et économiquement. Nous assistons à différents types de béton d'où :

1.4.1 Béton auto plaçant (BAP)

Un béton auto plaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration.

1.4.2 Le béton à haute performance (BHP)

Se caractérisent par une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ; un rapport eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs

1.4.3 Béton ordinaire

Est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2500 Kg/m³. Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints. Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage.

1.4.4 Béton de poudre réactive (BPR)

Est un matériau à matrice cimentaire pour lequel le nombre, la nature, la morphologie et le dosage des différents composants granulaires ont été optimisés afin d'obtenir des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée. La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune

armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré- ou post-tension

1.4.5 Béton de fibre

Ce sont des bétons dans lesquels ont été incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. De façon générale, ces bétons présentent : une meilleure résistance à la traction, une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure, abrasion...), une bonne maîtrise de la fissuration, une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface.

1.4.6 Béton armé

Le béton armé associe intimement un béton avec des armatures métalliques pour obtenir un matériau qui cumule les qualités de résistance en compression et en traction. Il allie la résistance à la compression du béton à la résistance à la traction de l'acier.

1.4.7 Béton léger

Les bétons légers offrent une densité très inférieure à celle d'un produit classique : de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. Pour certains bétons légers, elle peut descendre jusqu'à des densités voisines de 0,4kg/m³. La résistance d'un béton léger est très inférieure à celle d'un béton traditionnel. Pour les densités les plus basses, il ne peut être question de béton "structurel" mais seulement de béton de « remplissage ». Ces bétons légers possèdent un pouvoir isolant sur le plan thermique et acoustique.

1.4.8 Béton lourd

Les bétons lourds possèdent une masse volumique supérieure à 3000 kg/m³ contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. Les bétons lourds permettent la réalisation d'ouvrages de protection contre les radiations (rayons X, gamma et autres rayons radioactifs) ou la réalisation de culées et de contrepoids.

1.4.9 Béton préfabriqué

La fabrication est une solution technique qui consiste à fabriquer à l'avance des produits (éléments de construction) généralement en grand nombre répétitif soit en usine ou sur chantier pour être montés sur place par la suite.

1.4.10 Béton compacte au rouleau (BCR)

Essentiellement les mêmes composants de béton comme les autres, mais avec des rapports différents, avec un remplacement partiel du ciment par des cendres volantes et beaucoup moins d'eau. Le mélange est très sec et a 0 de marasme, qui rend plus difficile le mélange.

1.4.11 Béton réfractaire

Sont des bétons pouvant résister à des températures très élevées (allant jusqu'à 1800 °C).

Les bétons réfractaires peuvent généralement être utilisés dans le milieu industriel pour créer des revêtements homogènes pour tous les types de fours ou de cheminées.

1.4.12 Béton de terre

Est un matériau de construction à base de terre crue argileuse, traditionnellement connu sous les termes de pisé ou de torchis.

1.4.13 Béton à durcissement rapide

La rapidité de prise et de durcissement exceptionnelle permet de sécuriser rapidement (entre 15 et 90 minutes selon le dosage du mortier et le temps de début de prise choisis) les ouvrages par rapport aux intempéries, au froid, à la remise en service rapide.

1.5 DOMAINE D'UTILISATION DU BETON [14]

Ses caractéristiques lui permettent de répondre aux multiples exigences imposées aux ouvrages : sécurité, stabilité statique et dynamique, tenue au feu, inertie thermique, acoustique et bien entendu esthétique. À toutes ces exigences, le béton peut apporter une réponse en jouant sur sa

composition et la conception des éléments et donc le béton est un matériau qui sait adapter ses performances selon son utilisation

1.5.1 Le béton dans le bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considère sa participation dans la construction de logements : pour les murs, 80 % des techniques en individuel, 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 scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels.

1.5.2 Les travaux publics

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

i. Les tunnels

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

ii. Les barrages

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

iii. Les 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.

iv. Autres ouvrages

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

1.6 CONCLUSION PARTIELLE

Cette partie qui constitue le premier chapitre traite des différents constituants du béton dont le ciment qui fait l'objet de ce travail qui fait l'objet de ce travail, les granulats, l'eau, l'adjuvant, des méthodes de formulation plus particulièrement celle de Bolomey, d'Abrams, de Faury, de Valette, de Baron et enfin celle de Dreux et Gorisse, des propriétés du béton dont celles du béton a l'état frais et celles du béton a l'état durci, des types de béton et du domaine d'application.

Chapitre 2: MATERIELS ET METHODES DE RECHERCHE

INTRODUCTION

L'étude de l'influence du mélange des ciments de classes vraies différentes sur la résistance du béton se fera en deux principales étapes ; en premier elle va consister en la présentation de la nature et l'origine des constituants du béton, la détermination de certaines caractéristiques des constituants par une série d'essais notamment : l'analyse granulométrique par tamisage et les essais de détermination des propriétés physiques des granulats (caractéristiques intrinsèques), les masses volumiques des ciments, la consistance et la prise, etc. La deuxième étape présente la méthode de formulation des bétons précisément celle de Dreux-Gorisse et d'autre part l'ensemble des essais qui permettent de caractériser quantitativement et qualitativement les bétons notamment : l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

Dans ce chapitre sont présentés les modes opératoires des différents essais effectués au laboratoire de géo-matériau de la FSTA de l'ULPGL.

2.1 NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS

Les constituants utilisés dans la confection des bétons sont de diverses natures et origines. Dans cette section nous présentons respectivement la nature et l'origine du ciment, des granulats et de l'eau de gâchage.

2.1.1 Le ciment

Le ciment employé dans cette étude est le ciment Prime qui est un ciment pouzzolanique (CEM IV/32,5 et CEM IV/42,5) produit au Rwanda comme on peut le voir à la figure 2-1.



Figure 2-1 : ciment PRIME

2.1.2 Les granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont des concassés ainsi que des roulés, le sable est roulé et provient de l'île d'Idjwi ; les graviers (5/31,5) sont issus du concassage de la roche volcanique de Goma. La figure 2-2 présente les différents granulats utilisés dans cette étude.

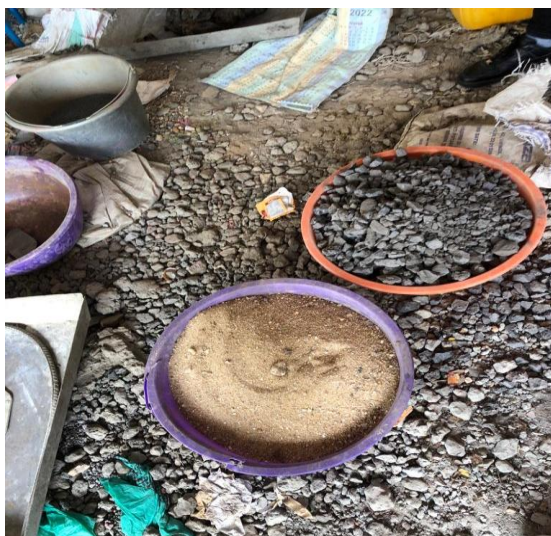


Figure 2-2 : types des granulats utilisés

2.1.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable fournie par la REGIDESO, et recueilli au robinet. Elle ne contient pas d'impuretés pouvant nuire à la qualité du béton.

2.2 CARACTERISATION DES CONSTITUANTS

La caractérisation des constituants a consisté à la détermination des différentes propriétés des granulats entrant dans la composition du béton par certains essais normalisés notamment : l'analyse granulométrique pour le sable et les graviers, le degré de propreté pour le sable ainsi que la détermination des masses volumiques absolue et apparentes pour le sable et les graviers.

2.2.1 ESSAIS SUR LES GRANULATS

Les granulats ont un rôle de conférer au béton une certaine résistance d'où il est important d'étudier les caractéristiques importantes des granulats par certains essais dont l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable, etc.

2.2.1.1 Analyse granulométrique [7]

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique effectué selon la norme NF EN 933-1 par la voie sèche. L'échantillon de masse préalablement

séchée dans un étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) a été tamisé à travers une série de tamis. Dans cette section nous présentons respectivement le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que l'expression des résultats.

2.2.1.1.1 But de l'essai

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

2.2.1.1.2 Principe de l'essai

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

2.2.1.1.3 Matériels utilisés

Les matériels utilisés pour l'analyse granulométrique sont : une balance de portée 5 kg, précision 1g, une tamiseuse, une main écope pour le remplissage, une série des tamis conforme à la norme NF EN 933-2, un couvercle et un réceptacle de fond, ainsi que des récipients en plastique. la figure 2-3 présente les différents éléments nécessaires pour effectuer l'essai d'analyse granulométrique.



Figure 2-3 : Matériels utilisés pour l'analyse granulométrique

2.2.1.1.4 Mode opératoire

Le mode opératoire pour cet essai est le suivant :

- monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissante de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond,
- verser le matériau sec dans la colonne de tamis,
- agiter mécaniquement cette colonne,
- reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle,
- agiter manuellement chaque tamis jusqu'à ce que le refus du tamis ne varie pas de plus de 1% en masse par minute de tamisage,
- verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur ;
- déterminer ainsi la masse du refus de chaque tamis,

- poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis.

2.2.1.1.5 Expression des résultats

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

2.2.1.2 Détermination du module de finesse [7]

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante pour le sable : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5mm. Il a donc été déterminé par la formule (2.1)

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

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

2.2.1.3 Le degré de propreté du sable [7]

Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai de l'équivalent sable selon la norme nf p 18-598. Dans cette partie nous présentons le but de l'essai, le principe de l'essai, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que l'expression des résultats.

2.2.1.3.1 But de l'essai

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

2.2.1.3.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculante dans l'éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. L'équivalent de sable est calculé par la formule (2.2).

$$ES = \frac{h_1}{h_2} * 100 \quad (2.2)$$

Avec :

- ES : équivalent de sable (%)
- h1 : hauteur du sable propre seulement (cm)
- h2 : hauteur du sable propre + éléments fins (cm)

2.2.1.3.3 Matériels utilisés

Conformément à la norme NF P 18-598, les matériels utilisés pour cet essai sont présentés à la figure 2-4 précisément :

- les éprouvettes en plexiglass (ayant chacun deux traits repères) et leurs bouchons,
- l'entonnoir pour l'introduction du sable,
- la bombonne de 5l avec bouchon et siphon,
- le tube laveur métallique plongeant,
- l'agitateur électrique,
- la règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable et flocculat,
- le piston taré à masse coulissante de 1 kg pour la mesure des hauteurs.



Figure 2-4 : : Matériels utilisés pour l'équivalent de sable

2.2.1.3.4 Mode opératoire

Pour réaliser cet essai, on utilise le mode opératoire suivant :

- préparer l'échantillon ;
- faire la mise au point de l'appareil ;
- remplir les éprouvettes de la solution lavante jusqu'au premier trait repère ;
- verser la quantité de sable nécessaire pour l'essai ;
- éliminer les bulles d'air, laisser reposer pendant 10 minutes ;
- boucher les éprouvettes et agiter (mouvement rectiligne sinusoïdal horizontal de 20cm d'amplitude : 90 aller et retour en 30 secondes) ;
- laver et remplir les éprouvettes à l'aide du tube laveur jusqu'au dernier trait repère ;
- laisser reposer pendant 20 minutes ;
- descendre lentement le piston taré, l'immobiliser au contact du sable ;
- mesurer h_1 et h_2 qui sont respectivement la hauteur du sable propre et la hauteur du sable propre plus flocculat

-

2.2.1.3.5 Expression des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentages suivant la formule (2.2) et interprétés suivant le tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [10]

Valeurs de ES	Conclusions
ES ≥ 80	Bons sable
70 < ES < 80	A n'utiliser qu'exceptionnellement à condition d'employer le ciment portland
ES < 70	A laver pour éliminer les éléments fins

2.2.1.4 Masses volumique absolue

la masse volumique absolue a été déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. [7] la méthode qui a été utilisée est celle de l'éprouvette graduée. Elle a consisté à mesurer la masse, par unité de volume de manière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau .la différence de volume rapportée à la masse du matériau a donné la masse volumique absolue.la masse volumique est calculée selon la formule (2.3)

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.3)$$

Où ;

- ρ_{abs} : la masse volumique en g/cm³
- m : la masse sèche du matériau, en g ;
- V1 et V2 : la lecture sur éprouvette graduée avant et après l'introduction du granulat, en ml.

2.2.1.5 Masses volumiques apparente

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

Il a consisté au remplissage d'un récipient vide de volume (v) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule (2.4).

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (2.4)$$

Avec :

- ρ_{app} la masse volumique apparente en g/cm³ ;
- v le volume du récipient en ml ;
- et m la masse sèche du matériau en g.

2.2.1.6 Absorption d'eau [1]

Le taux d'absorption des graviers est déterminé par un essai normalisé (NF P 18-555, Décembre 1990). L'essai consiste à exprimer le rapport d'augmentation de la masse de l'échantillon de gravier en pourcentage après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Le mode opératoire employé dans la détermination du coefficient d'absorption d'eau conformément à la norme se présente comme suit :

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

2.2.2 Essais sur le ciment

Le ciment utilisé est le ciment Prime qui a fait l'objet de notre étude. Les principaux essais effectués sont l'essai de consistance normale et de la masse volumique absolue.

2.2.2.1 Essai de consistance normale

L'essai de consistance normale a été réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10mm, selon la norme NF EN 196-3. Le but était 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 [15]

2.2.2.2 Masse volumique absolue

La masse volumique du ciment a été évaluée à partir du pycnomètre de Le Chatelier selon la norme. Le calcul de celui-ci s'est fait par la relation ci-dessous :

$$\rightarrow \rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.5)$$

Où ;

- M : la masse sèche du matériau en g ;
- V1 et V2 : la lecture sur le pycnomètre de Le Chatelier graduée avant et après l'introduction du ciment en ml.

2.3 CARACTERISATION DU BETON

Pour mieux caractériser le béton, il a été nécessaire d'étudier ses propriétés sous ses deux états dont à l'état frais et à l'état durci. Cette caractérisation s'est réalisée par différents essais normalisés sur les bétons d'étude, en premier lieu les essais sur le béton frais ensuite sur le béton durci.

2.3.1 Essais sur béton frais [3]

Pour la caractérisation du béton à l'état frais, il est nécessaire d'étudier la maniabilité.

2.3.1.1 Mesure de la maniabilité (durabilité)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas les 40mm.

2.3.1.1.1 Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

2.3.1.1.2 Equipement nécessaire

L'appareil qui nous permet de faire cet essai se compose de 4 éléments :

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

La figure 2-5 présente les différents éléments constituant l'appareil permettant d'effectuer l'essai d'ouvrabilité soit le cône d'Abrams.



Figure 2-5 : Cône d'Abrams

2.3.1.1.3 Conduite de l'essai :

Pour mesurer l'affaissement on introduit le béton frais dès la fin de sa confection en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage. Araser le moule, démouler immédiatement en soulevant le moule. Après mesurer l'affaissement à partir du point le plus bas du béton.

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage, le résultat obtenu permet de classer les bétons.

2.3.2 Essai sur le béton durci

Etant donné que le béton durci avec le temps tout en acquérant une certaine résistance d'où il est important d'étudier cette caractéristique par l'essai de compression.

2.3.2.1 Résistance à la compression [15]

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme BS 1881R partie 116. la presse est électrique à doubles manomètres et grands plateaux, ayant une capacité 5000kgf. Les résultats ont été obtenus par la formule (2.6).

$$RC = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Où : - F est la force qui agit sur l'éprouvette en Newton ;

- A est la section de l'éprouvette en mm ;

- RC le resistance a la compression en MPa.

2.4 MÉTHODE PRATIQUE POUR LA COMPOSITION DES BÉTONS - MÉTHODE DITE « DREUX-GORISSE » [4]

Cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

2.4.1 Données de bases

En parlant des données de base, cette méthode fait usage de trois paramètres important qui sont :

2.4.1.1 Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrailé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale des éléments et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : distance minimale entre elles et couverture par rapport au coffrage ...

2.4.1.2 Résistance souhaitée

En général on demandera une résistance f_{c28} en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique s , il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :

f_c supérieure à f_{c28}

$$f_{c28} = f_c - 0,8 s \quad (2.7)$$

Avec,

- f_{c28} : la résistance à la compression a 28 jours enMPa ;
- f_c : la résistance moyenne désirée ;
- s : Ecart quadratique.

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 20 %, on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser :

$$f_c = f_{c28} + 15 \% \quad (2.8)$$

2.4.1.3 Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrailé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué dans le tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [16]

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	N nombre de chocs test C.E.S.
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	>60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton fluide	Leger piquage	≥14	<10

2.4.2 Détermination du dosage en ciment

En fonction de la résistance moyenne désirée f_c , on commencera par évaluer approximativement le rapport C/E. Ce rapport est déterminé grâce à la relation (2.9).

$$f_c = G * f_{ce} * \left(\frac{C}{E} - 0,5\right) \quad (2.9)$$

Avec :

- f_c résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa ;
- f_{ce} classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;
- C dosage en ciment (en Kg/m³) ;
- E dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1m³) ;
- G étant le coefficient granulaire, le tableau 2-3 présente les différentes valeurs de ce coefficient.

Tableau 2-3 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16mm)	Moyen (2 ≤ D ≤ 40mm)	Gros (D ≥ 50mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
passable	0,35	0,40	0,45

L'abaque de la figure 2-6 nous permet de trouver le dosage en ciment C qui est fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité choisi comme donnée de base.

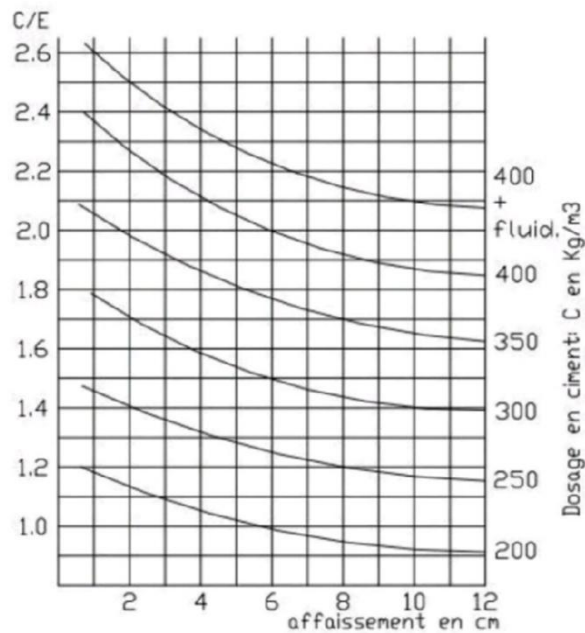


Figure 2-6 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (Affaissement au cône)

2.4.3 Détermination du dosage en eau

Après la détermination du dosage en ciment, on cherche alors le dosage en eau total qui sera ajusté par la suite lors de la mise en œuvre avec quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité. Si l'on a un $D < 20$ mm, la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice versa.

La correction sur le dosage en eau correspondant à $D \neq 20$ mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du Tableau 2.4 en fonction de D. [4]

Tableau 2-4 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 20\text{mm}$).

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

2.4.4 Détermination du dosage en granulat

La détermination du dosage en granulats d'un béton passe par la tracée de la courbe de référence, la détermination des proportions en volume des granulats, la détermination du coefficient de compacité du béton afin d'aboutir à la composition théorique du béton. la tracée des courbes granulaires s'est effectuée sur un graphique normalisé AFNOR comprenant en abscisse une graduation logarithmique des tamis et en ordonnée les tamisats en pourcentage. la courbe de référence se trace sur le graphique des courbes granulaires. [1]

On trace une composition granulaire de référence 0 A B : le point B (à l'ordonnée 100 %) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A a des coordonnées ainsi définies :

- en abscisse (à partir de la dimension D tamis).

Si $D \leq 20 \text{ mm}$, l'abscisse (X_A) est $D/2$.

Si $D > 20 \text{ mm}$, l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D.

- en ordonnée : Y_A correspond à la relation 2.10

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K \quad (2.10)$$

Avec,

- D : le diamètre maximal,
- K : le coefficient correcteur.

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) et également du module de finesse du sable.

Les valeurs sont indiquées dans le tableau 2-5 ; $K = 0$ pour un béton courant dosé en ciment à 350 kg/m³ composé de granulats roulés, le module de finesse du sable étant de 2,5 et le serrage étant effectué avec une vibration normale.

L'abscisse du point de brisure est au milieu du segment $X_0 X_1$ et la ligne brisée OAB représente la composition granulaire de référence.

Tableau 2-5 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence : $(y = 50 - \sqrt{D + K})$

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Forme des granulats (du sable en particulier)							
Dosage en ciment (kg/m ³)	400 + Superplastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

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

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

2.4.5 Coefficient de compacité

Ce coefficient ; c'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre. On choisira une valeur approximative de γ dans le tableau 2-6.

Les valeurs de γ varient de 0,750 pour des micros bétons de consistance molle mis en place par simple piquage à 0,855 pour des bétons de cailloux de consistance ferme et bien vibrés ; $\gamma = 0,82$ est une valeur moyenne approximative qui peut être prise en général pour des bétons courants (D de 16 à 40 mm) et sous réserve d'une vérification par mesure de densité du béton frais.

Note : pour certains bétons, en particulier les bétons à haute performance, pour lesquels avec l'emploi de superplastifiant le E/C est souvent inférieur à 0,35, le coefficient de compacité γ est supérieur à 0,9

Tableau 2-6 : Valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	γ Coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 2,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	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	0,730	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 Normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration Puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration Faible	0,755	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration Normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration Puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
<p>Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - sable roulé et gravier concassé = - 0.0 I. - sable et gravier concassé = - 0,03. 								

2.4.6 Proportions des granulats

Les proportions des différents granulats sont déterminées graphiquement, en représentant les courbes granulométriques des granulats utilisés et la courbe de référence OAB définie précédemment et les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier au point de 5% de la courbe du granulats suivante.

On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec la droite de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats soit $\%_s$ et $\%_g$. Si C est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est calculé par la relation (2.11) :

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} \quad (2.11)$$

- C : dosage en ciment,
- ρ_c : masse volumique du ciment.

On choisira dans le tableau 2-6 une valeur convenable du coefficient de compacité γ en fonction de D , de la consistance et de l'efficacité du serrage. Le volume absolu de l'ensemble des granulats est calculé par la formule (2.12) :

$$V = 1000\gamma - V_c \quad (2.12)$$

Les volumes absolus de chacun des granulats seront calculés par la relation (2.13) :

$$\begin{cases} v_s = \%_s \times V \\ v_g = \%_g \times V \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec

- V_s et V_g , respectivement les volumes absolus du sable et des gravillons ;
- $\%_s$ et $\%_g$, les pourcentages du sable et des gravillons obtenus sur les compositions optimales des bétons ;
- et V , le volume absolu des granulats.

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ρ_s, ρ_g les masses de chacun d'eux seront calculées par la relation (2.14)

$$\begin{cases} m_s = v_s \times \rho_s \\ m_g = v_g \times \rho_g \end{cases} \quad (2.14)$$

- m_s, m_g , respectivement la masse du sable et celle des graviers ;
- V_s, V_g , respectivement le volume du sable et celui des graviers ;
- ρ_s, ρ_g , respectivement la masse volumique du sable et celle des graviers.

La masse totale des granulats est notée G .

2.5 CONCLUSION PARTIELLE

Mis à part la description des matériaux utilisés et la caractérisation du béton à l'état frais et à l'état durci, ce chapitre traite la caractérisation des matériaux précisément des granulats, du ciment et de l'eau et la méthode utilisée pour la formulation particulièrement celle de Dreux-Gorisse.

Chapitre 3: PRESANTATION DES RESULTATS

INTRODUCTION

Le présent chapitre présente les résultats des essais normalises, réalisés afin d'étudier les caractéristiques des matériaux entrant dans la composition des bétons dont le béton au liant contenant 100% de ciment de classe commerciale 32,5N, le béton contenant 100% de ciment de classe commerciale 42,5N et des bétons constitués de mélange des ciments a des proportions différentes notamment l'analyse granulométrique ,le degré de propreté, les masses volumiques, les résultats des formulations et les caractéristiques des bétons confectionnés.

3.1 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

Dans cette section nous présentons les résultats de l'analyse granulométrique, le module de finesse, le degré de propreté du sable, la masse volumique absolue et apparente.

3.1.1 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique est l'essai permettant de classer le type des granulats en fonction des diamètres. Pour ce faire deux essais d'analyse granulométrique ont été effectués dont l'analyse granulométrique du sable et celle des graviers.

3.1.1.1 Analyse granulométrique du sable

Lors de l'analyse granulométrique certaines données ont été en accumulant les refus. Le tableau 3-1 présente les données de l'analyse granulométrique du sable.

Tableau 3-1 : Données d'analyse granulométrique du sable

Numéro TAMIS		OUVERTURE (en mm)		REFUS CUMULES		TAMISAT	REMARQUE
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(%)	En (%)	
3"	50	76,2	80	0	0	100	
2 1/2"	49	63,5	63	0	0	100	
2"	48	50,8	50	0	0	100	
1 1/2"	47	38,1	40	0	0	100	
1 1/4"	46	31,7	31,5	0	0	100	
1"	45	25,4	25	0	0	100	
3/4"	44	19,1	20	0	0	100	
2/3"	43	16,9	16	0	0	100	
1/2"	42	12,7	12,5	0	0	100	
3/8"	41	9,52	10	0	0	100	
1/3"	40	7,93	8	0	0	100	
1/4"	39	6,35	6,3	0	0	100	
3/16"	38	4,76	5	0	0	100	
5	37	4	4	110	4,4	95,6	
6	36	3,36	3,15	150	6	94	
8	35	2,38	2,5	220	8,8	91,2	
10	34	2	2	335	13,4	86,6	
12	33	1,68	1,6	470	18,8	81,2	
16	32	1,19	1,25	670	26,8	73,2	
18	31	1	1	910	36,4	63,6	
20	30	0,84	0,8	1125	45	55	
30	29	0,59	0,63	1715	68,6	31,4	
35	28	0,5	0,5	1940	77,6	22,4	
40	27	0,4	0,4	2120	84,8	15,2	
50	26	0,315	0,315	2280	91,2	8,8	
60	25	0,25	0,25	2380	95,2	4,8	
70	24	0,2	0,2	2440	97,6	2,4	
100	23	0,16	0,16	2485	99,4	0,6	
120	22	0,125	0,125	2500	100	0	
140	21	0,1	0,1	2500	100	0	
200	20	0,08	0,08	2500	100	0	

La Figure 3-1 présente le graphique de la courbe granulométrique du sable roulé. L'axe des abscisses reprend les différents modules des tamis (en mm) utilisés et celui des ordonnées les pourcentages cumulés des passants.

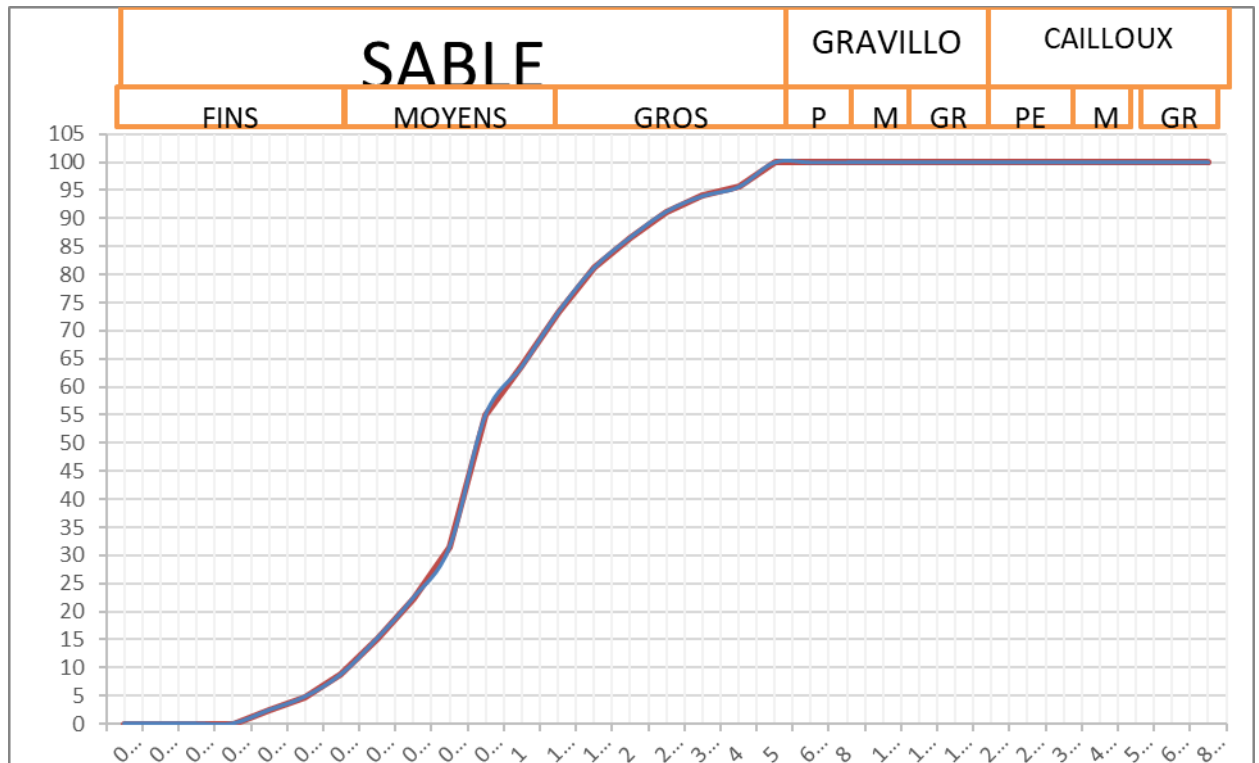


Figure 3-1 : Courbe granulométrique du sable

La Figure 3-1 présente la courbe granulométrique du sable roulé 0/5, l'allure de la courbe granulométrique du sable montre que le sable présentait une granulométrie plus ou moins préférentielle puisque la courbe est presque en S, d'où le sable contenait plus d'éléments gros que d'éléments fins.

3.1.1.2 Analyse granulométrique des graviers

Le tableau 3-2 présente les différentes valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique des graviers.

Tableau 3-2 : Données d'analyse granulométrique des graviers

Numéro TAMIS		OUVERTURE (en mm)		REFUS CUMULES		TAMISAT	REMARQUE
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(%)	En (%)	
3"	50	76,2	80	0	0	100	
2 1/2"	49	63,5	63	0	0	100	
2"	48	50,8	50	0	0	100	
1 1/2"	47	38,1	40	0	0	100	
1 1/4"	46	31,7	31,5	210	8,4	91,6	
1"	45	25,4	25	625	25	75	
3/4"	44	19,1	20	1120	44,8	55,2	
2/3"	43	16,9	16	1735	69,4	30,6	
1/2"	42	12,7	12,5	2140	85,6	14,4	
3/8"	41	9,52	10	2400	96	4	
1/3"	40	7,93	8	2475	99	1	
1/4"	39	6,35	6,3	2485	99,4	0,6	
3/16"	38	4,76	5	2500	100	0	
5	37	4	4	2500	100	0	
6	36	3,36	3,15	2500	100	0	
8	35	2,38	2,5	2500	100	0	
10	34	2	2	2500	100	0	
12	33	1,68	1,6	2500	100	0	
16	32	1,19	1,25	2500	100	0	
18	31	1	1	2500	100	0	
20	30	0,84	0,8	2500	100	0	
30	29	0,59	0,63	2500	100	0	
35	28	0,5	0,5	2500	100	0	
40	27	0,4	0,4	2500	100	0	
50	26	0,315	0,315	2500	100	0	
60	25	0,25	0,25	2500	100	0	
70	24	0,2	0,2	2500	100	0	
100	23	0,16	0,16	2500	100	0	
120	22	0,125	0,125	2500	100	0	
140	21	0,1	0,1	2500	100	0	
200	20	0,08	0,08	2500	100	0	

3.1.3 DEGRE DE PROPETE DU SABLE

Tableau 3-3 : Résultat de l'essai de propreté du sable

Désignation	ECH 1	ECH 2
H1 (cm)	94	95
H2 (cm)	97	97
H piston (cm)	90	89
ES à vue (%)	96.9072165	97.9381443
ES piston (%)	92.7835052	91.7525773
Moyenne à vue (%)	97.42268041	
Moyenne piston (%)	92.26804124	
Moyenne (%)	94.84536082	

Le tableau 3-3 présente les résultats de l'essai d'équivalence de sable. Partant de la norme NF EN 933-8 (1999), qui prévoit que si ES à vue est supérieur à 85% et ES à piston supérieur à 80%, on a une absence presque totale des fines argileuses d'où notre sable est très propre.

3.1.4 MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS

Les valeurs des masses volumiques absolues et apparentes des granulats sont présentées dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Valeurs masses volumiques des granulats

Désignation	Sable	Graviers
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.515822785	2.70375
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.396896	1.346948

Etant donné que les masses volumiques du sable et des graviers retrouvées dans le tableau 3-4 sont comprises entre 2g/cm³ et 3g/cm³, ces granulats sont classés parmi les granulats courants qui sont bon pour le béton.

3.1.5 ABSORPTION D'EAU

Le taux d'absorption était de 1.7167%. De cette valeur obtenue, il a été remarqué que les granulats utilisés n'étaient pas trop poreux.

3.2 CARACTERISTIQUES DU LIANT

Le ciment est le principal matériau du béton puisqu'il permet de lier les autres éléments entre eux d'où il est important d'étudier ses caractéristiques dont la masse volumique volumique, la consistance, etc.

3.2.1 Masse volumique du ciment

Le tableau 3-5 présente les différentes valeurs de masse volumique pour chaque type de ciment utilisé. Il a été constaté que la masse volumique du ciment de classe commerciale 32.5 est inférieure à celle de ciment de classe commerciale 42.5.

Tableau 3-5 : Masses volumiques du ciment

Masse volumique en g/cm³	Valeurs obtenues
Masse volumique du ciment de 32.5	2.9377143
Masse volumique du ciment de 42.5	3.09602273

3.2.2 Essai de consistance

Tableau 3-6 : Les résultats de l'essai de consistance

Types des ciments	Quantité d'eau en %
Ciment de classe commerciale 32.5	31
Ciment de classe commerciale 42.5	29

Les valeurs obtenues lors de cet essai montrent que ce ciment ne demande pas beaucoup d'eau pour la prise.

3.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR LE BETON

Dans cette partie sont présentés les résultats de la formulation avec la méthode de Greux-Gorisse, les résultats d'ouvrabilité et les résultats de la compression.

3.3.1 Résultats de la méthode de DREUX-GORISSE

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

3.3.1.1 Données de base

Le Tableau 3-7 présente les données de base qui ont servi dans cette étude.

Tableau 3-7 : Données de base

Données	Valeurs
Résistance en compression du béton exigé	20MPa
Classe vrai du ciment de 32.5R et 42.5N	28MPa et 30MPa
Maniabilité du béton soit l'affaissement	6cm
Mode de vibration	Normale
Dimension du plus gros granulat	31.5mm
Les granulats	Concassés
Masse volumique absolue du gravier et sable	2703,75Kg/m ³ , 2515,82Kg/m ³
Masse volumique absolue du ciment de classe commerciale 32.5N et 42.5N	2937.7kg/m ³ , 3096Kg/m ³

3.3.1.2 Calcul des dosages en divers éléments

Dans cette section sont présentés les résultats du calcul des dosages en divers éléments notamment le dosage en ciment et en eau, et enfin le dosage en granulats.

3.3.1.2.1 Dosage en ciment et en eau

La figure 2-1 a permis de trouver le dosage en ciment et le dosage en eau pour un m³ de béton. Le dosage en eau a été corrigé à partir du Tableau 2-4. Les différentes valeurs obtenues sont reprises dans le Tableau 3-8.

Tableau 3-8 : Dosage en ciment et en eau

Désignations		Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	Classe commerciale 32,5N et 42.5N	429.166 et 400
Dosage en eau (kg)	Classe commerciale 32.5N et 42.5N	200.357 et 196.721634

3.3.1.2.2 Dosage en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide des proportions du sable et graviers obtenues à partir de la courbe de référence OAB. Dans le Tableau 3-9 sont repris les coordonnées de la courbe de référence présentée en annexe.

Tableau 3-9 : Coordonnées de la courbe de référence OAB

Désignation		O	A	B
Pour le ciment de 32.5N	X (mm)	0	12.5	31.5
	Y (%)	0	45.9095	100
Pour le ciment de 42.5N	X(mm)	0	12.5	31.5
	Y(%)	0	47.0755	100

De ces coordonnées de la courbe de référence, il ressort les pourcentages des granulats qui sont % sable=39% et le % gravier=61% pour le ciment de classe commerciale 32.5N et : %

sable=41% et le % gravier=59% pour celui de 42.5N. Pour ce faire, les compositions massiques des granulats pour un m³ de béton sont repris dans le tableau 3-10.

Tableau 3-10 : Dosages massiques des granulats

Désignation		Dosages massiques (kg/m ³)
Ciment de classe vraie 32.5N	Graviers	1128.11
	Sable	671.12
Ciment de classe vraie 42.5N	Graviers	1118,24
	Sable	723.07

Il ressort du Tableau 3-10 que pour un mètre cube de béton, le dosage en sable était de 671.12kg et le dosage en graviers de 1128.11kg pour le béton de ciment de 32.5 et respectivement 723.07Kg et 1118.24Kg pour le béton de ciment de 42.5.

3.3.2 Ouvrabilité du béton

Tableau 3-11 : Résultats des affaissements

Composition	Rapport C/E	Ajout d'eau en %	affaissement
Béton témoin de classe commerciale 42.5N	2.033	15	5.5
Béton témoin de classe commerciale 32.5N	2.34	20	5.6
Mélange de 50% 42.5N et 50% 32.5N	2.34	20	6.4
Mélange de 75% 42.5N et 25% 32.5N	2.34	10	6
Mélange de 75% 32.5N et 25% 42.5N	2.34	15	6.7

Du tableau 3-11, il a été constaté que les bétons formulés aux différents dosages ont un affaissement compris entre 5 et 9 et par conséquent sont des bétons plastiques destinés à la construction des semelles coffrées, murs de soutènement, planchers, dalles, poteaux, voiles.

3.3.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons témoins et des bétons contenant des ciments de classes vraies différentes en différents pourcentages est présentée dans le tableau 3-12.

Tableau 3-12 : Résultats des essais de compression

Composition	Eprouvette 1	Eprouvette2	Eprouvette3	Résistance à 28jours en MPa
Béton de ciment 42.5N	11.924	11.827	10.645	11.46533
Béton de ciment 32.5N	9.814	9.721	10.280	10.005
Béton contenant 50% de ciment 32.5N et 50% de ciment 42.5N	6.237	5.913	5.892	6.014
Béton contenant 75% de ciment 32.5N et 25% de ciment 42.5N	10.988	11.419	10.721	11.042
Béton contenant 75% de ciment 42.5N et 25% de ciment de 32.5N	10.130	13.143	14.491	12.588

En considérant que 20MPa correspond à 100% de résistance, la figure 3-3 présente l'histogramme des différents pourcentages de résistances obtenues en fonction des mélanges de ciments.

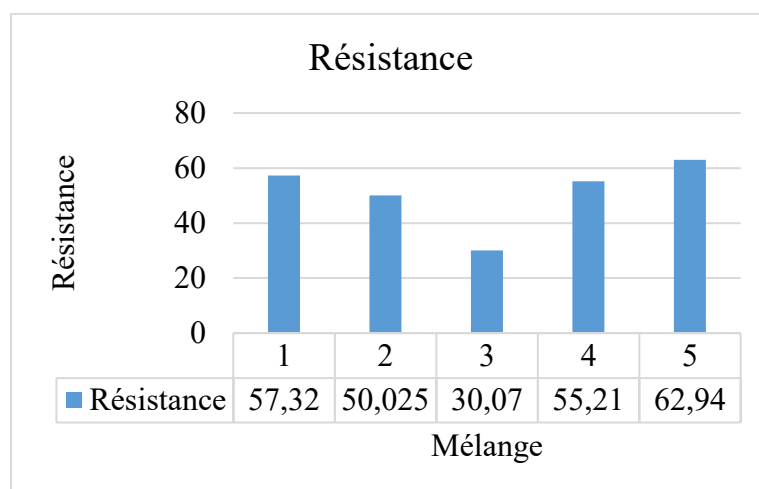


Figure 3-3 : Histogramme des resistances

Cet histogramme montre l'allure des différentes valeurs de résistance. Il a été constaté que la résistance du mélange de 25% de ciment de 32.5N et 75% de ciment de 42.5 est plus élevée que d'autres résistances tandis que le mélange de 50% des ciments présente une faible résistance.

3.4 CONCLUSION PARTIELLE

Etant donné que chaque constituant du béton et chaque type des bétons ont été étudiés par différents essais, dans ce présent chapitre il a été question de présenter les résultats obtenus sur les granulats, sur le ciment, sur le béton frais et durci et aussi l'interprétation des résultats obtenus.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur l'étude de l'influence du mélange des ciments de classes vraies différentes sur la résistance du béton en vue d'évaluer les résistances que peuvent donner ces mélanges en fonction de la résistance recherchée pour une bonne utilisation en des proportions bien définies. Cette étude a permis d'étudier les résistances des bétons de ciment de 32.5, celui de ciment de 42.5, des bétons contenant 50% de ciment de 32.5 et 50% de ciment de 42.5, 75% de ciment de 32.5 et 25% de ciment de 42.5, et enfin un béton contenant 75% de ciment de 42.5 et 25% de ciment de 32.5.

Les bétons d'études ont été formulés par la méthode de Dreux-Gorisse, confectionnés et écrasés à 28 jours afin de d'évaluer leurs résistances à la compression. En considérant 20MPa comme 100% de la résistance soit la résistance visée, après écrasement à 28 jours, les résultats obtenus sont pour le béton issu du mélange de 75% de ciment de 32.5 et 25% de ciment de 42.5 une résistance supérieure au béton de ciment 32.5 dont 11.0426MPa soit 55.21% et 10.005MPa soit 50.025%, le béton issu du mélange de 75% de ciment de 42.5 et 25% de ciment de 32.5 a donné une résistance supérieure au béton de ciment de 42.5 respectivement 12.588MPa soit 62.94% et 11.465MPa soit 57.32% par contre il s'est observé une faible résistance pour un béton issu du mélange des proportions égales des ciments des classes vraies différentes soit 6.014MPa soit 30.07% c'est-à-dire le mélange des classes vraies différentes à des proportions égales donne des résistances trop faibles servant donc dans la construction des éléments n'exigeant pas des grandes résistances. La grande résistance obtenue était de 12.588MPa soit 62,94% issue du mélange de 75% de ciment de classe commerciale 42.5 et 25% de ciment de classe commerciale 32.5.

Il a été constaté que ces résultats étaient faibles par rapport à la résistance escomptée pour certaines raisons comme par exemple le stockage du ciment pendant une très longue durée dans un endroit humide. Cette étude s'est essentiellement focalisée sur l'étude du ciment Prime du Rwanda, les futurs travaux pourraient étudier l'influence du mélange des classes vraies différentes d'autres ciments en comparant les résultats obtenus avec les résultats d'étude du ciment Prime.

ANNEXE

A.1 Formulation du béton de ciment

1. Données de base

Données	Valeurs
Résistance en compression du béton exigé	20MPa
Classe vrai du ciment de 32.5N et 42.5N	28MPa et 30 MPa
Maniabilité du béton soit l'affaissement	6cm
Mode de vibration	Normale
Dimension du plus gros granulat	31.5mm
Les granulats	Concassés
Masse volumique absolue du gravier	2703,75Kg/m ³
Masse volumique absolue du sable	2515,82Kg/m ³
Masse volumique absolue du ciment de classe commerciale 32.5N et 42.5N	2937.7kg/m ³ 3096Kg/cm ³

➤ Pour le ciment de classe commerciale 32.5N

2. Détermination du dosage en C et E

$f_{cm} = 1.15 \cdot f_{c28} = 1.15 \cdot 20 = 23 \text{MPa}$; les résistances à 28 jours sont majorés de 15 % compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique.

On sait que $f_{cm} = \sigma_{c28} \cdot G \cdot \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$

G est le coefficient granulaire que l'on a obtenu en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats. Tout en sachant que le granulat est passable avec une taille maximale de 31.5mm, l'on a $G = 0.5$.

On a alors ; $\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \cdot \sigma_{c28}} + 0.5$

$$\rightarrow \frac{C}{E} = \frac{23 \text{MPa}}{0.5 \times 28} + 0.5$$

$$\rightarrow \frac{C}{E} = 2.34$$

En positionnant ce rapport $\frac{C}{E} = 2.34$ sur la figure qui en fonction de l'affaissement au cône $A=6\text{mm}$ permet d'avoir le dosage en ciment, notre dosage en ciment est compris entre 400Kg et 400Kg+fluidifiant soit 429.166

Sur la figure, 12mm → 50 Kg de ciment

$$7\text{mm} \rightarrow \frac{7 \times 50}{12} = 29.166 \text{Kg/m}^3$$

On a alors ; $C=429.166\text{Kg/m}^3$

On peut alors calculer le dosage en eau partant du rapport $\frac{C}{E}$,

D'où $E=200.357\text{Kg/m}^3$

Une correction éventuelle du dosage en eau est prévue en fonction du diamètre maximal. La correction du dosage en eau est fonction du diamètre maximal d'où la notre est de -4%.

On obtient : $E=192.342\text{Kg/m}^3$

3. Détermination du dosage en granulats

Avant toute chose, il nous faut d'abord tracer la courbe de référence AOB.

-le point O : correspond à l'origine ;

-le point B : correspond en abscisse à la dimension du plus gros granulat et en ordonnée à 100% des tamisats ;

-le point A : comme notre diamètre est supérieur à 20mm,

- XA est situé au milieu du segment gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspondant à D_{max} ; soit 12.5mm
- YA l'ordonné, $YA=50-\sqrt{D} + K + Ks$ avec K le coefficient correcteur qui est fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.

Dosage	Coefficient correcteur
450	-2
429.166	X
400	0

$$\text{On a : } \frac{450-429.166}{400-450} = \frac{-2-X}{0+2} \rightarrow X = -1.166$$

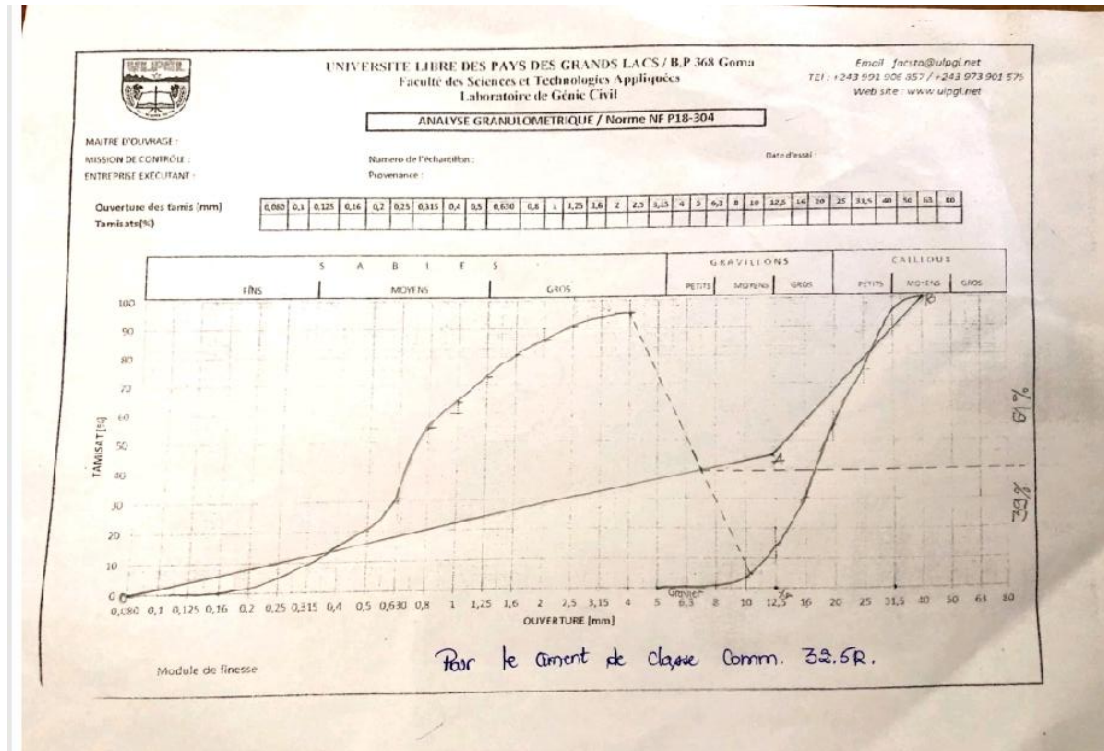
Comme le module de finesse est différent de 2.5, une correction est prévue pour ce coefficient correcteur.

$$K_s = 6 \times M_f - 15 \rightarrow K_s = 6 \times 2.948 - 15$$

$$\rightarrow K_s = 2.688$$

On a alors $Y_A = 50 - \sqrt{31.5 - 1.166 + 2.688}$

$$\rightarrow Y_A = 45.9095\%$$



Ceci donne : % sable=39% et le % gravier=61%

4. Coefficient de compacité et composition massique

Le coefficient de compacité est fonction de la consistance du béton, du serrage du béton, de la dimension du plus gros granulat D.

On a $\gamma = 0.830$, pour une consistance plastique, à vibration normale et $D = 31.5 \text{ mm}$.

On sait que : $\gamma = \frac{V_g + V_s + V_c}{V_t}$ avec $V_t = 1 \text{ m}^3$.

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} = \frac{429.166}{2937.7}$$

$$\rightarrow V_c = 0.146 \text{ m}^3$$

On a alors : $0.830 = V_g + V_s + 0.146$

$$\rightarrow V_g + V_s = 0.684, V_s = \frac{39}{100} \times 0.684 = 0.26676 \text{ m}^3 \text{ et } V_g = \frac{61}{100} \times 0.684 = 0.41724 \text{ m}^3$$

Trouvons alors les masses des granulats par la formule ci-dessous :

$$M = \rho \times V$$

$$\text{Sable : } M_s = \rho_s \times V_s = 2515,82 \times 0,26676$$

$$\rightarrow M_s = 671,12 \text{Kg}$$

$$\text{Gravier : } M_g = \rho_g \times V_g = 2703,75 \times 0,41724$$

$$\rightarrow M_g = 1128,11 \text{Kg}$$

Pour 1m^3 :

- $M_g=1128,11\text{Kg}$;
- $M_s=671,12\text{Kg}$;
- $M_c=429,166\text{Kg}$;
- Et $M_{eau}=192,342\text{Kg}$.

➤ **Pour un ciment de classe commerciale 42,5N**

5. Détermination du dosage en C et E

$f_{cm} = 1,15 \times f_{c28} = 1,15 \times 20 = 23\text{MPa}$; les résistances à 28 jours sont majorés de 15 % compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique.

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

G est le coefficient granulaire que l'on a obtenu en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats. Tout en sachant que le granulat est passable avec une taille maximale de 31,5mm, l'on a $G=0,5$.

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

$$\rightarrow \frac{C}{E} = \frac{23\text{MPa}}{0,5 \times 30} + 0,5$$

$$\rightarrow \frac{C}{E} = 2,033$$

En positionnant ce rapport $\frac{C}{E} = 2,033$ sur la figure qui en fonction de l'affaissement au cône $A=6\text{mm}$ permet d'avoir le dosage en ciment, notre dosage en ciment est de 400Kg.

On peut alors calculer le dosage en eau partant du rapport $\frac{C}{E}$,

$$\text{D'où } E = 196,721634 \text{ Kg}$$

Une correction éventuelle du dosage en eau est prévue en fonction du diamètre maximal. La correction du dosage en eau est fonction du diamètre maximal d'où la nôtre est de -4%.

$$\text{On obtient : } E = 188,8527686 \text{Kg/m}^3$$

6. Détermination du dosage en granulats

Avant toute chose, il nous faut d'abord tracer la courbe de référence AOB.

-le point O : correspond à l'origine ;

-le point B : correspond en abscisse à la dimension du plus gros granulat et en ordonnée à 100% des tamisats ;

-le point A : comme notre diamètre est supérieur à 20mm,

- XA est situé au milieu du segment gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspondant à Dmax ; soit 12.5mm
- YA l'ordonnée, $YA = 50 - \sqrt{D} + K + Ks$ avec K le coefficient correcteur qui est fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.
→ $K = 0$

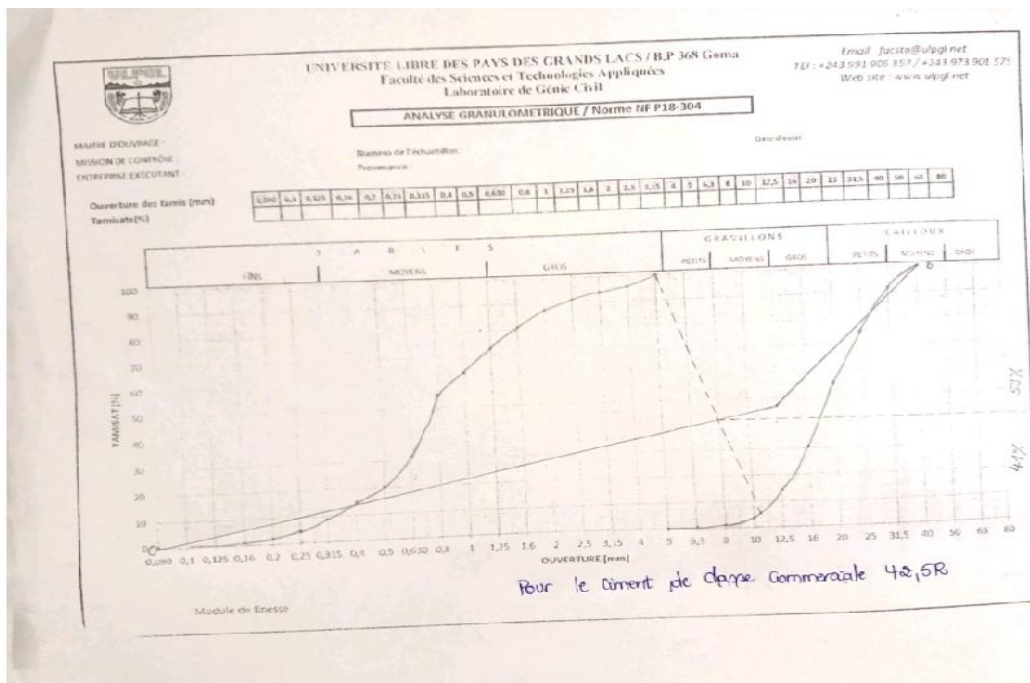
Comme le module de finesse est différent de 2.5, une correction est prévue pour ce coefficient correcteur.

$$Ks = 6 \times Mf - 15 \rightarrow Ks = 6 \times 2.948 - 15$$

$$\rightarrow Ks = 2.688$$

$$\text{On a alors } YA = 50 - \sqrt{31.5} + 2.688$$

$$\rightarrow YA = 47.0755\%$$



Ceci donne : % sable=41% et le % gravier=59%

7. Coefficient de compacité et composition massique

Le coefficient de compacité est fonction de la consistance du béton, du serrage du béton, de la dimension du plus gros granulat D.

On a $\gamma=0.830$, pour une consistance plastique, à vibration normale et $D=31.5\text{mm}$.

On sait que : $\gamma = \frac{Vg+Vs+Vc}{Vt}$ avec $Vt= 1\text{m}^3$.

$$V_c = \frac{c}{\rho_c} = \frac{400}{3096}$$

$$\rightarrow V_c = 0.129 \text{ m}^3$$

On a alors : $0.830=Vg+Vs+0.129$

$$\rightarrow Vg + Vs = 0.701, \quad V_s = \frac{41}{100} \times 0.701 = 0.28741\text{m}^3 \text{ et } V_g = \frac{59}{100} \times 0.701 = 0.41359\text{m}^3$$

Trouvons alors les masses des granulats par la formule ci-dessous :

$$M = \rho \times V$$

$$\text{Sable : } M_s = \rho_s \times V_s = 2515,82 \times 0.28741$$

$$\rightarrow M_s = 723.07\text{Kg}$$

$$\text{Gravier : } M_g = \rho_g \times V_g = 2703,75 \times 0.41359$$

$$\rightarrow M_g = 1118.24\text{Kg}$$

Pour 1m^3 :

- $M_g=1118,24\text{Kg}$;
- $M_s=723.07\text{Kg}$;
- $M_c=400\text{Kg}$;
- Et $M_{\text{eau}}=188.8527686\text{Kg}$.

A.2 Essai sur les granulats

1. Masse volumique

1° Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est calculée par la formule suivante :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ en } g/cm^3,$$

Avec, M la masse d'échantillon ; V1 le volume d'eau ; et V2 le volume de l'eau plus granulat

	SABLE		GRAVIERS	
Essais	Essai N°1	Essai N°2	Essai N 1	Essai N 2
M(g)	200	200	200	400.31
V1 (cm ³)	400	150	400	800
V2 (cm ³)	479	230	474	948
P _{abs} (g/cm ³)	2,53164557	2,5	2.7027027	2.7047973
Moyenne (g /cm ³)	2,515822785		2.70375	

2° Masse volumique apparente

La masse volumique apparente s'obtient par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V}, \text{ en g/cm}^3$$

Avec,

- V : le volume du récipient (moule) ;
Alors, $V = \text{surface}(S) \cdot \text{hauteur}(H)$, avec $S = \pi \cdot R^2 = 10\text{cm}$, $H = 11.6\text{cm}$.
On a, $V = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot H$
 $\rightarrow V = \pi \times \left(\frac{10}{2}\right)^2 \cdot 11.6 = 910.948\text{cm}^3$
- M = *masse pesée – masse du moule.*

On a alors,

	SABLE		GRAVIERS	
Essais	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°1	Essai N°2
M _m (g)	3965	3965	3965	3965
M _p (g)	5240	5235	5189	5195
V (cm ³)	910.948	910.948	910.948	910.948
P _{app} (Kg/cm ³)	1.39964	1.39415	1.34366	1.35024
Moyenne	1.396896		1.346948	

2. Équivalent de sable

Échantillons	ECH 1	ECH 2
H1 (cm)	94	95
H2 (cm)	97	97
H piston (cm)	90	89
ES à vue (%)	96.9072165	97.9381443
ES piston (%)	92.7835052	91.7525773
Moyenne à vue (%)	97.42268041	
Moyenne piston (%)	92.26804124	
Moyenne (%)	94.84536082	

A. Absorption d'eau

On sait que : $Ab = \frac{\text{masse échantillon immergé} - \text{masse sèche}}{\text{masse sèche}}$ en %,

Avec ; $M_{\text{éch.im}} = 540.94\text{g}$, $M_{\text{sec}} = 531.81\text{g}$.

$$\rightarrow Ab = \frac{540.94 - 531.81}{531.81} \times 100 = 1.7167\%$$

A.3 Essai sur le ciment

1. Masse volumique absolue du ciment

On sait que ; $\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$ en g/cm^3 , avec M la masse du ciment qui est la différence entre la masse du pétrole-ciment et la masse du pétrole

Classe commerciale du ciment	32.5R	42.5R
M_1 (g)	330.15	329.92
M_2 (g)	381.56	384.41
V (cm^3)	17.5	17.6
ρ_{abs} (g/cm^3)	2.9377143	3.09602273

2. Consistance normale

1. Pour la classe commerciale 32,5R

Quantité d'eau en %	Masse d'eau en g	Résultats obtenus	Masse du ciment en g
28	140	3.6	500
29	145	4.2	
30	150	4.8	
31	155	5.6	

2. Pour la classe commerciale 42,5R

Quantité d'eau en %	Masse d'eau en g	Résultats obtenus	Masse du ciment en g
28	140	4.9	500
29	145	5.8	

Bibliographie

- [1] CT. Drs. Ir. ALLY ALINABIWE, Cours de Physique et technologie du beton, Goma: ULPGL, 2022.
- [2] German HERMIDA, Influence du volume de pate et de la concentration en ciment sur la performance du beton:vers le developpement d'un beton a contenu minimal en pate,these de doctorat, France: ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN, 2008.
- [3] AHMED Faycel, CONCEPTION D'UN BETON DESTINE AUX OUVRAGES HYDROTECHNIQUES, Algerie, 2015.
- [4] G. D. Jean FESTA, Nouveau guide du béton et de ses constituants, EYROLLES, 2006.
- [5] L. Cantau, Écrivain, *Le ciment et ses applications*. [Performance]. CIMBETON, 2006.
- [6] AKSANTI BALOLA Jackson, ETUDE DU COMPORTEMENT DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION DU BETON SUITE A LA VARIATION UNIMODALE QUANTITATIVE DE SES COMPOSANTES PRIMAIRES,Memoire, Goma: ULPGL, 2020.
- [7] BAHATI KHASHI Yvan, ETUDE COMPARATIVE DES BETONS AUTOPLAÇANTS FORMULES A PARTIR DE LA METHODE DE DREUX GORISSE ET CELLE DE BOLOMEY, Goma: ULPGL, 2021.
- [8] Mme YOUSFI SAADIA, RECHERCHE D'UNE METHODE UNIVERSELLE DE FORMULATION DE BETON PAR UNE ETUDE STOCHASTIQUE CORRELATIVE., UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDENE FACULTE DE GENIE CIVIL, 2014.
- [9] Mme MOHAMADI Saddika, Matériaux et Ouvrages de Génie Civil, 2014.
- [10] Cours-ETS, Caractéristiques fondamentales du béton, 2015.
- [11] G. DREUX, COMPOSITION DES BETONS.

- [12] G. Gédéon Ken K. OBINE, ELABORATION D'UNE DEMARCHE DE FORMULATION DU BETON DE STRUCTURE A BASE DE COQUES DE NOIX DE PALMISTES POUR L'OBTENTION D'UNE RESISTANCE CIBLE EN COMPRESSION, BENIN: UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC), 2020.
- [13] N. T. KADI Abdelghani, Méthodes de la formulation des bétons.(Etude Théorique), UNIVERSITE AHMED DRAIA D'ADRAR, 2020.
- [14] David Lozach, Les bétons : formulation,fabrication et mise en œuvre, Paris: Amprincipe Paris R.C.S. Paris B 389103805, 2013.
- [15] NKUBA ROBERTINE Deborah, ETUDE DE LA VALORISATON DU CALCAIRE EN SUBSTITUTION PARTIELLE DU CIMENT PORTLAND EN VUE DE GARDER LES MEMES CARACTERISTIQUES MECANIQUES, Goma, 2019.
- [16] Pr. GHOMARI Fouad, Matériaux de Construction, Dakar.
- [17] H. R. Jacques LAMIRAULT, BETON ARME Guide de calcul, Paris: FOUCHER, 1993.