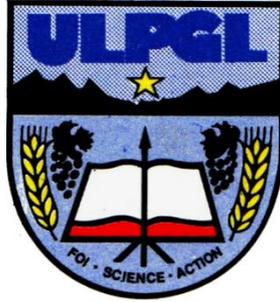


**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DESGRANDS LACS**

**« ULPGL/Goma »**



B.P.368 Goma

**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA  
CHAUX SUR LES PROPRIETES DU  
BETON ORDINAIRE**

Travail de fin de cycle présenté en vue de l'obtention du  
diplôme de graduat en sciences appliquées.

***Par : MAYELE GUELORD Alfred***

***Directeur : Msc. Ir. MUHINDO WA MUHINDO***

***Abdias***

***Encadreur : Ass. Ir. KOKO KATUMBI Pascal***

Année académique : 2021-2022

**EPIGRAPHE**

*« Mieux vaut être ingénieux sans être ingénieur, qu'ingénieur sans être ingénieux. »*

**Hosni Sonko**

**DEDICACE**

A nos très chers parents KAMATE BISIKA Benoit et MASIKA FATUMA Marie.

*MAYELE GUELORD Alfred*

## REMERCIEMENTS

C'est pour nous une occasion d'exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué au présent travail.

Premièrement, nous remercions le bon Dieu pour le souffle de vie qu'il ne cesse de nous accorder.

Nos sentiments les plus profonds s'adressent au Master Ir. MUHINDO WA MUHINDO Abdias et à l'Assistant Ingénieur KOKO KATUMBI Pascal qui ont accepté respectivement de diriger et d'encadrer le présent travail malgré leurs multiples occupations.

Nos remerciements s'adressent au corps académique et scientifique de l'Université Libre des Pays des Grands lacs en général et à celui de la Faculté des Sciences Technologiques Appliquées en particulier pour l'encadrement efficace mise à notre disponibilité.

Nos pensées s'érigent encore à nos parents KAMATE BSIKA Benoit et MASIKA FATUMA Marie. L'affection, les sacrifices que vous avez consentis pour notre formation, les conseils ainsi que vos prières en notre égard nous vont droit au cœur.

Nos remerciements s'adressent à nos frères MAYELE Magloire, MAYELE Nelson ainsi qu'à nos sœurs Isabelle MAYELE, LUSABO Rosette, KAVUGHO Sarah et KATUNGU Christiana.

Nous remercions également notre famille académique à l'instar de NZAMU Israël, FURAHA CHIZA, SOKI Marie, DUKU Keren, KANUMBI Andres, TUSSI Murphy, LUBALIRO Ibrahim, AKILIMALI David, MWAKA Etienne, etc.

Tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail par les encouragements, remarques, suggestions et assistance, dont les noms ne figurent pas sur cette page se sentent également remercier.

***MAYELE GUELORD Alfred***

## RESUME

Ce travail porte sur une étude de l'influence de la chaux sur la propriété mécanique (la résistance à la compression) du béton ordinaire utilisé à Goma. Pour arriver à cette fin, nous avons fait les essais d'étude de caractérisation des matériaux notamment l'analyse granulométrique, le degré de propreté du sable, les masses volumiques des agrégats et des liants, l'essai Los Angeles ainsi que la détermination du taux d'absorption d'eau. Nous avons formulé deux types de béton, le premier a été fait ordinairement tandis que le second a été fait avec une substitution partielle du ciment à 30% par la chaux. Les caractéristiques du béton ont été observées avec un dosage 400 Kg/m<sup>3</sup> de béton pour chacun des deux types de béton formulés à partir de la méthode de Dreux-Gorisse. D'une part la confection sans substitution du ciment a donner un béton dont les caractéristiques à l'état frais se trouvent dans la marge de béton plastique préconisées par les normes malgré une augmentation de 50% du dosage en eau et une résistance à la compression à 28 jours de 4,792 MPa ; d'autres part la confection par substitution partielle du ciment par la chaux a donner un béton dont les caractéristiques à l'état frais se trouvent aussi dans la marge plastique tel que préconisé par la norme, avec une augmentation de 75% du dosage en eau, on a une résistance à la compression à 28 jours de 5,702 MPa. Notons que ces faibles résistances observées seraient dues au dosage en eaux qui est élevé ensuite à la majoration de celui-ci pendant la confection, paramètre qui a permis à rechercher la plasticité souhaitée, mais aussi aux conditions de stockage du ciment. Nous avons remarqué que le béton fait par substitution partielle du ciment à 30% par la chaux présente une résistance élevée de 4,55% à celui du béton fait complètement au ciment. Ce travail a pour mots clés : étude, béton ordinaire, chaux et influence.

## ABSTRACT

This work focuses on the study of the influence of lime on the mechanical properties of ordinary concrete used in Goma. To achieve this end, we have carried out material characterization study tests, in particular the particle size analysis, the degree of cleanliness of the sand, the densities of aggregates and binders, the Los Angeles test and finally the determination of the water absorption rate. To carry out our work, we have formulated two types of concrete. The first was done ordinarily while the second was done with a partial substitution of 30% cement by lime. The characteristics of the concrete were observed with a dosage of 400 Kg/m<sup>3</sup> of concrete for each of two types of concrete, both formulated by the Dreux-Gorisse method. On the one hand, the preparation without substitution of cement gave a concrete whose characteristics in the fresh state are within the margin of those of plastic concrete recommended by the standard despite a 50% increase in the water dosage and resistance of compression after 28 days of 4.792 MPa. On the other hand, the preparation by partial substitution of cement by lime gave a concrete whose characteristics in the fresh state are also in the plastic margin as recommended by the standard despite with an increase of 75% water dosage and a compressive strength of 5.702 MPa. It should be noted that these low resistances observed would be due to the water dosage which is then increased by increasing it during manufacture, a parameter which made it possible to have the desired plasticity. We can also attribute these low resistances to the poor storage conditions of the cement. We noticed that the concrete made by partial substitution of cement at 30% by lime presents a high resistance of 4.55% to that of concrete made completely with cement. This work has as keywords: study, ordinary concrete, lime and influence.

## SOMMAIRE

EPIGRAPHE.....	1
DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS .....	3
RESUME.....	4
ABSTRACT .....	5
TABLE DES MATIERES .....	6
SIGLES ET ABREVIATIONS .....	9
LISTE DES TABLEAUX.....	10
LISTE DES FIGURES.....	11
INTRODUCTION GENERALE.....	12
Chapitre 1 REVUE DE LA LITTERATURE .....	14
INTRODUCTION.....	14
I.1. GENERALITES SUR LE BETON .....	14
I.1.1. LE CIMENT [3].....	14
I.1.2. LES GRANULATS .....	18
I.1.3. L’EAU DE GACHAGE.....	20
I.1.4. LES ADJUVANTS .....	21
I.1.5. LA CHAUX.....	27
I.2. LA METHODE DE FORMULATION DU BETON [10] .....	27
I.3. LES PROPRIETES DU BETON .....	30
I.3.1. LES PROPRIETES DU BETON A L’ETAT FRAIS.....	30
I.3.2. LES PROPRIETES DU BETON A L’ETAT DURCI .....	31
I.4. TYPES DES BETONS [12].....	32
I.5. DOMAINE D’UTILISATION DU BETON [4].....	34
CONCLUSION PARTIELLE.....	35
Chapitre 2 : METHODOLOGIE .....	36

INTRODUCTION.....	36
II.1. NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS .....	36
II.2. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS .....	36
II.2.1. LES GRANULATS .....	37
II.2.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE [13].....	37
II.2.1.2. LE DEGRE DE PROPETE DE SABLE [13] .....	40
II.2.1.3. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE .....	42
II.2.1.4. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	43
II.2.1.5. ESSAI LOS ANGELES (LA) .....	43
II.2.1.6. ESSAI DE DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU [1] .....	47
II.2.2. LES LIANTS (CIMENTS ET CHAUX).....	48
II.3. CARACTERISATION DU BETON .....	51
II.4. MÉTHODE PRATIQUE POUR LA COMPOSITION DES BÉTONS - MÉTHODE DITE « DREUX-GORISSE » [8] .....	53
CONCLUSION PARTIELLE.....	60
Chapitre 3 PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS .....	61
INTRODUCTION.....	61
III.1. LES CARACTERISTIQUES DES GRANULATS .....	61
III.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE .....	61
III.1.2. LE MODULE DE FINESSE DU SABLE .....	63
III.1.3. LE DEGRE DE PROPETE DU SABLE .....	63
III.1.4. LES MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS .....	64
III.1.5. LE TAUX D'ABSORPTION.....	64
III.1.6. LA RESISTANCE A LA FRAGMENTATION.....	64
III.2. CARACTERISTIQUE DES LIANTS .....	65
III.3. RESULTAT DE LA FORMULATION.....	66
III.4. CARACTERISTIQUE DU BETON .....	68

III.4.1. Résultat de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams .....	68
III.4.2. Résultat de la résistance à la compression .....	68
CONCLUSION PARTIELLE .....	69
CONCLUSION GENERALE .....	70
Bibliographie .....	71
ANNEXE I : PROPRIETE DU SABLE .....	73
ANNEXE II : PROPRIETE DU GRAVIER CONCASSE .....	75
ANNEXES III : PROPRIETES DES LIANTS .....	76
ANNEXES IV : COMPOSITION DU BETON .....	77

**SIGLES ET ABREVIATIONS**

AFNOR : Association Française de Nationalisation

ASTM : American Society for Testing and Materials

EN : norme européenne

NF : norme Française

CaO : la chaux

MPa : méga pascal

AG : Analyse Granulométrique

Kg : Kilogramme

G : proportion de gravier

S : proportion du sable

E : proportion de l'eau

LA : Los Angeles

C : proportion du ciment

m<sup>3</sup> : mètre cube

ES : équivalent de sable

$\sigma_{c28}$  : résistance caractéristique du béton a 28 jours

E/C : rapport eau sur ciment

D : dimension maximale du plus gros grain des granulats

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Classes normalises de résistance en compression du ciment [5].....	17
Tableau 1.2: Valeurs minimales garanties pour chaque classe de résistance [5].....	18
Tableau 1.3 Classe des bétons selon l'affaissement [11].....	30
Tableau 2.1 Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [14].....	42
Tableau 2.2 Nombre des boulets selon les classes granulaires [13].....	46
Tableau 2.3 Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [8] .....	54
Tableau 2.4 Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [4] .....	55
Tableau 2.5 Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 20\text{mm}$ ). [4].....	56
Tableau 2.6 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 : $(y = 50 - \sqrt{D} + K)$ .....	57
Tableau 2.7 Valeurs du coefficient de compacité $\gamma$ .....	58
Tableau 3.1 Résultat de l'essai d'équivalent sable .....	63
Tableau 3.2 Valeurs masses volumiques des granulats.....	64
Tableau 3.3 Appréciation de la valeur LA .....	65
Tableau 3.4 Masses volumiques des liants.....	65
Tableau 3.5 Résultats de l'essai de consistance.....	66
Tableau 3.6 Données de base .....	66
Tableau 3.7 Dosage en liant et en eau .....	67
Tableau 3.8 Coordonnées de la courbe de référence OAB .....	67
Tableau 3.9 Dosages massiques des granulats .....	67
Tableau 3.10 Résultats des affaissements .....	68
Tableau 3.11 Résultats des essais de compression.....	68

## LISTE DES FIGURES

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) [4].....	21
Figure 1.2 Pourcentage d'air entraîné recommandé suivant la grosseur des granulats (d'après R. E. Hess) [8].....	24
Figure 1.3 Schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [8].....	25
Figure 2.1 Colonne de tamis pour l'analyse granulométrique et la tamiseuse électrique .....	38
Figure 2.2 Matériels utilisés pour l'équivalent de sable.....	41
Figure 2.3 Machine Los Angeles .....	45
Figure 2.4 Appareil de Vicat .....	50
Figure 2.5 Cône d'Abrams .....	52
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) [4] .....	55
Figure 3.1 Types des granulats utilisés .....	61
Figure 3.2 Courbe granulométrique du sable .....	62
Figure 3.3 Courbe granulométrique du gravier .....	63
Figure 3.4 Histogramme des résistances .....	69

## INTRODUCTION GENERALE

La République Démocratique du Congo, par ses ressources est considérée comme un pays émergent surtout dans le domaine de construction des ouvrages tels que les bâtiments, les routes, les ponts, les barrages, etc. Toutes les constructions font souvent recours à un béton, matériau qui n'a cessé de marquer l'histoire du monde de construction. Le béton est un matériau composite constitué du mélange du ciment, de l'eau, des granulats ainsi qu'éventuellement des adjuvants [1]. Les granulas constituent le squelette granulaire du béton, ils lui attribuent donc l'essentiel de sa résistance mécanique, l'eau facilite sa mise en œuvre du béton et le liant, malgré son dosage moindre comparé aux granulats maintient ensemble les autres constituants du béton. Le présent travail se propose d'étudier l'impact que pourrait avoir une substitution partielle du ciment (de 30% par la chaux) sur les propriétés mécaniques du béton dans le bâtiment.

La ville de Goma est l'une des villes de la République Démocratique du Congo qui présente une certaine richesse en matériaux de construction plus particulièrement en agrégats. Ceux-ci interviennent directement dans la mise en œuvre du béton ordinaire et lui confère une certaine résistance. Dans cette même région du pays se localise une entreprise qui fournit un matériau plutôt intéressant (la chaux) lors des processus de la production du ciment. Le matériau de la chaux, utilisé quelques fois comme mortier, peut aussi entrer dans la fabrication du béton et en modifier quelques propriétés.

Pour avoir une bonne solution il suffit de mieux formuler la question. Pour ce travail, la plus grande question est de savoir si entre le béton confectionné au ciment portland et celui fait avec ce même ciment mais avec une substitution partielle, lequel résiste mieux à la compression ? Nous pensons que la chaux pourrait modifier positivement les propriétés mécaniques du béton car elle confère des avantages au mortier dans sa forme plastique et dans sa forme durcie. Dans sa forme plastique, la chaux rehausse la maniabilité et la rétention d'eau. Dans sa forme durcie, la chaux réagit avec le dioxyde de calcium ou le calcaire. C'est un processus qui augmente la dureté du béton et permet le re-soudage des petites fissures fines [2].

Afin de bien réaliser notre travail, nous allons faire recours à des méthodes et techniques nécessaires à l'aboutissement des résultats fiables. Pour y parvenir, nous allons caractériser les matériaux qui constituent le béton ; formuler et confectionner deux types de béton notamment celui fait au liant de ciment et celui fait par substitution du ciment à 30% par la chaux ; tester les éprouvettes à la compression au laboratoire afin d'en déterminer les résistances et comparer les résultats obtenus pour ensuite tirer une conclusion.

La raison qui nous a poussé à faire le choix de ce sujet n'est rien d'autre qu'une curiosité scientifique nourrie des doutes sur l'application de la chaux dans le béton. Afin d'établir une différence entre les deux types de béton dont on traite dans ce travail, il a été nécessaire d'étudier chacun deux.

L'objectif principal poursuivi dans cette recherche est d'évaluer, en termes de résistance à la compression, l'impact que pourrait avoir une substitution du ciment à 30% par la chaux dans un béton ordinaire utilisé pour la construction des ouvrages. Afin d'y parvenir, il a été nécessaire d'étudier les différents matériaux nécessaires dans la formulation du béton ; de formuler un béton par la méthode de Dreux-Gorisse ; soumettre les échantillons formulés à des essais et comparer les résultats obtenus après formulation et essais, en comparant notamment les propriétés à l'état frais et l'état durci enfin de déterminer l'influence de la chaux dans le béton. Après essai au laboratoire, il a été constaté que le béton confectionné au liant de ciment remplacé à une proportion de 30% par le liant de la chaux présente une élévation de résistance à la compression de 4,55% plus que celle du béton confectionné au liant du ciment sans substitution.

Hormis l'introduction générale et la conclusion générale ce travail est subdivisé en trois chapitres. La première traite de l'état de l'art notamment de la généralité sur le béton, sa méthode de formulation, ses propriétés, son domaine d'utilisation, etc. ; la deuxième traite de la méthodologie employée dans ce travail dans la caractérisation du béton et de ses constituants ; et enfin le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leurs interprétations.

# Chapitre 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

## INTRODUCTION

Le béton est le matériau le plus communément utilisé dans la construction des structures de génie civil. Ceci s'explique par le fait qu'il offre la possibilité de varier ses propriétés dans de longues limites en utilisant les composants aux qualités correspondantes. Le béton est un produit artificiel car il est produit par une technique et non par la nature.

En effet, il est important de connaître non seulement l'utilité et les propriétés physiques comme mécaniques mais aussi la composition et la classification de chaque matériau de construction avant de l'utiliser dans un projet de construction. Car une bonne connaissance de ces dernières permet une bonne utilisation et la construction des ouvrages solides, durables et économiques.

Ce chapitre présente les généralités sur le béton notamment les généralités sur ses constituants (les granulats, les liants et les adjuvant), la classification et les propriétés du béton, et ainsi que les méthodes de formulation du béton.

### I.1. GENERALITES SUR LE BETON

On appelle béton une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau et de granulats choisis de façon rationnelle [1].

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés, cela dû au fait qu'il permet de réaliser de longues portées et des formes complexes. Il peut être utiliser tel quel ou renforcé par des armatures, on parle de béton armé, précontraint, etc. on y incorpore les adjuvants à faible dose afin d'améliorer ses propriétés.

Une bonne connaissance des propriétés des matériaux de construction permet de bien les utiliser et de construire des ouvrages solides, durables, et économiques. Le béton est un produit artificiel car il est produit par une technique et non par la nature.

#### I.1.1. CIMENT [3]

C'est un mélange finement moulu de roche calcaire et des schiste (argile), homogénéisé, séché, décarbonaté puis fondu à 1450°C dans un four rotatif ; on obtient du clinker. Ce dernier est une roche artificielle obtenue par cuisson du cru, constitué d'un mélange de calcaire (environ 80%) et de 20% d'argile ou de matériaux apportant de la silice, de l'alumine et du fer. Le broyage du clinker avec du gypse (indispensable à la régulation de prise du ciment, à 5% de clinker) donne du *Ciment Portland Artificiel CPA*.

En y ajoutant des constituants secondaires (le laitier du haut fourneau, la cendre volante, la pouzzolane, les fines calcaires, etc.) on obtient du *Ciment Portland Composé CPJ*.

Les ciments utilisés peuvent être blancs ou gris, selon la teinte et l'effet de finition recherchés, les granulats et colorants utilisés. Leur choix est adapté aux conditions d'environnement et celui de l'ingénieur. Le choix du type de ciment et son dosage dépend à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature des autres constituants (granulométrie des agrégats).

#### **I.1.1.1. Types de ciment**

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. Nous présentons les types des ciments ainsi que les classes de résistances du ciment.

#### **A. Ciments Portland [4]**

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

##### **A.1. Ciment Portland : CEM I**

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

##### **A.2. 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.

##### **A.3. Ciment de haut fourneau : CEM III**

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

##### **A.4. 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.

#### **B. Autres ciments**

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

### **B.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.

### **B.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).

### **B.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.

### **B.4. Ciment blanc [4]**

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.

### I.1.1.2. Classes de résistance du ciment [5]

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 [5]*

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	-	$\geq 16$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10$	-		
42,5 N	$\geq 10$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20$	-		
52,5 N	$\geq 20$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30$	-		

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 [5]**

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.

### **I.1.2. 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.

#### **I.1.2.1. TYPES DE GRANULATS [4]**

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

##### **i. Granulats naturels**

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

##### **1) 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) 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) 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) 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.).

## **I.1.2.2. CLASSIFICATION 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  $6,3$  mm  $< D \leq 80$  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 prépondérants 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 [6].

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.

### **I.1.3. EAU DE GACHAGE**

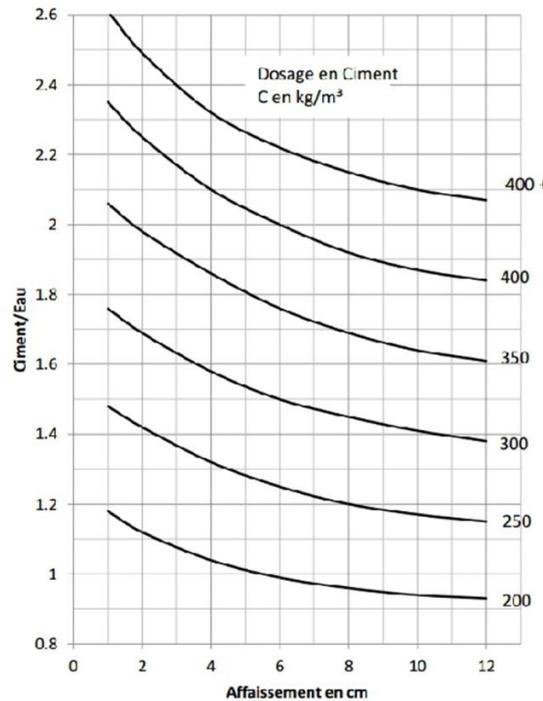
L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais 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 augmentant 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. [7]

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 ci-dessous 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) [4]*

#### **I.1.4. 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. 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.

##### **I.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.

### **A. 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%.

### **B. 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.

### **C. 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.

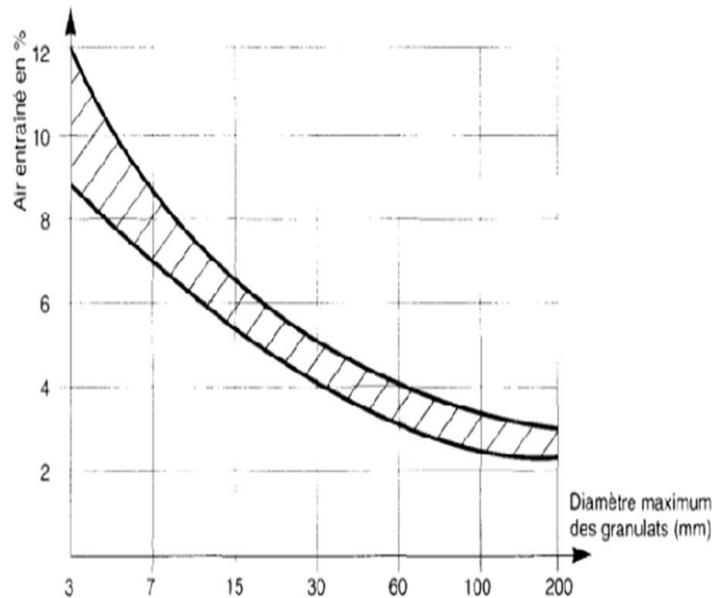
#### **D. Entraîneurs d'air**

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 [8]. 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) [8]*

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 à un Blaine élevé, plus le dosage en adjuvant doit être élevé ;
- Plus la granulométrie des graviers augmente plus le % d'air entraîné diminue.

### **E. 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.

## F. 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.

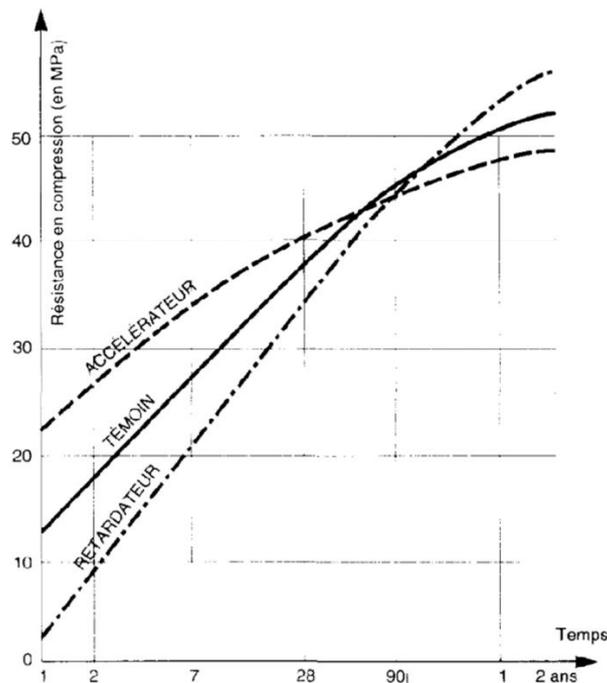


Figure 1.3 Schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [8]

## G. 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.

## **H. 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-géllivité.

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).

## **I. 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

Sable grossier : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.

Sable moyen : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,2 et 2mm.

Sable fin : Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 µm, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

### **I.1.5. CHAUX**

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde.

#### **I.1.5.1. Cycle de la Chaux**

Les produits dérivés du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive ( $\text{CaO}$ ). La chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans cet état, le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère ou provenant de procédés industriels peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. Ce cycle de continuité s'appelle le cycle de la chaux. Le temps requis à la chaux pour retourner à l'état de calcaire peut être de quelques minutes avec l'aide de procédés industriels à plusieurs années si elle est laissée aux conditions atmosphériques [9].

## **I.2. METHODE DE FORMULATION DU BETON [10]**

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

### **I.2.1. Méthode de Bolomey**

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La relation (I.1) est formule de base :

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (I.1)$$

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

### **I.2.2. Méthode d'Abrams**

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.

### **I.2.3. Méthode de Faury**

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.

### **I.2.4. Méthode de Vallette**

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.

### **I.2.5. Méthode de Baron et Lesage**

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.

### **I.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 [4].

### I.3. 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.

#### I.3.1. PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS

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

##### I.3.1.1. 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 [11]. 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 [11]*

<b>Affaissement (cm)</b>	<b>Classe selon la consistance</b>	<b>Domaine d'utilisation</b>
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.

##### I.3.1.2. Autres propriétés du béton frais [4]

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

### **i. 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. 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.

## **I.3.2. 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  $20 \pm 20$  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.

#### **I.4. TYPES DES BETONS [12]**

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

##### **I.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.

##### **I.4.2. 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

##### **I.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  $2500 \text{ Kg/m}^3$ . 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.

##### **I.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

#### **I.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.

#### **I.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.

#### **I.4.7. Béton léger**

Les bétons légers offrent une densité très inférieure à celle d'un produit classique : de 300 à 1800 kg/m<sup>3</sup>, contre 2300 kg/m<sup>3</sup> pour un béton classique. Pour certains bétons légers, elle peut descendre jusqu'à des densités voisines de 0,4kg/m<sup>3</sup>. 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.

#### **I.4.8. Béton lourd**

Les bétons lourds possèdent une masse volumique supérieure à 3000 kg/m<sup>3</sup> contre 2300 kg/m<sup>3</sup> 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.

#### **I.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.

#### **I.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.

#### **I.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.

#### **I.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.

#### **I.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.

### **I.5. DOMAINE D'UTILISATION DU BETON [4]**

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

#### **I.5.1. 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.

## **I.5.2. 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.5.2.1. 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.

### **I.5.2.2. Barrages**

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

### **I.5.2.3. 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.

## **CONCLUSION PARTIELLE**

Dans 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 à l'état frais et celles du béton à l'état durci, des types de béton et du domaine d'application.

## **Chapitre 2 : METHODOLOGIE**

### **INTRODUCTION**

L'étude de l'influence que présente le ciment substitué à 30% par la chaux dans le 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 génie civil de la FSTA de l'ULPGL.

### **II.1. NATURE ET ORIGINE DES CONSTITUANTS**

Pour la confection d'un béton on utilise des constituants de nature et d'origines différentes. Dans cette section nous présentons respectivement la nature et l'origine du ciment, des granulats et de l'eau de gâchage.

#### **II.1.1. Ciment**

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment HIMA produit en Ouganda, de couleur grise et de classe commerciale 32,5.

#### **II.1.2. Granulats**

Les granulats utilisés dans cette étude sont des roches volcaniques de Goma. Le sable est roulé et provient de l'île d'Idjwi ; les graviers sont du type concassé.

#### **II.1.3. Eau de gâchage**

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable fournie par la REGIDESO, et recueilli au robinet.

### **II.2. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS**

La caractérisation des constituants consiste à la détermination des différentes propriétés des constituants telles que : la détermination des masses volumiques apparentes et absolues du sable, des graviers, du ciment et de la chaux, l'analyse granulométrique de sables et des

graviers, le degré de propreté pour le sable, le taux d'absorption d'eau pour les graviers ainsi que la consistance normale du ciment et de la chaux.

### **II.2.1. GRANULATS**

La caractérisation des granulats est passée par différents essais normalisés. Cette section reprend les différents essais effectués sur le sable notamment la détermination de la masse volumique apparente et absolue, l'analyse granulométrique, le module de finesse et l'équivalent sable, et la détermination du taux d'absorption d'eau.

#### **II.2.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE [13]**

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560, elle a été réalisée par voie sèche.

##### **A. But de l'essai**

L'analyse granulométrique a trois buts à savoir : déterminer les dimensions des grains, déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral) et en déduire le module de finesse (Mf).

Les granulats utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil sont des matériaux roulés ou concassés d'origine naturelle ou artificielle, de dimensions comprises entre 0 et 80mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont les tailles variées se répartissent entre deux limites : la plus petite (d) et la plus grande dimension (D).

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. La granulométrie ou analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80mm et 0,063 mm

##### **B. Principe de l'essai**

L'essai consiste à effectuer un double tamisage. Tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires  $d_i/D_i$ . Chacun des granulats élémentaires  $d_i/D_i$  est ensuite tamisé au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement  $D_i/2$ .

Le coefficient d'aplatissement global est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des grilles à fentes ; exprimé en pourcentage du total de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai.

Si nécessaire, le coefficient d'aplatissement de chaque granulat élémentaire  $d_i/D_i$  correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes correspondante, exprimé en pourcentage de la masse de ce granulat élémentaire

### C. 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 2.1 illustre une suite de tamis pour l'analyse granulométrique ainsi qu'une tamiseuse électrique.



*Figure 2.1 Colonne de tamis pour l'analyse granulométrique et la tamiseuse électrique*

### D. 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 contenus dans le fond de la colonne de tamis.

### E. Expression des résultats

On établit un tableau qui reprend dans les colonnes les refus de chaque tamis, le refus cumulé en pourcentage et le tamisât en pourcentage.

De ces données :

- On trace une courbe appelée courbe granulométrique : avec les masses des différents refus rapportée à la masse initiale du matériau et exprimée en pourcentage. Nous procédons au traçage du courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D en abscisse.
- On trouve le module de finesse, pour le sable, qui est déterminé par la relation (2.1) :

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

Avec :

- Rc : Refus cumulé en pourcentage
- Mf : Module de finesse

Pour la confection du béton le module de finesse du sable doit être entre 2,  $2 \leq Mf \leq 2,8$  [1].

Le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure, s'il s'agit du sable, ces deux coefficients sont déterminés par les relations 2.2 et 2.3.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.2)$$

$$Cz = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.3)$$

Avec :

- Cu : le coefficient d'uniformité
- Cz : le coefficient de courbure
- D10 : est le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée de 10% ;
- D30 : est le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée de 30% ;

- D60 : est le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée de 60% ;

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

### II.2.1.2. DEGRE DE PROPETE DE SABLE [13]

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

#### A. 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.

#### B. Principe

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution floculante 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 (2.4) :

$$ES = \frac{h1}{h2} * 100 \quad (2.4)$$

Avec :

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

#### C. Matériels utilisés

Conformément à la norme NF P 18-598, les matériels utilisés pour cet essai sont présentés à la figure 2.2 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 floculat,
- Le piston taré à masse coulissante de 1 kg pour la mesure des hauteurs.



*Figure 2.2 Matériels utilisés pour l'équivalent de sable*

#### **D. Mode opératoire**

- On verse dans une cylindrique jusqu'au trait repère inférieur, une solution lavante ;
- Introduire dans l'éprouvette une masse sèche de  $120\text{g} \pm 1\text{g}$  de matériau à l'aide de l'entonnoir ;
- Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main par déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon ;
- Laisser reposer 10min ;
- Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc ;
- Fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation ;
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles  $\pm 1$  cycle en  $30\text{s} \pm 1\text{s}$  ;
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais ;
- Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette ;
- Rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavant ;
- Puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette ;
- Puis laver le sable pour faire remonter les éléments argileux tout en maintenant l'éprouvette en position verticale. L'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de

rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur et Relever le tube laveur de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur de trait repère. Puis Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

- Laisser reposer sans perturbation pendant  $20 \text{ mn} \pm 10\text{s}$
- Mesurer à l'aide du réglet la hauteur  $h_1$  au niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette
- Mesurer également, si possible, la hauteur  $h_2$  du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette. (Les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  sont arrondies au millimètre le plus voisin)
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon. Arrondir la hauteur  $h_2$  au millimètre le plus voisin. - Refaire les mêmes opérations deux fois

### E. Expression des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentages et interprétés suivant le tableau 2.1 :

*Tableau 2.1 Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [14]*

Valeurs de ES	Conclusions
$ES \geq 80$	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

#### II.2.1.3. MASSE 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 [4]. 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 (2.5).

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

Où :

- $\rho_{abs}$  : la masse volumique en g/cm<sup>3</sup>
- 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.

#### II.2.1.4. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

La masse volumique apparente c'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant. 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 [4].

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 (2.6).

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (2.6)$$

Avec :

- $\rho_{app}$  la masse volumique apparente en g/cm<sup>3</sup> ;
- v le volume du récipient en ml ;
- et m la masse sèche du matériau en g.

#### II.2.1.5. ESSAI LOS ANGELES (LA)

L'essai de la résistance à la fragmentation s'applique aux graviers.

##### A. Définition et but de l'essai

L'essai (N.F. P1 8.573) permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat [13].

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

### **B. Principe de l'essai**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités types, de la classe granulaire 4/6,3 mm — 6,3/10 mm — 10/14 mm — 10/25 mm — 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre [13].

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. Si P est le matériau soumis à l'essai, p le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :  $CLA = 100 \times p / P$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, "coefficient Los Angeles" du matériau.

### **C. Matériel utilisé**

a) La machine Los Angeles comporte :

- Un cylindre creux en acier de  $12 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de  $711 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  et une longueur intérieure de  $508 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre ; le montage est tel que le cylindre peut ainsi tourner sur son axe qui doit être horizontal,
- Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon. Pendant l'essai, cette ouverture est obturée d'une façon hermétique aux poussières par un couvercle amovible tel que la surface intérieure reste bien cylindrique.



*Figure 2.3 Machine Los Angeles*

- Cette dernière est coupée par une tablette en saillie placée à une distance de 40 cm du rebord du couvercle, distance mesurée le long du cylindre dans le sens de la marche. Cette tablette démontable, en acier dur est de section rectangulaire (longueur égale à celle du cylindre, largeur de  $90 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , épaisseur de 25 mm). Elle repose, suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales. Elle doit avoir des arêtes vives, La charge est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre environ et pesant 420 et 445 g. Ces boulets ne doivent pas s'user de façon trop irrégulière,
  - Un moteur d'au moins 0,75 kW, assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute,
  - Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai,
  - Un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre le tour voulu.
- b) Un jeu de tamis de 1,6 — 4 — 6,3 10 — 14 mm. Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm,
- c) Une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg,
- d) Une étuve à  $105^{\circ} \text{C}$ ,
- e) Des bacs et des truelles,
- f) Des bacs d'environ 40 x 30 x 5 cm, à perforation inférieur à 1,6 mm.

### D. Préparation du matériau [13]

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des six classes granulaires type, lavé et séché à l'étuve à 105 °c jusqu'à poids constant (5 heures au minimum). La prise d'essai sera de 5 kg. On la préparer de la façon suivante :

- a) Si deux essais sont envisagés, préparer, à partir de 15 kg, deux échantillons identiques par quartage à sec,
- b) Sinon, tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

Recueillir dans un bac 5100 g environ du matériau tamisé. Ce poids supplémentaire de 100 g servant à compenser celui des poussières ou de la gangue terreuse. Laver cette quantité recueillie sous un jet d'eau et la remuer à la truelle jusqu'à ce que l'eau soit claire. Après lavage, verser le matériau dans un bac perforé et égoutter quelques instants.

Sécher l'ensemble à l'étuve à 105 °c, jusqu'à poids constant. Retirer le bac perforé de l'étuve et laisser refroidir. Enlever l'excédent de matériau pour ajuster le poids à  $P = 5 \text{ kg} \pm 2 \text{ g}$ , exigé pour l'essai.

### E. Mode opératoire

- Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie (voir tableau 2.2).

*Tableau 2.2 Nombre des boulets selon les classes granulaires [13]*

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

25 - 50	25 - 40 ; 40 - 50	12	5280 ± 25	3000 ; 2000
---------	-------------------	----	-----------	-------------

- Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn pour toutes les classes à l'exception de la classe 25—50 mm où le nombre de rotations est de 1000.
- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1 mm ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.
- Peser ce refus une fois séché.

Soit  $P'$  le résultat de la pesée.  $p = P - P' = 5000 - P'$ . Le coefficient Los Angeles sera donc égal à :  $CLA = 100 \times (5000 - P') / 5000$ . Le résultat sera arrondi à l'unité.

#### II.2.1.6. ESSAI DE DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU [1]

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

##### A. But de l'essai

Cette manipulation a pour objectif de déterminer le coefficient d'absorption d'un matériau à partir de différentes pesées.

##### B. Principe de l'essai

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme rapport d l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C.

Le coefficient d'absorption  $Ab$  est défini par la relation suivante (2.6) :

$$Ab = \left( \frac{M_1 - M_0}{M_0} \right) \times \rho \times 100 \quad \text{en pourcentage (\%)} \quad (2.6)$$

Avec  $M_1$  = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C et  $M_0$  = masse de l'échantillon imbibé.

### C. Matériels et matériaux utilisés

Pour réaliser cet essai, on a besoin des éléments ci-dessous :

- Etuve
- Balance de précision 1 à 2 cg
- Récipient de mesure
- Gravier sec
- Eau

### D. Mode opératoire de l'essai

1. Préparation de l'échantillon : il faut que l'échantillon analysé soit sec (séché à l'étuve à 105 °C).
2. Exécution de l'essai :
  - Peser une masse  $M_0$  de l'échantillon sec,
  - Placer cet échantillon dans l'eau et porter à l'ébullition pendant 24h pour chasser l'air des pores,
  - Laisser refroidir dans l'eau pour accélérer le remplissage des pores,
  - Retirer l'échantillon de l'eau et essuyer chaque grain,
  - Peser à nouveau l'échantillon et noter  $M_1$  la nouvelle masse,
  - Trouver la valeur du coefficient  $A_b$ .

## II.2.2. LIANTS (CIMENTS ET CHAUX)

La caractérisation du liant a porté sur la détermination de sa masse volumique absolue ainsi que sa consistance normale

### II.2.2.1. Masse volumique absolue

On applique la méthode de l'éprouvette graduée selon la norme NF P 18- 558.

#### A. But de l'essai

Il s'agit de mesurer la masse par unité de matière pleine sans aucun vide entre les grains.

#### B. Principe de l'essai

Sachant la masse, le volume du pycnomètre et la masse du liquide n'entrant pas en réaction avec le ciment, on détermine la masse volumique absolue du ciment [1].

### C. Mode opératoire

- Introduire la solution dans le pycnomètre jusqu'au premier trait repère, noté V1= 0 ml ;
- Peser le pycnomètre contenant la solution, noté M1 en gramme ;
- Introduire une quantité de ciment dans le pycnomètre jusqu'au deuxième trait repère, noté V2 en ml ;
- Peser à nouveau le pycnomètre contenant la solution et le ciment, noté M2 en gramme.

### D. Matériels utilisés

- Balance électrique
- Trois éprouvettes graduées de même volume ou bien le pycnomètre de le Chatelier.

### E. Expression des résultats

Le résultat de la masse volumique du ciment ou de la chaux s'obtient à partir de la relation suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.7)$$

#### II.2.2.2. Consistance normale [4]

Cet essai est réalisé selon la norme EN 196-3 (Aout 1995).

##### A. But de l'essai

Le but de l'essai est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour avoir une patte du ciment à consistance normale.

##### B. Principe de l'essai

Il s'agit d'augmenter successivement l'eau dans une patte de ciment jusqu'à ce que la patte atteigne une consistance jugée normale suivant la norme.

##### C. Mode opératoire

- Peser 500g de ciment ;
- Mélanger cette quantité de ciment (500g) avec une certaine quantité d'eau à commencer à celle correspondant à 27% de la masse du ciment ;
- Vérifier à l'aide de l'appareil de VICAT avec la sonde de consistance si avec cette quantité d'eau apportée pour faire la patte du ciment on obtient une patte a consistance normale. En effet, la patte sera à consistance normale si et seulement si l'affaissement

de la sonde après essai est entre  $6 \pm 1$  mm à lire sur la graduation de l'appareil de VICAT ;

- Refaire avec une quantité d'eau supérieure prise par tâtonnement selon l'appréciation de l'utilisateur dans le cas où le 27% ne satisfait pas pour trouver un affaissement de  $6 \pm 1$  mm

#### **D. Equipements nécessaires et matériau utilisé**

Pour effectuer cet essai on a besoin des éléments ci-dessous :

- Appareil de Vicat
- Sonde de diamètre de 10mm
- Balance de précision
- Plaque en verre
- Moule tronconique
- Récipient de malaxage et cuillère pour malaxer
- Le bécher et une lame métallique



*Figure 2.4 Appareil de Vicat*

#### **E. Expression des résultats**

La pâte sera à consistance normale si  $d = 6 \text{ mm} \pm 1$  mm ; si  $d > 7$  mm : il n'y a pas assez d'eau et si  $d < 5$  mm, il y a trop d'eau, dans les deux cas, il faut jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel et recommencer avec une nouvelle expérience.

## **II.3. CARACTERISATION DU BETON**

Pour mieux caractériser le béton, il a été est 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.

### **II.3.1. Essais sur béton frais [13]**

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

#### **II.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.

##### **A. 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.

##### **B. 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*

#### **II.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.

### **II.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.

#### **II.3.2.1. Résistance à la compression [14]**

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 (2.8) :

$$RC = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

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

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

- RC est la résistance à la compression en MPa.

## **II.4. MÉTHODE PRATIQUE POUR LA COMPOSITION DES BÉTONS - MÉTHODE DITE « DREUX-GORISSE » [8]**

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.

### **II.4.1. Données de bases**

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

#### **II.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.

#### **II.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  $f_{c28}$

$$f_{c28} = f_c - 0,8 s \quad (2.9)$$

Avec :

- $f_{c28}$  : la résistance à la compression a 28 jours en MPa ;
- $f_c$  : 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 :

$$f_c = f_{c28} + 15 \% \quad (2.10)$$

### II.4.1.3. Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué dans le tableau 2.3.

*Tableau 2.3 Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [8]*

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

### II.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 (2.11) :

$$f_c = G * f_{ce} * \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2.11)$$

Avec :

- $f_c$  résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa ;
- $f_{ce}$  classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;
- C dosage en ciment (en Kg/m<sup>3</sup>) ;
- E dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1m<sup>3</sup>) ;
- G étant le coefficient granulaire, le tableau 2.4 présente les différentes valeurs de ce coefficient.

Tableau 2.4 Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [4]

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ( $D \leq 16\text{mm}$ )	Moyen ( $2 \leq D \leq 40\text{mm}$ )	Gros ( $D \geq 50\text{mm}$ )
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.

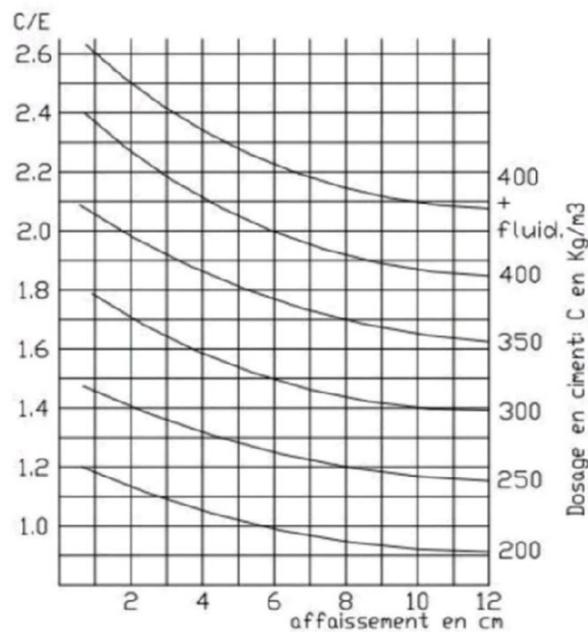


Figure 2.6 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (Affaissement au cône) [4]

### II.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 2.5 en fonction de D.

**Tableau 2.5 Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si  $D \neq 20\text{mm}$ ). [4]**

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

#### II.4.4. Détermination du dosage en granulat [1]

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.

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 2.12

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K \quad (2.12)$$

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 2.6 ;  $K = 0$  pour un béton courant dosé en ciment à 350 kg/m<sup>3</sup> 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 granululaire de référence.

**Tableau 2.6 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 <sup>3</sup> )	400	-2	0	-4	-2	-6	-4
	+Superplastifiant	0	+2	-2	0	-4	-2
	400	+2	+4	0	+2	-2	0
	350	+4	+6	+2	+4	0	+2
	300	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	250	+8	+10	+6	+8	+4	+6
	200						

**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  $K_I = +5$  à  $+10$  environ, selon le degré de plasticité désiré.

#### II.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  $\gamma$  dans le tableau ci-haut.

Les valeurs de  $\gamma$  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  $\gamma$  est supérieur à 0,9

**Tableau 2.7 Valeurs du coefficient de compacité  $\gamma$**

Consistance	Serrage	$\gamma$ 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
Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes : - sable roulé et gravier concassé = - 0.0 I. - sable et gravier concassé = - 0,03.								

#### II.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 granulat 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 (2.13):

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} \quad (2.13)$$

- C : dosage en ciment,
- $\rho_c$  : masse volumique du ciment.

On choisira dans le tableau une valeur convenable du coefficient de compacité  $\gamma$  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 (2.14) :

$$V = 1000\gamma - V_c \quad (2.14)$$

Les volumes absolus de chacun des granulats seront calculés par la relation (2.15) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_s = \%_s \times V \\ v_g = \%_g \times V \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

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  $\rho_s, \rho_g$  les masses de chacun d'eux seront calculées par la relation (2.16) :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_s = v_s \times \rho_s \\ m_g = v_g \times \rho_g \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

- $m_s, m_g$ , respectivement la masse du sable et celle des graviers ;
- $V_s, V_g$ , respectivement le volume du sable et celui des graviers ;
- $\rho_s, \rho_g$ , respectivement la masse volumique du sable et celle des graviers.

La masse totale des granulats est notée G.

## **CONCLUSION PARTIELLE**

Cette partie théorique nous permet de conclure que le béton est un matériau hétérogène dont le choix des composants est en fonction des critères qui lui sont recherchés. Ces critères sont essentiellement les résistances mécaniques, elles dépendent de la porosité et de la qualité et des composants.

Dans ce chapitre que nous venons d'achever, nous avons présenté les types d'essai qu'on a fait au laboratoire sur les granulats, les liants et les bétons (frais et durci). Il a été question de comprendre le but, le principe, l'importance ou l'intérêt en génie civil ainsi que le mode d'emploi de chaque essai pour avoir un béton qui répond aux attentes de son utilisateur. Il donne un aperçu sur la formulation du béton par la méthode de Dreux-Gorisse

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats issus des différents essais effectués et en tirer conclusion.

## **Chapitre 3 PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS**

### **INTRODUCTION**

Le béton est un matériau hétérogène formé de plusieurs constituants : granulats, liant, eau et éventuellement des adjuvants. Cette partie s'articule sur la présentation des propriétés de différents constituants du béton et l'interprétation de résultats obtenus après essais au laboratoire. Les essais ont été fait sur les bétons à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Nous avons confectionné deux types de béton dont celui ordinaire et celui avec une substitution partielle du ciment par la chaux.

### **III.1. CARACTERISTIQUES DES GRANULATS**

Nous avons utilisé comme granulats le gravier concassé ainsi que le sable provenant de Idjwi dont nous allons présenter, dans les paragraphes suivants, les propriétés nécessaires. La figure 3.1 illustre ces granulats.



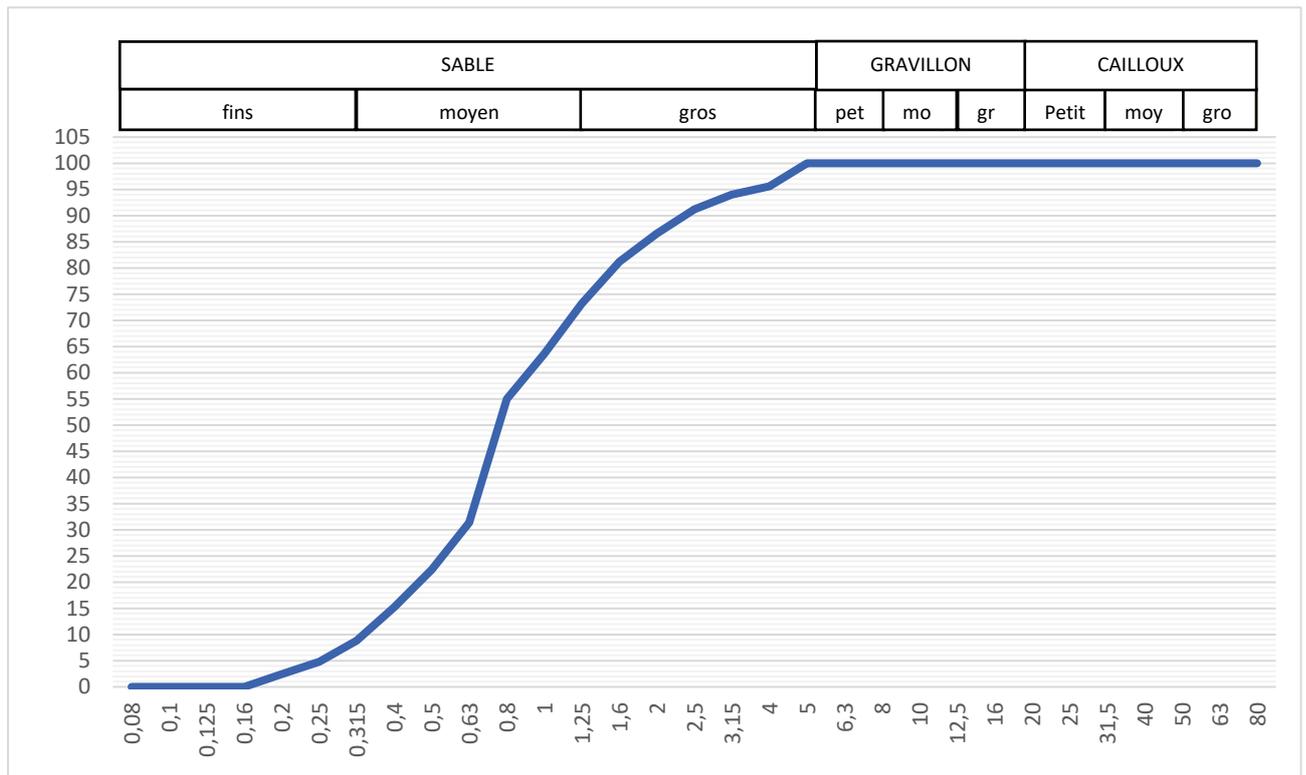
*Figure 3.1 Types des granulats utilisés*

#### **III.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

L'analyse granulométrique est l'essai qui nous permet de classer les types des granulats en fonction des diamètres. Pour y arriver deux essais d'analyse granulométrique ont été effectués dont l'analyse granulométrique du sable et celle des graviers.

##### **III.1.1.1. Analyse granulométrique du sable**

La Figure 3.2 présente le graphique des courbes granulométriques 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.



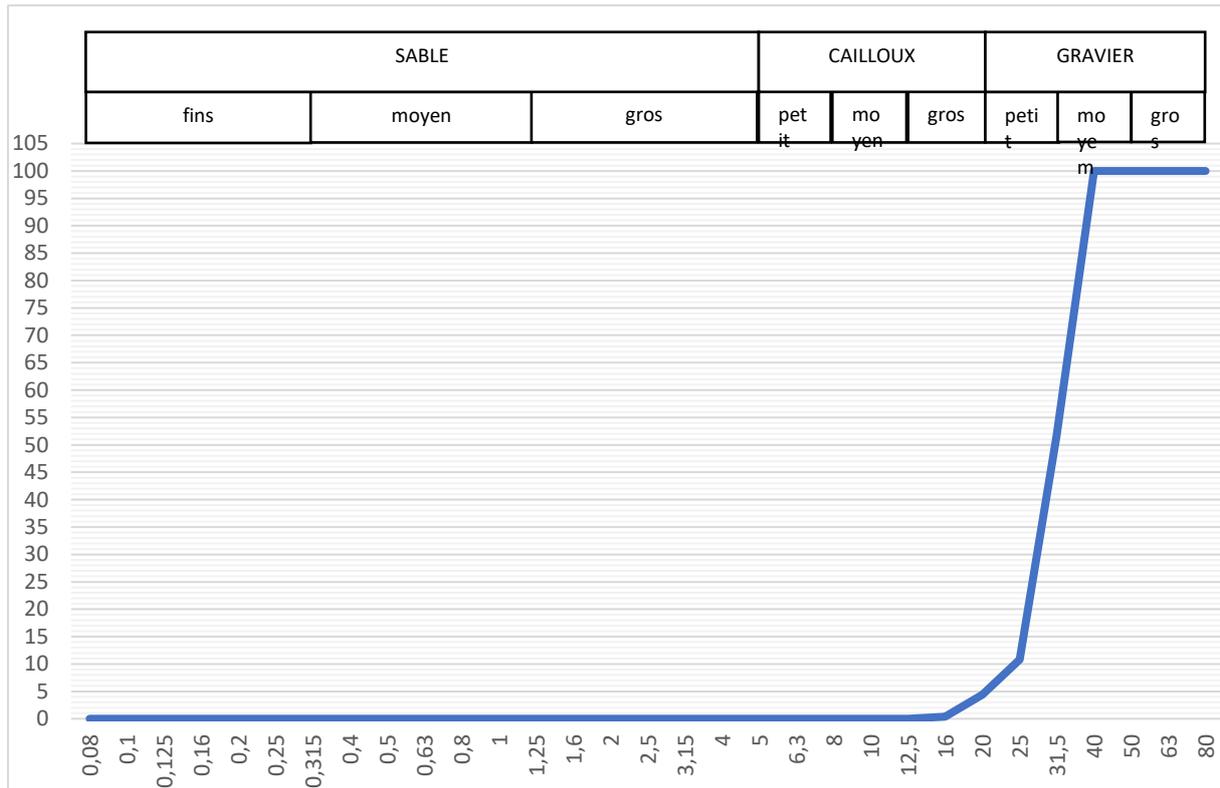
*Figure 3.2 Courbe granulométrique du sable*

Nous constatons que la courbe granulométrique du sable est continue et son allure montre que le sable présente une granulométrie plus ou moins admissible puisque la courbe est presque en S. D'où le sable n'est ni trop fin ni trop grossier. Il est donc bon pour la mise en œuvre du béton.

La valeur du coefficient d'uniformité ainsi que celle du coefficient de courbure sont respectivement :  $C_u = 2,77$  et  $C_z = 1,19$ . Comme  $C_u \geq 2$  : la granulométrie est étalée et  $C_z$  est compris entre 1 et 3, donc le granulat est bien gradué.

### III.1.1.2. Analyse granulométrique du gravier

La figure 3.3 quant à elle présente la composition granulométrique des graviers concassés. Avec comme abscisse les dimensions de tamis en mm et comme ordonnée les pourcentages des tamisâts.



*Figure 3.3 Courbe granulométrique du gravier*

L'allure de la courbe granulométrique des graviers montre que ceux-ci présentent une granulométrie plus ou moins préférentielle puisque la courbe est presque en S. Le gravier est donc approprié pour la confection du béton car la granulométrie est continue. Notre échantillon de gravier est constitué en majeure partie des graviers moyens et gros.

### III.1.2. MODULE DE FINESSE DU SABLE

Le module de finesse trouvé après calcul au laboratoire est de 2,95. Il est compris entre  $2,8 < M_f < 3,2$ . Notre sable est un sable grossier qui entre dans la mise en œuvre des ouvrages (bétons) à résistances élevées.

### III.1.3. DEGRE DE PROPRETE DU SABLE

Le tableau 3.1 représente le résultat de l'essai d'équivalent sable en vue de la détermination du degré de propreté de celui-ci.

*Tableau 3.1 Résultat de l'essai d'équivalent sable*

Mesure	Eprouvette N <sub>0</sub> 1	Eprouvette N <sub>0</sub> 2
h <sub>1</sub> (cm)	9,4	9,5
h <sub>1p</sub> (cm)	9	8,9

h(cm)	9,7	9,7
ESv%	96,9	97,9
Esp%	92,78	91,75
ES%	94,84	94,82
La Moyenne ES %	94,83	

Après les essais au laboratoire sur le degré de propreté du sable de Idjwi, on a eu comme résultat ES=94,83%. Nous constatons que le coefficient ES>80%. Le sable de Idjwi est très propre et par conséquent bon pour la formulation du béton tel qu'indiqué par la norme NF EN 933-8 (1999).

#### III.1.4. MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS

Les valeurs des masses volumiques absolues et apparentes des granulats sont présentées dans le Tableau 3.2.

*Tableau 3.2 Valeurs masses volumiques des granulats*

Désignation	Sable	Graviers
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,825
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,355	1,48

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

#### III.1.5. TAUX D'ABSORPTION

Le taux d'absorption était de 0,211. Cette valeur obtenue nous montre que les granulats utilisés ne contenaient pas vraiment des pores.

#### III.1.6. RESISTANCE A LA FRAGMENTATION

Avec  $M_i$  la masse initiale et  $M_r$  la masse de refus après passage au tamis 1,6mm et une classe granulaire choisie de l'ordre de  $\frac{10}{25}$ , on a donc utilisé 11 boulets. Avec  $M_i$  étant égal à 5000g et  $M_r$  étant égal à 3915g, on a :

$$LA = \frac{M_i - M_r}{M_i} \times 100 = \frac{5000g - 3915g}{5000g} \times 100 = 21,7 \quad (2.16)$$

Le tableau 3.3 donne l'appréciation des graviers selon le coefficient Los Angeles :

*Tableau 3.3 Appréciation de la valeur LA*

Valeur du coefficient LA	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 < LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 < LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre (mauvaise qualité)

Nous remarquons que notre gravier concassé se trouve dans la plage de granulat bon à moyen. Il peut donc servir pour la mise en œuvre du béton.

## III.2. CARACTERISTIQUE DES LIANTS

Le liant est un matériau indispensable pour la mise en œuvre du béton. Il permet, comme son nom l'indique, une liaison entre les différents composants du béton. Dans cette section nous étudions les caractéristiques (masse volumique et consistance) des liants que nous avons utilisés.

### III.2.1. Masse volumique absolue

Le tableau 3.4 présente les différentes valeurs de masse volumique du ciment et de la chaux utilisés. Nous avons constaté que la masse volumique de la chaux est inférieure à celle de ciment utilisé.

*Tableau 3.4 Masses volumiques des liants*

Types des liants	Masse volumique en g/cm <sup>3</sup>
Le ciment	2,99
La chaux	2,28

Nous remarquons que le ciment présente une masse volumique un peu plus élevée que celle de la chaux.

### III.2.2. Essai de consistance

Le tableau 3.5 présente les valeurs obtenues lors de détermination de l'essai de consistance des liants.

*Tableau 3.5 Résultats de l'essai de consistance*

Types des liants	Quantité d'eau en %
Le ciment	33
La chaux	60

Nous constatons que le liant de la chaux demande beaucoup plus d'eau que celui du ciment pour la mise en œuvre du béton.

### III.3. RESULTAT DE LA FORMULATION

Dans cette partie nous présentons les résultats de la formulation par la méthode de Greux-Gorisse, les résultats d'ouvrabilité et les résultats de la compression.

#### III.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.

##### III.3.1.1. Données de base

Le Tableau 3.6 présente les données de base qui ont servi dans notre étude.

*Tableau 3.6 Données de base*

Données de base	Béton
Resistance souhaitée	20MPa
Classe vraie du ciment	28MPa
Consistance désirée	6cm
Type de vibration	Normale
Dmax	31,5mm

##### III.3.1.2. Calcul des dosages en éléments divers

Dans cette section nous présentons les résultats du calcul des dosages en divers éléments tels que le dosage en liants et en eau, et enfin le dosage en granulats.

### A. Dosage en liants et en eau

La figure 2.1 a permis de trouver le dosage en liant et le dosage en eau pour 1m<sup>3</sup> de béton. Le dosage en eau a été corrigé à partir du Tableau 2.5. Les différentes valeurs obtenues sont reprises dans le Tableau 3.7 :

*Tableau 3.7 Dosage en liant et en eau*

Désignation	Valeurs
Dosage en ciment sans substitution partielle (kg/m <sup>3</sup> )	429,166
Dosage en ciment avec substitution partielle(kg/m3)	300,4162
Dosage en chaux (kg/m3)	128,7489
Dosage en eau (kg)	200,357

### B. Dosage en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide des proportions du sable et graviers obtenues à partir de la courbe de référence OAB. Dans le Tableau 3.8 sont repris les coordonnées de la courbe de référence.

*Tableau 3.8 Coordonnées de la courbe de référence OAB*

Désignations	Béton à graviers concassés		
	O	A	B
X (mm)	0	12,5	31,5
Y (%)	0	47,11	100

De ces coordonnées de la courbe de référence, il ressort les pourcentages des granulats qui sont, respectivement, 45% de sable et 55% de graviers.

Ces pourcentages sont exprimés en fonction de 100% des granulats. De ce fait les dosages massiques des granulats pour un m<sup>3</sup> de béton sont repris dans le Tableau 3.11.

*Tableau 3.9 Dosages massiques des granulats*

Désignation	Dosages massiques (kg/m3)
Graviers	1276,02
Sable	992,27

Il ressort du Tableau ci-dessus que pour un mètre cube de béton, le dosage en sable était de 992,27kg et le dosage en graviers de 1276,02kg pour le béton.

### III.4. CARACTERISTIQUE DU BETON

Dans cette section sont repris les différents résultats des essais effectués sur le béton d'étude notamment l'ouvrabilité, la masse volumique, ainsi que la résistance à la compression.

#### III.4.1. Résultat de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

Les différentes valeurs trouvées au cône d'Abrams sont représentées dans le tableau 3.10.

*Tableau 3.10 Résultats des affaissements*

Matériaux	Affaissement au cône d'Abrams
Béton à base du ciment	6,2
Béton à base du ciment et de la chaux	6

Nous avons remarqué que les bétons confectionnés sont plastiques car les valeurs de l'affaissement se trouvent dans la plage de 5 à 9. Ils sont donc destinés à la construction des semelles coffrées, murs de soutènement, planchers, dalles, poteaux, voiles, etc.

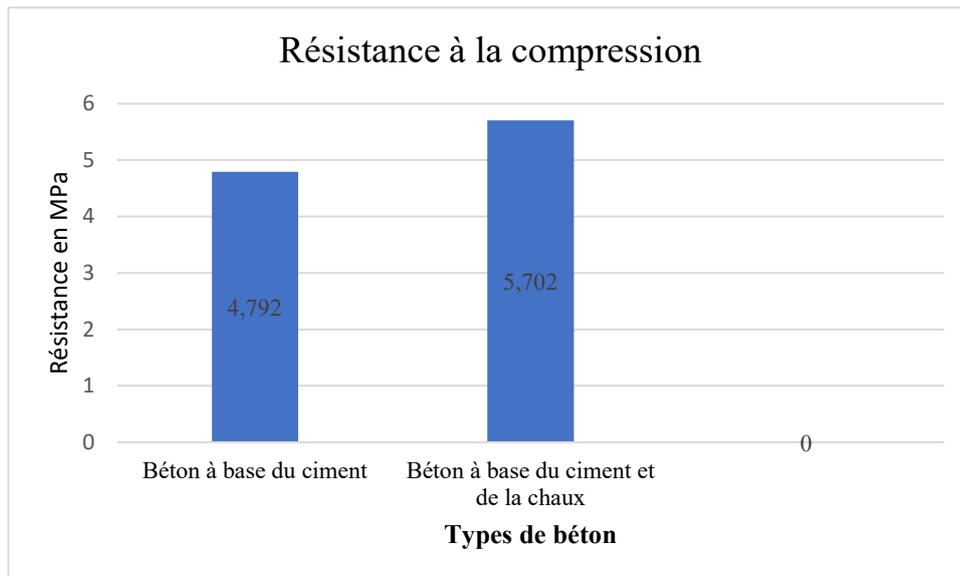
#### III.4.2. Résultat de la résistance à la compression

Les résultats des essais de compression obtenus par des manipulations relatives à l'écrasement des éprouvettes de béton 16\*32 cm à 28 jours sont repris dans le tableau 3.11, indiquant les différentes résistances pour chaque béton confectionné.

*Tableau 3.11 Résultats des essais de compression*

Composition	Resistance à la compression à 28 jours			Moyenne des résistance
	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	
Béton à base du ciment	5,007 MPa	4,504 MPa	4,886 MPa	4,792 MPa
Béton à base du ciment et de la chaux	6,867 MPa	5,517 MPa	4,723 MPa	5,702 MPa

La figure 3.4 présente l'histogramme qui montre l'allure des différentes valeurs résistance à la compression.



*Figure 3.4 Histogramme des résistances*

Nous remarquons que le béton fait sans substitution partielle du ciment a une résistance moyenne qui est supérieur de 4,55% à celle du béton fait avec une substitution partielle du ciment par la chaux.

### **CONCLUSION PARTIELLE**

Ce chapitre portant sur la présentation des constituants et l'interprétation des résultats a pu monter les différentes caractéristiques de constituants du béton, ainsi que celles du béton à son état frais comme à l'état durci.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude que nous avons effectuée sur le béton a été très intéressante du fait qu'elle nous a permis d'approfondir nos connaissances tant pratiques que théoriques et cela suite à la documentation et aux différents essais que nous avons fait sur les matériaux au laboratoire.

Partant de la norme NF EN 206-1 qui définit les différentes classes de béton, nous avons déterminé les différents paramètres à prendre en compte pour la formulation d'un béton durable et résistant. Nous avons aussi défini les caractéristiques auxquelles doivent répondre les matériaux qui interviennent dans la confection du béton.

C'est ainsi que notre travail étudie l'influence que peut avoir une substitution partielle du ciment à 30% par la chaux sur le comportement du béton qu'on utilise dans la construction des ouvrages à Goma étant donné que ceux-ci sont beaucoup plus sollicités en compression.

Partant de la disponibilité et les exigences de mise en œuvre prescrites par la norme NF EN 206-1, nous avons utilisé comme matériaux de confection : le ciment HIMA de classe de résistance 32,5 qui possède des caractéristiques physiques et chimiques appropriées, la chaux vive, les graviers concassés avec une granulométrie uniformément répartie ainsi que le sable de Idjwi qui présente des propriétés acceptables pour un bon béton de par son degré de propreté.

La résistance à la compression du béton, formulé totalement au ciment, obtenue au laboratoire a été en moyenne de 4,792 MPa tandis que celle du béton formulé par substitution partielle du ciment par la chaux a été de 5,702 MPa pour 3 éprouvettes de béton confectionnées pour chacun des deux cas précédents. A partir de ses résultats nous avons constaté que la résistance en compression du béton formulé par substitution partielle du ciment à 30% par la chaux est élevée à celle du béton fait totalement au liant de ciment. Sur base de cette expérience, nous nous sommes permis de conclure qu'il serait mieux d'utiliser, dans nos constructions modernes et plus particulièrement celles soumises à un effort de compression, un béton fait au ciment et à la chaux car celui-ci est résistant et bénéfique sur le plan économique du fait que la chaux coûte un peu plus moins chère que le ciment.

Toutes fois nous restons ouvert à toutes informations, suggestions, critiques et remarques qui pourraient faire avancer de loin ce travail et la science elle-même tout en espérant que dans les jours suivants des nombreuses études et recherches resteront notre voix à tous dans l'unique but de garantir le bien-être de l'homme et de son environnement.

## Bibliographie

- [1] A. ALINABIWE, «Cours de physique et technologie du béton,» Goma, 2021.
- [2] A. GRAYMONT, «Avantages du mortier de ciment et de chaux,» Richmond, Paris, 2016.
- [3] CIMBETON, «La normalisation française de ciment,» Paris, 1997.
- [4] F. CHIZA, «ETUDE DE L'INFLUENCE DU MELANGE DES CIMENTS DE CLASSES VRAIES DIFFERENTES SUR LA RESISTANCE DU BETON,» Goma, 2022.
- [5] B. Jackson, «Etude du comportement de la résistance en compression du béton suite à la variation unimodale quantitative de ses composantes primaires,» Goma, 2020.
- [6] F. NGAPGUE, «Mécanique des sols et des roches,» Goma, 2021.
- [7] M. Saddika, Matériaux et ouvrages de Génie civil, Bouira, 2014.
- [8] G. Dreux et F. Jean , Nouveau guide du béton et de ses constituants, EYROLLES, 2006.
- [9] A. Mokhtar, Influences des poussières (fines d'argile et de chaux) sur la résistance du béton ordinaire, M'SILA, 2017.
- [10] D. Georges, Composition des bétons, Eyrolles, 2008.
- [11] S. MANENO, Etude et formulation théorique d'un béton architectonique des granulats courants, Goma, 2012.
- [12] L. David, Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre, Bordeaux, 2013.
- [13] M. Grace, Laboratoire des matériaux, Goma, 2021.
- [14] Cours-ETS, «Caractéristiques fondamentales du béton,» 2015.

# ANNEXES

**ANNEXE I : PROPRIETE DU SABLE****1. Masse volumique absolue**

Essai	Essai 1	Essai 2
Volume d'eau en ml (V1)	150	151
Volume d'eau + granulats en ml (V2)	190	190
Masse sèche de granulats en g	100	100
Masse volumique en $g/cm^3$	2,5	2,56
Moyenne	2,51	

**2. Masse volumique apparente**

Essai	Essai 1	Essai 2
Volume du moule en $cm^3$	911,06	911,06
Masse du moule(M1)	3965	3965
Masse du moule + granulats (M2)	5180	5225
Masse volumique apparente en $g/cm^3$	1,33	1,38
Moyenne	1,355	

**3. Equivalent sable**

Mesure	Eprouvette N°1	Eprouvette N°2
h1 (cm)	9,4	9,5
h1p(cm)	9	8,9
h(cm)	9,7	9,7

ESv%	96,9	97,9
Esp%	92,78	91,75
ES%	94,84	94,82
La Moyenne ES %	94,83	

#### 4. Analyse granulométrique du sable

N <sup>o</sup> TAMIS		OUVERTURE (mm)		REFUS CUMULES		TAMISAT	REMARQUE
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(%)	(%)	
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	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	

## ANNEXE II : PROPRIETE DU GRAVIER CONCASSE

### 1. Masse volumique absolue du gravier

Mesure	Premier essai	Deuxième essai
Volume d'eau en ml	400	600
Volume d'eau + granulats en g	510	730
Masse sèche granulats en g	300	384,3
Masse volumique en g/cm <sup>3</sup>	2,72	2,93
Moyenne des résultats	2,825	

### 2. Masse volumique apparente du gravier

Mesure	Premier essai	Deuxième essai
Vol du moule en cm <sup>3</sup>	913,35	911,06
Masse du moule en g	3965	3965
Masse du moule + granulats	5315	5236
Masse volumique apparente en g/cm <sup>3</sup>	1,47	1,49
Moyenne des résultats	1,48	

### 3. Analyse granulométrique du gravier

N <sub>0</sub> TAMIS		OUVERTURE (mm)		REFUS CUMULES		TAMISAT	REMARQUE
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(%)	(%)	
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	1205	48,2	51,8	
1"	45	25,4	25	2230	89,2	10,8	
3/4"	44	19,1	20	2390	95,6	4,4	
2/3"	43	16,9	16	2490	99,6	0,4	
1/2"	42	12,7	12,5	2500	100	0	
3/8"	41	9,52	10	2500	100	0	
1/3"	40	7,93	8	2500	100	0	
1/4"	39	6,35	6,3	2500	100	0	
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	

### ANNEXES III : PROPRIETES DES LIANTS

#### 1. Consistance du ciment

Masse du ciment en g	Quantité d'eau en %	Hauteur d en mm
500	25	0
500	26	0,5
500	27	1
500	29	3
500	31	5
500	33	6

#### 2. Consistance de la chaux

Masse de la chaux en g	Quantité d'eau en %	Hauteur d en mm
500	25	0
500	26	0
500	29	0
500	32	0

500	36	1
500	40	1,5
500	44	2
500	48	3,5
500	52	4
500	55	4,5
500	57	5
500	60	7

#### ANNEXES IV : COMPOSITION DU BETON

##### 1. Données nécessaires

Données de base	Béton
Resistance souhaitée	20MPa
Classe vraie du ciment	28MPa
Consistance désirée	6
Type de vibration	Normale
Dmax	31,5mm

##### *Dosage en eau et en liant :*

$f_{cm} = 1,15 \times f_{c28} = 1,15 \times 20 = 23 \text{Mpa}$ . Vue la dispersion et l'écart quadratique les résistances à 28 jours sont majorées à 15%.

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

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

$$\text{Donc, } \frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \cdot \sigma_{c28}} + 0,5$$

$$\frac{C}{E} = \frac{23 \text{Mpa}}{0,5 \cdot 28} + 0,5$$

$$\frac{C}{E} = 2,34$$

En positionnant le rapport  $\frac{C}{E} = 2,34$  sur la figure qui, en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams  $A=6\text{mm}$ , permet d'avoir le dosage en ciment qui est compris entre  $400\text{kg}$  et  $400\text{kg}+\text{fluidifiant}=429,166$ .

Dosage	Rapport C/E
400 kg	2,34
X	2,142
400 + fluide	2,22

La règle de trois simple va nous aider à trouver la quantité à augmenter au dosage  $400 \text{ Kg/cm}^3$ .  
Ainsi on aura,  $12\text{mm} \rightarrow 50 \text{ Kg/m}^3$

$7\text{mm} \rightarrow ?$

Sachant que  $1\text{mm} \rightarrow \frac{50}{12} = 4,1666$

D'où  $7\text{mm} = 4,1666 \times 7 = 29,166$  qui est la valeur nette à ajouter au dosage  $400 \text{ Kg/m}^3$

Nous avons donc la quantité de liant  $C=429,166 \text{ kg/m}^3$ .

Vue que notre ciment sera substitué à 30% par la chaux, nous allons donc multiplier la quantité de liant C par 0,3 pour avoir la quantité exacte de la chaux Ch ensuite déduire la quantité réelle du ciment Cm.

On a:  $Ch = C \times 0,3 = 429,166\text{kg/m}^3 \times 0,3 = 128,7498 \text{ kg/cm}^3$

Et  $Cm = C - Ch = 429,166\text{kg/cm}^3 - 128,7498\text{kg/cm}^3 = 300,4162\text{kg/cm}^3$ .

Calculons alors le dosage en eau à l'aide du rapport  $\frac{C}{E}$ .

Ce qui fait que  $E=200,357 \text{ kg/m}^3$

Une éventuelle correction du dosage en eau est prévue en fonction du diamètre maximal Dmax.  
Ici elle vaut -4%.

Ce qui fait qu'au final  $E=192,342 \text{ kg/m}^3$

## 2. Détermination du dosage en granulat

### A. Calcul de la ligne de partage et de brisure

La ligne de brisure passe par les points P1 et P2.

P1 : intersection de la courbe granulométrique du sable au tamisât de 95% du sable.

P2 : intersection de la courbe granulométrique de graviers au tamisât de 5% de gravier.

La ligne de partage passant par trois points sur le graphique les courbes granulométriques combinées du sable et de graviers : O (0,0), A (XA, YA) et B (40,100).

Avec :

XA : milieu du segment quittant de 5mm à Dmax ;

XA= 12,5 mm lit graphiquement

YA=50 -  $\sqrt{D}$  + K

Comme la valeur du dosage en ciment ne se trouve pas dans le tableau, nous allons interpoler :

Matériaux	Dosage en ciment en Kg/m <sup>3</sup>	K
Graviers	400	0

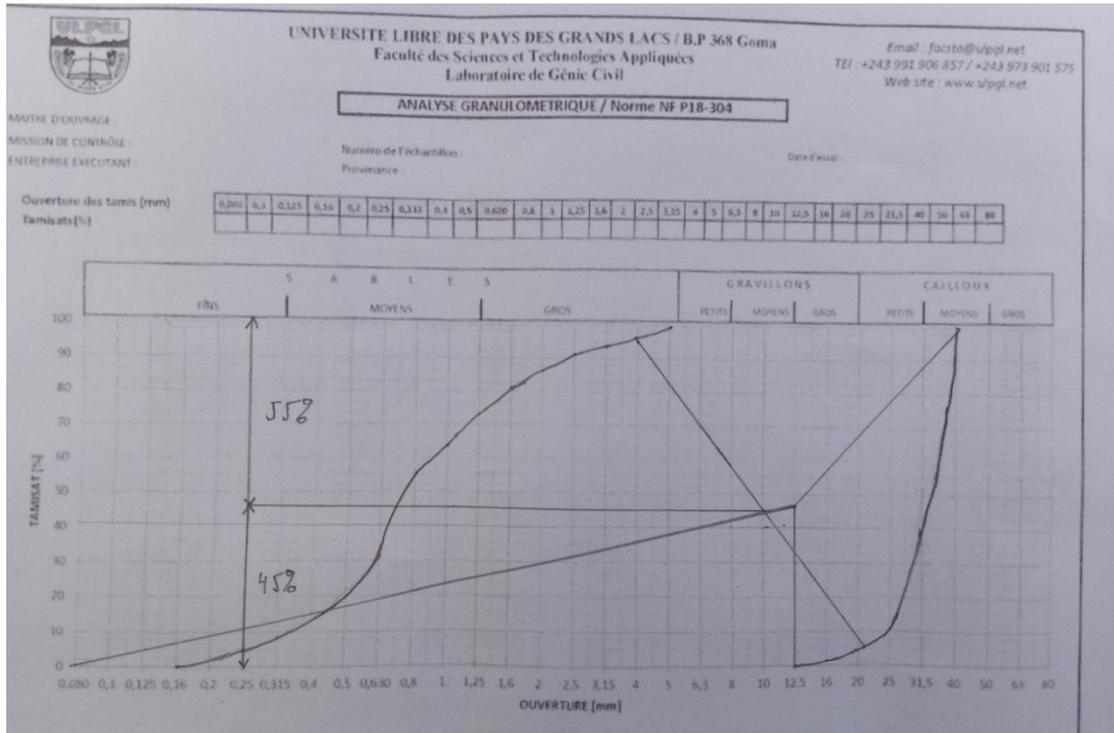
Le module de finesse étant fort (Mf =2,95), une correction supplémentaire sera apportée de façon à révéler le point A.

Ks= 6Mf-15 =2,7

Matériaux	Module de finesse	Ks	K
Graviers	2,95	2,7	2,7

Ce qui fait que :

$$YA=50 - \sqrt{31,5} + K =47,11$$



On aura donc la quantité de gravier en 55% et celle du sable en 45%.

### B. Calcul du volume des granulats

Dans le tableau ci-dessous, nous pouvons lire la valeur du coefficient de compacité  $\gamma$  pour notre béton plastique à vibration normale, dont le plus gros diamètre de granulats  $D_{max}$  vaut 31,5mm et qui a le dosage en liant  $C=429,166 \text{ kg/m}^3$ .

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité $\gamma$						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840

	Vibration puissante	0,77 5	0,805	0,820	0,83 0	0,835	0,84 0	0,84 5
Ferme	Vibration faible	0,77 5	0,805	0,820	0,83 0	0,835	0,84 5	0,84 5
	Vibration normale	0,78 0	0,810	0,825	0,83 5	0,840	0,85 0	0,85 0
	Vibration puissante	0,78 5	0,815	0,830	0,84 0	0,845	0,85 5	0,85 5

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

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

Vue qu'on un sable et un gravier concassé, la correction sera telle que :

$$\gamma_{corrigé} = \gamma - 0,03$$

$$\gamma_{corrigé} = 0,830 - 0,03$$

$$\gamma_{corrigé} = 0,8$$

Ainsi donc :

$$V_{granulats} = \gamma - \frac{C}{\rho_c}$$

Avec :

$\rho_c$  : masse volumique du ciment

C : le dosage en liant

Matériaux	Volume des granulats en $m^3$
Graviers concassés	0,8198

La composition volumique des granulats est donnée par la formule :

$$V_s = V_{granulats} \cdot \%S$$

$$V_g = V_{granulats} \cdot \%G$$

Avec :

$V_s$  : le volume sable

$V_g$  : le volume de graviers

On a donc :

Matériaux	Sable en Kg /m <sup>3</sup>	Gravier en Kg /m <sup>3</sup>	Ciment en Kg /m <sup>3</sup>	Eau en Kg /m <sup>3</sup>	Chaux en Kg /m <sup>3</sup>
Béton à base de graviers concassés	922,27	1276,02	300,4162	192,342	128,7498

Ainsi la masse volumique vaut :

$$\rho_{\text{béton}} = S + G + Cm + E + Ch$$

$$\rho_{\text{béton}} = 2\,819,798 \text{ kg/m}^3$$

Avec : S = quantité en sable

G = quantité en gravier

Cm = quantité en ciment

E = quantité en eau de gâchage

Ch = quantité en chaux