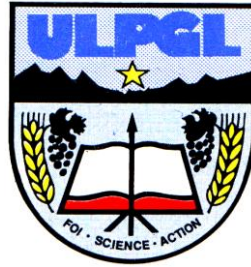


**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS
LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA PRE-
SATURATION DES GRANULATS SUR LES
PROPRIETES DU BETON**

Par **KILIBANGA DUKU Keren**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur Civil

Option : Structures et ouvrages d'art

Directeur : Dr. Ir. Ally ALINABIWE

ANNEE ACADEMIQUE 2023 - 2024

EPIGRAPHE

« Les auteurs les plus originaux d'aujourd'hui ne sont pas ceux qui apportent du nouveau, mais ceux qui savent dire des choses comme si elles n'avaient jamais été dites avant eux »

GOETHE

DEDICACE

A mes précieux parents KILIBANGA LESSYE Aimé et KAYANI MAPENDANO Louise

KILIBANGA DUKU Keren

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont droit premièrement au Créateur de toute chose, Le DIEU Tout Puissant qui nous a soutenus en toute chose.

Nos remerciements s'adressent au Docteur Ingénieur Ally ALINABIWE qui malgré ses multiples taches et occupations a dirigé ce présent travail avec grande implication.

Nos remerciements s'adressent également à tout le corps enseignant de l'ULPGL, particulièrement ceux de la faculté des sciences et technologies appliquées qui s'est engagé âme et conscience pour assurer notre bonne formation durant le cursus académique.

Nos remerciements à nos frères KILIBANGA Glodi, KILIBANGA Sanctifié, Séraphin MAHASANO et sœurs KILIBANGA Pascaline, Win MIRUHO, Vanessa MIRUHO

Nos remerciements à notre cher NAMA Romuald pour son soutien particulier.

Nos remerciements à nos compagnons de lutte avec qui nous avons partagé des moments de peine et de joie tout au long de notre cursus académique MAYELE, FURAHA, CIRIGIRI, KAKASI, FEZA.

Nos remerciements s'adressent enfin à toutes les personnes qui nous ont soutenus de diverses manières pour la matérialisation de ce travail, veuillez tous trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

RESUME

Le béton est un matériau composite, constitué des granulats, liants, eau et adjuvants. Les granulats qui entrent dans la constitution des bétons exigent pour leur meilleure utilisation, une connaissance rigoureuse de leurs caractéristiques car, quoi que paraissant semblables, ils diffèrent suivant la nature des roches mères desquelles ils proviennent, la forme de leurs particules, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Le problème observé avec les granulats couramment utilisés à Goma est que ces granulats présentent des nombreux pores si bien que, suivant leurs conditions de stockage, des quantités d'eau peuvent s'y retrouver piégées avant le malaxage lors de la confection des bétons. De plus, ces granulats peuvent absorber des quantités d'eau importantes pendant le malaxage. Par ailleurs, au niveau des calculs des quantités des constituants qui doivent entrer dans la confection du béton, la quantité d'eau efficace trouvée est celle correspondant au mélange au moment du malaxage et ne tient pas compte de la quantité d'eau contenue au préalable dans les granulats. Cette étude vise à évaluer l'influence de cette quantité d'eau afin qu'elle soit prise en compte lors de la quantification de l'eau efficace trouvée en vue de la confection des bétons où le dosage des constituants est bien respecté. Pour se faire, il a été nécessaire de formuler et confectionner des bétons plastiques en variant l'état hydrique des granulats. Les résultats montrent que l'affaissement du béton dont les graviers sont pré-saturés et le sable sec croît de 40%, celui dont les graviers sont secs et le sable pré-saturé croît de 52% et celui pour lequel les graviers et le sable sont pré-saturés croît de 70%, par rapport à l'affaissement du béton dont les granulats sont secs. Il s'est également observé que la résistance à la compression à 28 jours du béton décroît de 20% lorsque les graviers sont secs et le sable pré-saturé; elle décroît de 28% lorsque les graviers sont pré-saturés et le sable sec et lorsque les graviers et le sable sont pré-saturés, la résistance à la compression décroît de 26%.

Ces résultats nous indiquent que la pré-saturation des granulats peut influencer positivement la rhéologie du béton cependant au préjudice de la résistance à la compression du béton.

ABSTRACT

Concrete is a composite material consisting of aggregates, binders, water, and admixtures. Aggregates, which are essential components of concrete, require a thorough understanding of their characteristics due to their varying properties based on the parent rock, particle shape, chemical and mineralogical composition, and physical and mechanical properties. A common problem with aggregates used in Goma is their high porosity, which can lead to water being trapped within the pores before mixing during concrete production, depending on storage conditions. Additionally, these aggregates can absorb significant amounts of water during mixing. However, in concrete mix design calculations, the effective water quantity considered is that present at the time of mixing and does not account for the water already contained within the aggregates. This study aims to evaluate the influence of this additional water quantity so that it can be considered when determining the effective water content for producing high-quality concrete with accurate constituent proportions.

To achieve this, plastic concretes were formulated and produced with varying aggregate moisture conditions. The results showed that the slump of concrete with pre-saturated gravel and dry sand increased by 40%, while that with dry gravel and pre-saturated sand increased by 52%, and the slump for concrete with both pre-saturated gravel and sand increased by 70%, compared to concrete with dry aggregates. Additionally, it was observed that the 28-day compressive strength of concrete decreased by 20% when the gravel was dry and the sand was pre-saturated; it decreased by 28% when the gravel was pre-saturated and the sand was dry, and when both the gravel and sand were pre-saturated, the compressive strength decreased by 26%.

These results show us that pre-saturation of the aggregates can positively influence the rheology of concrete, but at the expense of the compressive strength of the concrete.

TABLE DES MATIERES

EPIGRAPHE.....	i
DEDICACE	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME	iv
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
1. INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 GENERALITES.....	4
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 GENERALITES SUR LE BETON.....	4
1.3 LES CONSTITUANTS DU BETON	5
1.3.1 Les granulats	5
1.3.2 Les liants et les adjuvants	11
1.3.3 L'eau de gâchage	14
1.4 EXIGENCES SUR LES CONSTITUANTS	16
1.4.1 Choix des granulats.....	16
1.4.2 Choix du ciment.....	16
1.5 CLASSIFICATION DES BETONS	17
1.6 PROPRIETES OU CARACTERISTIQUES DU BETON	17
1.6.1 Caractéristiques du béton à l'état frais.....	17

1.6.2	Caractéristiques du béton à l'état durci.....	19
1.7	LES METHODES DE FORMULATION DU BETON	20
1.8	LES DOMAINES D'UTILISATION DU BETON	21
1.8.1	Utilisation du béton dans le bâtiment.....	21
1.8.2	Utilisation du béton dans les travaux publics [19].....	22
1.9	QUELQUES PATHOLOGIES DU BETON	23
1.9.1	Les pathologies du béton à l'état frais	23
1.9.2	Les pathologies du béton à l'état durci	23
1.9.3	Prévention des pathologies	25
1.9.4	Traitement des pathologies	26
1.10	CONCLUSION PARTIELLE	27
CHAPITRE 2 MATERIAUX ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE		28
2.1	LES MATERIAUX UTILISES	28
2.1.1	Les granulats	29
2.1.2	Le ciment	31
2.1.3	L'eau de gâchage	31
2.2	DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	32
2.2.1	Caractéristiques des granulats.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2	Echantillonnage [21].....	32
2.3	LES ESSAIS SUR LES MATERIAUX	33
2.3.1	Essais sur les granulats.....	33
2.3.2	Essais sur le ciment.....	45
2.4	METHODE DE FORMULATION DU BETON [10].....	46
2.4.1	Méthode de Dreux Gorisse [14].....	47
2.5	CONFECTION DES EPROUVETTES	58
2.6	ESSAI SUR LE BETON	60
2.6.1	Essai sur le béton frais	60
2.6.2	Essai sur le béton durci	60

2.7	DETERMINATION DE L'INFLUENCE DE LA PRE-SATURATION DES GRANULATS	62
2.7.1	Détermination de l'influence de la pré-saturation sur la rhéologie du béton.....	62
2.7.2	Détermination de l'influence du taux d'absorption sur la résistance mécanique du béton	63
2.8	CONCLUSION PARTIELLE.....	63
CHAPITRE 3 PRESENTATION, ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS		64
3.1	INTRODUCTION.....	64
3.2	CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS	64
3.2.1	Caractéristiques des granulats.....	64
3.2.2	Caractéristiques du ciment.....	67
3.3	DOSAGE DES BETONS	68
3.3.1	Détermination des dosages des constituants	69
3.4	CARACTERISTIQUES DES BETONS.....	71
3.4.1	Ouvrabilité des bétons.....	71
3.4.2	Résistances des bétons	74
3.4.3	Masses volumiques des bétons	74
3.5	INFLUENCE DE LA PRESATURATION DES GRANULATS SUR LES CARACTERISTIQUE DU BETON	76
3.5.1	Rhéologie du béton	76
3.5.2	Densité	78
3.5.3	Résistance mécanique	79
3.6	Conclusion partielle.....	79
CONCLUSION GENERALE		81
BIBLIOGRAPHIE.....		83
ANNEXES.....		87

LISTE DES ABREVIATIONS

Lettres grecques

γ : Coefficient de compacité du béton

$\sigma'c$: Classe vraie du ciment

ρ : Masse volumique des granulats

ρ_c : Masse volumique du ciment

Abréviations

A : Affaissement

Abs : Absorption des granulats

C : Dosage en ciment

C/E : Rapport ciment sur eau

d : Diamètre du plus petit granulat

D ou Dmax : Diamètre du plus gros granulat

E : Dosage en eau

ES : Equivalent de sable

fc28 : Résistance minimale en compression à 28jours

fcm : Résistance moyenne en compression à 28jours

G : Coefficient granulaire

gs : béton confectionné avec sable et graviers pré-saturés

Gs : béton confectionné avec sable pré-saturé et graviers secs

GS : béton confectionné avec sable et graviers secs

Kg : Kilogramme

KN : Kilonewton

Mf	:	Module de finesse
MG	:	Masse des graviers
Mpa	:	Méga pascal
Ms	:	Masse de sable
Mg	:	Masse des graviers
N	:	Newton
Sg	:	béton confectionné avec sable sec et graviers pré-saturés
Vg	:	Volume des graviers
Vs	:	Volume de sable
Vtb	:	Volume total du béton
Wg	:	teneur en eau des graviers
Ws	:	Teneur en eau de sable

Symbole

%	:	Pourcentage
---	---	-------------

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 2.1 Classe granulaire</i>	34
<i>Tableau 2.2 Evaluation du sable en fonction du module de finesse</i>	35
<i>Tableau 2.3 Caractérisation des granulats suivant la masse volumique</i>	38
<i>Tableau 2.4 Interprétation des résultats de l'équivalent de sable [7]</i>	41
<i>Tableau 2.5 Usage fréquents des bétons en fonction de la valeur de l'affaissement</i>	48
<i>Tableau 2.6 Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments</i>	49
<i>Tableau 2.7 Coefficient granulaire en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_max</i>	51
<i>Tableau 2.8 K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment</i>	54
<i>Tableau 2.9 Les valeurs du coefficient de compacité en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats.</i>	56
<i>Tableau 3.1 Masses volumiques des granulats</i>	64
<i>Tableau 3.2 Résultat du degré de propreté du sable roulé d'Idjwi</i>	66
<i>Tableau 3.3 Résultats du taux d'absorption des granulats</i>	66
<i>Tableau 3.4 Résultats de la porosité des granulats</i>	67
<i>Tableau 3.5 Résultats d'indice des vides des granulats</i>	67
<i>Tableau 3.6 Données de la formulation du béton</i>	68
<i>Tableau 3.7 Dosage en ciment et en eau pour 1m³</i>	69
<i>Tableau 3.8 Dosage massique des granulats pour 1 m³ de béton</i>	70
<i>Tableau 3.9 Composition réduite des constituants pour trois éprouvettes.</i>	71
<i>Tableau 3.10 Valeur d'affaissement des bétons</i>	72
<i>Tableau 3.11 Evaluation du dosage en eau réelle</i>	73
<i>Tableau 3.12 Masses volumiques des bétons</i>	75

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 Gravier concassés</i>	29
<i>Figure 2 Sable roulé</i>	30
<i>Figure 3 Ciment Cimerwa</i>	31
<i>Figure 4 Echantillonnage par quartage</i>	32
<i>Figure 5 Essai de l'équivalent de sable</i>	41
<i>Figure 6 Abaque permettant la détermination de Copt</i>	52
<i>Figure 7 Analyse granulométrique des granulats</i>	65
<i>Figure 8 Tracé de la courbe granulaire de référence</i>	70
<i>Figure 9 Dosage en eau réelle et affaissement</i>	73
<i>Figure 10 Résistance à la compression à 28jours des bétons</i>	74
<i>Figure 11 Masse volumique des bétons</i>	75
<i>Figure 12 Evolution d'affaissement pour le Gs</i>	76
<i>Figure 13 Evolution d'affaissement pour Sg</i>	77
<i>Figure 14 Evolution d'affaissement pour gs</i>	78
<i>Figure 15 Densité des bétons</i>	79

1. INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau composite, constitué des granulats, liants, eau et éventuellement des adjuvants. Les granulats qui entrent dans la constitution des bétons occupent environ les $\frac{3}{4}$ du volume de ce dernier et exigent pour leurs meilleures utilisations, une connaissance rigoureuse de leurs caractéristiques étant donné que, même semblables à l'œil nu, ils diffèrent suivant la nature des roches mères desquelles ils proviennent, la forme de leurs particules, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs comportements physiques et mécaniques [1].

Dans la formulation du béton, les granulats sont considérés comme compacts avec une absorption d'eau inférieure à 1%. Cependant, il est quasiment difficile de trouver les granulats d'une telle qualité. Les producteurs de béton sont donc désormais obligés d'utiliser les granulats ayant une absorption supérieure [2].

Les différentes éruptions volcaniques antérieures et récentes observées dans la ville de Goma y ont réduit une grande partie des sols meubles en déversant à la surface du sol un massif des roches duquel, après fragmentation par des moyens manuels et mécaniques résultent des pierres basaltiques. Ce sont des pierres qui ont connu un refroidissement rapide à la surface du sol et sont facilement utilisés dans la confection des bétons dans la ville de Goma comme graviers [3].

Le problème observé avec ces granulats d'origine volcanique de Goma (concassés) est qu'étant donné que leurs minéraux n'ont pas eu le temps de cristalliser [3], ces granulats présentent des nombreux pores si bien qu'avant même la confection des bétons, des quantités d'eau peuvent se retrouver piégées à l'intérieure de ces granulats d'autant plus qu'ils sont généralement stockés à ciel ouvert étant donc exposés aux intempéries, aux eaux ruisselantes, etc. Or au niveau des calculs des quantités des constituants qui doivent entrer dans la confection du béton, la quantité d'eau efficace trouvée est celle correspondant au mélange au moment du malaxage et ne tient pas compte de la quantité d'eau contenue au préalable dans les granulats.

Ainsi donc, il s'observe qu'au niveau de la mise en œuvre du béton, des ajustements du dosage en eau en fonction de l'affaissement recherché au risque de ne pas atteindre l'optimum recherché. En effet, une fois en excès ou en deçà, l'eau influence négativement les propriétés mécaniques du béton. D'où la nécessité d'étudier l'influence de l'absorption d'eau sur les propriétés du béton. Car l'eau utilisée doit permettre la transformation du ciment en liant, c'est-à-dire une bonne hydratation du ciment ; une meilleure ouvrabilité et permettre d'atteindre une bonne résistance et ainsi une durabilité du béton.

Plusieurs travaux de recherche ont eu à porter sur l'influence du taux d'absorption d'eau sur les propriétés du béton, notamment :

Ally ALINABIWE [2], travaillant sur l'influence du taux d'absorption d'eau des granulats sur les propriétés du béton a pu montrer que le dosage en eau équivaut dans le béton binaire, à la sommation de $77\pm 1\%$ du dosage en eau calculé par la méthode de Dreux-Gorisse, $57\pm 1\%$ de l'absorption du sable sec et 100% d'absorption des graviers secs. Dans le béton ternaire, celui-ci mis en évidence que le dosage peut s'exprimer par la sommation de $83\pm 2\%$ du dosage en eau calculé par la méthode de Dreux-Gorisse, $60\pm 4\%$ de l'absorption du sable sec et 100% d'absorption des graviers secs dans les bétons ternaires.

(Chérif BISHWEKA et al.) [3], ayant réalisé l'Etude du coefficient d'absorption d'eau des granulats d'origine volcanique de Goma et son influence dans la formulation du béton a démontré que les granulats d'origines volcaniques, particulièrement ceux de Goma, présentent une proportion non négligeable des vides, ceci étant, ils sont à même de retenir une quantité d'eau importante d'où la nécessité d'en tenir compte lors de la confection des bétons et cela suivant les proportions décrites dans la dite étude.

Habeeb SOLIHU ABDULWASIU [4], Ayant étudié l'influence de la pré-saturation des graviers sur les propriétés mécaniques du béton a montré que la maniabilité du béton lorsque les granulats sont pré-saturés est plus élevée que lorsque les granulats naturels sont secs tandis que les résistances à la compression des bétons à différentes périodes de durcissement des granulats pré-saturés sont inférieures à celles dont les granulats sont secs. Et qu'ainsi, la pré-

saturation des granulats a un impact négatif sur la résistance du béton. Une autre recherche, [5] ayant porté sur l'Etude de l'influence du taux d'absorption du granulat sur le dosage en eau du béton a démontré que l'atteinte de l'affaissement recherché nécessite une augmentation du dosage en eau de 54,37% de l'eau calculée lorsque les granulats sont secs ; 0% pour les granulats humides, 30% pour le sable sec et gravier humide et 20% pour les graviers humides et sable sec.

Différemment de ceux-ci, le présent travail a pour objectif d'évaluer l'influence de la pré-saturation des granulats utilisés dans la ville de Goma sur les propriétés de bétons. Pour y arriver, il sera nécessaire de :

- Caractériser les matières premières,
- Formuler les différents bétons dont celui à granulats secs, à granulats secs et humides ainsi que celui à granulats humides.
- Comparer les caractéristiques des bétons susmentionnés afin de dégager l'influence de la pré-saturation des granulats sur les propriétés du béton.

La présente étude, étant expérimentale, les essais de laboratoire se sont déroulés dans le laboratoire de Génie Civil de l'Université des Pays des Grands Lacs où les différents essais se sont déroulés conformément aux normes en vigueur.

Outre l'introduction et la conclusion, le présent travail est subdivisé en trois chapitres. Le premier chapitre aborde les généralités sur le béton ainsi que sur ses constituants. Le deuxième chapitre présente la méthodologie de recherche où sont présentées la nature et l'origine des constituants, leur caractérisation, la formulation du béton et la caractérisation du béton en étude. Et enfin le troisième chapitre qui donne la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats.

CHAPITRE 1 GENERALITES

1.1 INTRODUCTION

Le béton, matériau composite constitué de ciment, d'eau, de granulats et éventuellement d'adjuvants, s'impose comme l'un des matériaux les plus utilisés dans la construction des différentes structures en Génie Civil.

Ce premier chapitre s'attardera sur les généralités du béton, explorant les constituants et leurs caractéristiques, types, classification, critère de choix; la classification et la désignation des bétons ; les propriétés du béton ; les méthodes de formulation ; le domaine d'utilisation ; les types des bétons et survolera les différents types des pathologies du béton ainsi que leurs traitements.

1.2 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.

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 utilisé 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 [6].

En effet, il est important d'en connaître non seulement l'utilité et les propriétés physiques comme mécaniques mais aussi la composition, les caractéristiques et celles de ses constituants

en vue de sa bonne formulation et sa bonne utilisation pour la construction des ouvrages solides, durables et économiques.

1.3 LES CONSTITUANTS DU BETON

1.3.1 Les granulats

On appelle **granulat** un ensemble des grains d'origine minérale, de dimension comprise entre 0 et 125mm, provenant des roches meubles, massives, de minerais ou de leurs transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie [7].

Les granulats constituent le squelette du béton et représente 80% du poids total du béton. Cependant, ils doivent satisfaire à certaines exigences pour être utilisés dans le béton. Ils assurent une bonne résistance et une durabilité appropriée au béton.

La nature des gisements conditionne les propriétés intrinsèques (résistance, porosité, etc.) des granulats tandis que les caractéristiques géométriques (granularité, forme, etc.) et de propreté sont fonction de son processus d'élaboration.

1.3.1.1 Types des granulats

Les granulats sont des matériaux ayant de qualités différentes et devant être non seulement propres mais aussi avec une granulométrie définie. Cependant les granulats se différencient par leur nature, leur composition, leur origine, leur forme, leur répartition granulométrique et leur masse volumique. Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle et artificielle.

A. Les granulats naturels

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine c'est-à-dire lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions).

Les granulats naturels, proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches :

- Eruptives : granites, basaltes porphyres,
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites.

Ils regorgent les granulats roulés ainsi que les granulats concassés.

On appelle **granulats roulés**, les granulats issus de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ils sont caractérisés par des grains arrondis et polis. Il existe trois catégories des granulats roulés dont les granulats de rivière, les granulats de mers et les granulats de dunes. Les granulats roulés nécessitent un lavage pour les débarrasser des argiles et autres impuretés, et un criblage pour obtenir différentes classes de granulats.

On appelle **granulats concassés**, les granulats provenant du concassage et abattage des roches dures (granites, basaltes, calcaires durs, porphyres, grès, etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives. Les granulats concassés nécessitent un dépoussiérage pour éliminer les fines particules inférieures à 0,08 mm nuisibles à la résistance du béton [7].

B. Les granulats artificiels

Les granulats artificiels et spéciaux proviennent soit des sous-produits industriels, soit des fabrications spéciales en usine donc lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais.

Ainsi, on aura :

➤ **Les granulats de laitier**

Le laitier de haut fourneau qui s'est refroidi lentement est proche d'une roche artificielle cristallisée. Ils sont ensuite traités comme des granulats concassés pour au final générer des granulats laitiers.

➤ **Les granulats légers**

Les granulats légers sont généralement :

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

➤ **Les granulats spéciaux**

Les granulats spéciaux servent à la fabrication des bétons spéciaux tels que les bétons réfractaires (chromite, corindon, etc.) ainsi que les revêtements des sols de bâtiments industriels (limonite, magnétite, fonte en paillettes, corindon, hématite, etc.) [6].

1.3.1.2 Caractérisation des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de construction doivent répondre à certains critères de qualité et à des caractéristiques propres à l'utilisation.

Pour un bon choix des granulats, il faut les caractériser en déterminant les caractéristiques géométriques, les caractéristiques physiques, l'état de surface et les caractéristiques mécaniques.

A. Les caractéristiques géométriques

1. La granulométrie

La granulométrie est l'échelonnement des grains contenus dans un granulat. Elle est obtenue en effectuant les essais au laboratoire sur un granulat, dit analyse granulométrique.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la proportion des différents constituants solides d'un granulat en fonction de leur grosseur à l'aide des tamis.

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

Ainsi :

- On appelle refus, le matériau retenu par un tamis donné. La proportion en % du refus cumulé d'un tamis rapporté au poids total s'exprime par la relation I.1
- On appelle tamisât ou passant, le matériau qui passe à travers les mailles d'un tamis. Le complément à 100% du refus cumulé est le tamisât du tamis en considération. Il est obtenu par la relation I.2.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont des dimensions suivantes : 0,063-

0,08-0,1-0,125-0,16-0,2-0,25-0,315-0,4-0,5- 0,630,8-1-1,25-1,6-2-2,5-3,15-4-5-6,3-8-10-12,5-16-20-25-31,5-40-50-63-80-100-125.

Le choix des tamis à utiliser dépend des dimensions du granulat à soumettre à l'essai [8].

2. Classe granulaire

Un granulat est caractérisé par sa classe d/D, avec d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains.

Les dimensions soulignées sont celles de la base préconisée par la norme européenne (NF EN 9332) et sont présentés dans le tableau 2.1

La détermination de d et D des classes granulaires d/D ainsi définies se fait en considérant que les granulats correspondant à ces dimensions doivent être présents en proportions suffisantes [6].

3. Module de finesse

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur une série de tamis suivante : 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 et 5 mm

Un bon sable pour béton doit avoir un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8. Au-dessous, le sable est en majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau et au-dessus, le sable manque d'éléments fins et le béton y perd en ouvrabilité [9].

B. Les caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques mesurent le comportement de matériaux à l'action de la température, l'humidité (la masse volumique, la porosité, l'absorption, etc.)

1) La masse volumique

La masse volumique d'un corps est sa masse par unité de volume. Cependant on distingue la masse volumique absolue et la masse volumique apparente.

On appelle masse volumique absolue d'un solide, la masse par unité de volume de celui-ci sans tenir compte de vides le constituant.

On appelle masse volumique apparente d'un solide, la masse par unité de volume en tenant compte des vides le constituant.

2) La porosité

La porosité est le rapport du volume vide au volume total de la matière. La présence des pores dans les granulats est en rapport direct avec la densité de ceux-ci.

3) L'absorption

L'absorption d'eau est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec.

4) La propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car la présence des impuretés influence l'hydratation du ciment et entraîne des adhérences entre les granulats et la pâte. Les impuretés rencontrées dans les granulats peuvent être des matières organiques, les argiles et les matériaux fins issus du concassage ou du broyage des roches. On mesure l'importance des pollutions argileuses dans les sables par l'essai d'équivalent des sables et l'essai au bleu de méthylène. Quant aux gravillons, la teneur en particules fines est mesurée par l'essai de propreté superficielle.

C. L'état de surface

L'état de surface peut être défini par la rugosité des grains ainsi que l'angularité.

L'angularité des granulats est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et rapport de concassage. Mais peut être mesurée aussi par le temps d'écoulement d'un certain volume de granulats à travers un orifice donné caractérisant ainsi un coefficient d'écoulement des gravillons. Il en va de même pour les sables, la méthodologie étant la même, seules diffèrent les dimensions de l'appareillage de mesure [10].

1.3.2 Les liants et les adjuvants

Dans cette section, sont donnés des généralités sur les liants et les adjuvants. Les liants sont des poudres fines qui facilitent l'adhésion entre divers constituants du béton. Quant aux adjuvants, ils sont là pour modifier les propriétés du béton.

1.3.2.1 Les liants

On distingue deux grands groupes des liants dont les liants organiques et les liants minéraux.

- On appelle liants organiques ou liants hydrocarbonés, ou encore liants bitumineux ou goudronneux les mélanges composés d'hydrocarbure avec soufre, l'oxygène, l'azote dont les propriétés physicomécaniques varient en fonction de la température. Ils sont noirs, visqueux, peuvent durcir et se conserver pendant une longue durée sans addition d'eau, mais par simple abaissement de température. Ce sont les bitumes, les goudrons [7].
- On appelle liants minéraux, des poudres finement broyées qui, mélangées à l'eau forment une pâte plastique, qui à son tour durcit pour former un matériau solide, véritable roche artificielle. Parmi les liants minéraux on distingue les liants aériens et les liants hydrauliques.

Les liants aériens sont des liants qui se conservent pendant une longue durée et augmentent de résistance seulement à l'air, c'est-à-dire qu'ils durcissent uniquement à l'absence à l'eau. Pour les exemples les plus courants, on peut citer les plâtres et la chaux aérienne.

Les liants hydrauliques sont des matières qui peuvent durcir, se conserver pendant longtemps non seulement à l'air, mais aussi sous l'eau. Les exemples les plus courants sont les ciments portland et ses variétés, les ciments alumineux, les chaux hydrauliques, etc [11].

1.3.2.1.1. Le ciment [10]

Le ciment est un liant hydraulique. On entend par là une substance qui, mélangée à l'eau dite de gâchage, est capable de durcir aussi bien à l'air que sous l'eau. La pâte de ciment durcie présente une résistance mécanique élevée et ne se dissout pas dans l'eau. Depuis l'introduction de la norme européenne sur le ciment en Suisse, l'assortiment des ciments de l'industrie cimentière suisse s'est déplacé des ciments Portland purs CEM I vers les ciments Portland composés CEM II, c'est-à-dire des ciments qui contiennent, mis à part le clinker, d'autres constituants minéraux. Le recours plus fréquent à d'autres constituants principaux comme le calcaire, le schiste calciné, la cendre volante ou le laitier pour la fabrication du ciment comporte divers avantages : la diminution de la part du clinker réduit d'une part les émissions de gaz carbonique et permet d'autre part de préserver les réserves de matières premières. Par ailleurs, le développement de ciments des types CEM II et CEM III permet aux utilisateurs d'optimiser les propriétés du béton en termes d'ouvrabilité, de chaleur d'hydratation, de durabilité, etc.

La pâte du ciment constitue un élément actif du béton, elle enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. Elle joue le rôle de lubrifiant et de colle. Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées et de la nature des autres composants.

Le dosage en ciment est dépendant de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés, etc. Le dosage en ciment est déterminé par calcul lors de la formulation des bétons. Le dosage en ciment a une influence directe sur les résistances mécaniques du béton. Toutes autres conditions étant égales par ailleurs, on peut

dire que dans une certaine plage, la résistance est sensiblement proportionnelle au dosage en ciment C.

➤ **Dosage du ciment** [12]

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

- La fonction de liant

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

- La fonction filler

Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité. Les abaques de Dreux, exposées au paragraphe suivant, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance.

1.3.2.2 Les adjuvants

La norme AFNOR NF EN 934-2 [Norme NF EN 934-2, 2009] définit un adjuvant comme étant un produit incorporé lors de la fabrication de bétons, mortiers et pâtes de ciment permettant d'améliorer leurs propriétés à l'état frais ou durci. Il est incorporé en faibles teneurs, n'excédant pas 5% en masse de ciment.

Dans cette catégorie :

- **Les plastifiants et super plastifiants** sont fabriqués à base de ligno-sulfonate, de sels d'acides organiques ou de dérivés de naphthalène. Ils ont pour but d'augmenter les résistances mécaniques par réduction de la quantité d'eau présente dans les bétons,

mortiers ou pâtes de ciment. Les super plastifiants sont des produits de synthèse qui provoquent une augmentation de l'ouvrabilité du mélange. La distinction entre les deux est basée sur la quantité utile pour un effet notable.

- **Les rétenteurs d'eau**, régulant l'évaporation de l'eau, permettent de réduire le ressuage et augmentent ainsi, la stabilité et l'homogénéité du mélange.
- **Les entraîneurs d'air**, à base de ligno-sulfonate, de sels d'éthanol amine, permettent d'entraîner les bulles d'air résultant du malaxage ou de l'évaporation de l'eau et de les répartir uniformément dans le mélange. Ils augmentent la résistance au gel.
- **Les accélérateurs** sont de deux types : (1) les accélérateurs de prise comme les alcalis, les carbonates et les sulfates de sodium ou potassium qui diminuent le temps de début et le temps de fin de prise, et (2) les accélérateurs de durcissement à base de chlorures et de carbonates qui facilitent le développement des résistances mécaniques. Néanmoins, il est déconseillé d'utiliser des additifs à base de chlorures, car ils conduisent à la corrosion des armatures dans le béton.
- **Les retardateurs** sont des composés qui augmentent le temps de début de prise et le temps de fin de prise lors de l'hydratation du ciment. Ce sont généralement des métaux lourds, comme le plomb, le zinc, l'étain, ou des hydrates de carbone ou encore des acides gluconates ou tartriques.
- **Les hydrofuges de masse**, à base d'acides gras ou de leurs dérivés, diminuent l'absorption capillaire, améliorant ainsi l'étanchéité des matériaux cimentaires.
- **Les produits de cure**, composés de cires ou de résines, protègent le béton de la dessiccation par évaporation trop rapide de l'eau [11].

1.3.3 L'eau de gâchage

L'eau est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Selon la norme NF P18-303, seule l'eau potable peut être reconnue pour la fabrication du béton.

Toutes les eaux ne sont pas utilisables car elles peuvent contenir des éléments qui modifient le comportement et les propriétés des bétons (temps de prise, résistance, durabilité, aspect du béton [13]).

L'eau de mer est interdite pour les bétons armés et précontraints. Toutes les eaux usées, de rejets industriels, de ruissellements doivent faire l'objet d'un contrôle selon la norme NF EN 1008.

L'eau permet l'hydratation du ciment et facilite aussi la mise en œuvre du béton. L'excès de la teneur en eau dans le béton joue sur la résistance et la durabilité de ce dernier.

Une augmentation du dosage en eau aura une incidence directe sur les performances mécaniques [14] :

- Baisse de la résistance à la compression / flexion
- Baisse de la compacité
- Augmentation de la porosité
- Augmentation de la perméabilité

Le rapport E/C (Eau-Ciment) est un critère important des études du béton, c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité, et influence sur la résistance mécanique à la compression et durabilité [15].

➤ **Absorption d'eau**

L'absorption d'eau des granulats est un paramètre déterminant de la formulation des bétons. De plus, initialement, les granulats peuvent être totalement ou partiellement saturés. Par conséquent, l'emploi des granulats poreux modifie la quantité d'eau disponible pour la pâte au cours du temps. Pour clarifier l'échange d'eau entre les granulats et la pâte de ciment dans le béton frais, quelques notions peuvent être détaillées :

En premier lieu, l'eau de pré-saturation correspond à la quantité d'eau utile pour saturer les granulats avant le malaxage. La quantité maximale que les granulats peuvent absorber correspond à leur absorption nominale. Les granulats sont alors dans un état saturé surface sèche. L'eau d'ajout est l'eau complémentaire qui est introduite dans le mélange pendant le malaxage. L'eau disponible pour l'hydratation du ciment est appelée l'eau efficace. Au final, l'eau totale dans la confection doit être la somme de l'eau de pré-saturation et celle complémentaire ou efficace.

1.4 EXIGENCES SUR LES CONSTITUANTS

1.4.1 Choix des granulats

Le type, la dimension et les catégories de granulats doivent être sélectionnés en tenant compte :

- Des contraintes d'exécution de l'ouvrage ;
- De l'utilisation finale du béton ;
- Des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton ;
- De toutes exigences liées aux traitements de surfaces appliquées au béton frais ou durci

Le maximum de la dimension nominale supérieur des granulats (D_{max}), est sélectionné en prenant en compte de l'épaisseur de l'enrobage et la dimension minimale des sections.

1.4.2 Choix du ciment

Le choix du ciment doit prendre en compte les contraintes d'exécutions de l'ouvrage, l'utilisation finale du béton, les conditions de cure, les dimensions de la structure, les agressions environnementales auxquelles la structure est exposée et la réactivité potentielle des granulats aux alcalins des constituants.

1.5 CLASSIFICATION DES BETONS

Les bétons peuvent être classés selon plusieurs critères dont :

- La masse volumique
- La résistance
- Le liant utilisé
- La consistance
- Et selon la destination

1.6 PROPRIETES OU CARACTERISTIQUES DU BETON

1.6.1 Caractéristiques du béton à l'état frais

Les propriétés du béton dérivent de la qualité, du dosage, de la mise en œuvre (malaxage, vibration) et de ses constituants. Ils dépendent de circonstance de durcissement ainsi que de l'âge du béton. Cela étant, le béton se présente sous deux états, l'état frais et l'état durci. Il est donc nécessaire de connaître ses différentes propriétés sous ces deux états pour mieux l'utiliser. Dans cette section sont respectivement présentées les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

1.6.1.1 Le malaxage

Le malaxage du béton est une étape importante pour assurer un mélange homogène. La séquence d'introduction des ingrédients dans le malaxeur, le temps de malaxage, l'énergie du malaxage (nombre de tours/min), etc. sont autant de paramètres qui affectent la qualité du

malaxage. Les autres facteurs qui affectent le malaxage sont le rapport entre le volume de la gâché, le type de malaxeur et la taille du tambour, la configuration de palettes du malaxeur. [10]

1.6.1.2 L'ouvrabilité

L'ouvrabilité ou la maniabilité est la principale propriété du béton frais, elle est mesurée à l'aide d'un cône d'Abrams. C'est l'indice qui indique l'aptitude à la mise en place du béton dans un moule. Les bétons sont ainsi classés suivant l'affaissement observé au cône d'Abrams tel que repris dans le Tableau 1.5.

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.

Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton :

- Méthode et durée de transport
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats)
- Forme, granulométrie et type de granulats
- Le volume d'air
- Le dosage en eau

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement etc... [16] [10]

1.6.2 Caractéristiques du béton à l'état durci

Le béton durci est principalement caractérisé par sa résistance mécanique. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. 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 28 jours élevée, donnent des bétons plus résistants.
- Lorsqu'il y a de l'eau en excès dans le béton, celle qui n'entre pas en réaction chimique avec le ciment s'évapore du béton en y formant des pores dont la présence réduit la compacité et par conséquent, réduit la résistance du béton.
- Plus le béton est compacté, plus il est résistant car le volume des pores est réduit. Il faut donc bien compacter son béton pour réduire le volume des pores autant que possible, mais tout en évitant la ségrégation.
- Les conditions de durcissement : le milieu ambiant influe beaucoup sur l'accroissement de la résistance du béton. Les conditions normales de durcissement du béton sont l'humidité relative de l'air entre 90 et 100% et une température de 20 ± 20 C.

Les bétons courants ont une résistance à la compression comprise entre 20 et 40 MPa pour un rapport E/C de l'ordre de 0,5 et cette résistance se déterminent à l'aide des différents essais mécaniques destructifs ou non destructifs. [17]

1.7 LES METHODES DE FORMULATION DU BETON

La formulation d'un béton revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, de gravier, de l'eau et éventuellement des adjuvants entrant dans la composition d'un m³ de béton partant des propriétés recherchées [15]. Diverses méthodes de formulations du béton ont été développées notamment :

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

Dans cette section, seule la première méthode ayant été utilisée dans ce présent travail est sommairement présentée.

1.7.1. LA MÉTHODE DE GREUX-GORISSE [1]

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique simplifiée qui permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton d'étude mais que, seules quelques gâchées d'essais et la confection des éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des propriétés souhaitées et des matériaux utilisés.

Les données de base utilisées pour cette méthode sont notamment la nature de l'ouvrage, la résistance souhaitée à 28 jours et la consistance souhaitée. Outre ces trois données de base, la

dimension maximale des granulats D_{max} est aussi un paramètre utile dans la composition du béton d'étude, d'où il ne doit pas être négligé.

1.8 LES DOMAINES D'UTILISATION DU BETON

Le béton est un matériau de construction qui est actuellement présent partout où l'on construit, et il doit cette présence à ses nombreuses qualités. Grâce à sa durabilité, le béton résiste très longtemps aux sollicitations physico-chimiques liées aux conditions d'emploi, aussi bien qu'à l'environnement. Ses caractéristiques lui permettent de répondre aux multiples exigences imposées aux ouvrages notamment la sécurité, la stabilité statique et dynamique, la tenue au feu, l'inertie thermique, acoustique et bien entendu esthétique [18]. Ceci confère au béton son usage dans le bâtiment que dans les travaux publics.

1.8.1 Utilisation du 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 [18].

Dans un bâtiment, diverses fonctions sont assurées par le gros œuvre ; on peut les classer en quatre fonctions essentielles :

- La fonction structure,
- La fonction plancher,
- La fonction enveloppe,
- La fonction couverture.

Le béton apporte dans ces quatre fonctions une réponse très largement positive à la satisfaction des exigences qu'est en droit d'avoir l'utilisateur.

1.8.2 Utilisation du béton dans les travaux publics [18]

Tout comme dans le bâtiment, le béton est utilisé dans les travaux publics et joue un rôle primordial notamment dans la construction des ponts, des tunnels, des barrages, des routes et d'autres ouvrages à intérêt public.

➤ Les ponts

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

➤ Les tunnels

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

➤ Les barrages

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

➤ Les routes

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

1.9 QUELQUES PATHOLOGIES DU BETON

Dans cette section nous décrivons les pathologies du béton à l'état frais notamment la ségrégation et le ressuage ; à l'état durci qui se classe en pathologies mécaniques notamment le fluage, le retrait, la fissuration et en pathologie physicomécanique dont le gonflement dû aux sulfates, les alcalis réactions ; et pour en finir par la prévention et le traitement des pathologies.

1.9.1 Les pathologies du béton à l'état frais

➤ La ségrégation

C'est un phénomène inhérent à l'hétérogénéité du béton qui se trouve soumis à différentes manipulations telles que malaxage, transport, chute dans les coffrages à travers les ferrailages, vibration, etc. Il en résulte que les éléments constituant le béton ont tendance à se séparer les uns des autres, à se « ségréger » en fonction de leur grosseur ou de leur densité. Ce phénomène peut engendrer de graves défauts tels que porosités, nids de graviers mal enrobés, ou, à l'inverse, excès de mortier et d'eau. Ces défauts ne compromettent pas seulement l'esthétique par des parements défectueux que l'on est contraint de ragréer tant bien que mal, mais également la durabilité de l'ouvrage car les bétons ségrévés sont plus sensibles à l'action des eaux agressives, du gel et des intempéries et protègent mal les armatures contre la corrosion.

➤ Le ressuage

Le ressuage c'est l'expulsion de l'excédent de l'eau dans le béton sur les surfaces exposées à l'air libre. Cette expulsion intervient lors de la mise en place et avant et pendant la prise. L'eau expulsée sur la face supérieure a tendance à stagner sur la surface libre du béton

1.9.2 Les pathologies du béton à l'état durci

A l'état durci, quelques pathologies se présentent sur le béton notamment celles mécaniques et celles physico-mécaniques

1.9.2.1 Les pathologies mécaniques

➤ Le fluage

C'est le phénomène de déformation provoqué dans le temps sous une charge constamment appliquée. Sous un effort constant de compression le béton se raccourcit progressivement. Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans. Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

➤ Le retrait

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement.

➤ La fissuration

La fissuration, ici pris comme pathologie, est due au tassement du béton du béton frais, se manifestant déjà avant la prise. Les autres formes de fissuration sont les conséquences des pathologies déjà repris dans les autres paragraphes. Ça se produit par un tassement progressif du squelette sous l'effet de la pesanteur. Autrement, lorsqu'une structure est en service, il subit aussi des vibrations, des chocs et il peut survenir même une explosion. Tout ceci cause aussi des fissurations non prévues.

1.9.2.2 Les pathologies physico-mécaniques

➤ Gonflement due aux sulfates

Les eaux souterraines contiennent parfois des sulfates en solution (les eaux séléniteuses contiennent du sulfate de calcium) ; un gonflement peut alors être occasionné, si la teneur en sulfate atteint une certaine concentration ; l'aluminate tricalcique et le sulfate de calcium se combinent pour donner un tri sulfate hydraté qui constitue un sel gonflant par suite de fixation d'un grand nombre de molécules d'eau.

➤ Réactions alcalis-granulats

Ces phénomènes se produisent lorsque les agrégats qui entrent dans la composition du béton contiennent de la silice réactive, l'ouvrage est soumis à un environnement humide et que la teneur en alcalins du béton est élevée (Na^+ , K^+ , OH^- respectivement de NaOH et KOH).

1.9.3 Prévention des pathologies

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

1.9.3.1 Prévention à l'état frais

➤ Un dosage optimal des constituants du béton lors de la formulation

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

➤ La vibration du béton

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

1.9.3.2 Prévention à l'état durci

➤ La cure du béton

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

➤ **La désactivation de la surface du béton**

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

➤ **Le finissage de la structure**

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

1.9.4 Traitement des pathologies

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

1.9.4.1 Procédés physiques

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

1.9.4.2 Procédés physico-mécaniques et électromécaniques

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

Dans un cas, le "cataplasme" contient un électrolyte qui sert à extraire, sous un courant de 20 à 25 volts, les molécules de chlore, dans l'autre cas, l'électrolyte contient du carbonate de sodium, qui pénètre par électrolyse dans le béton et fait remonter son pH

1.10 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre il a été question de présenter les généralités sur le béton, passant par la présentation du matériau béton ; ses constituants et leurs caractéristiques ; ses propriétés, sa formulation ainsi que ses pathologies et leur méthodes de prévention. Le chapitre deuxième présentera les matériaux, les matériels et méthodes utilisés pour la confection du béton.

CHAPITRE 2 MATERIAUX ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 INTRODUCTION

Ce présent chapitre est consacré premièrement à la présentation de la nature et l'origine des constituants utilisés notamment celles du sable, du gravier, du ciment et de l'eau ; à la caractérisation de ces derniers par une série d'essais en laboratoire notamment : l'analyse granulométrique par tamisage et les essais de détermination des propriétés physiques des granulats (caractéristiques intrinsèques).

Deuxièmement, il consistera à la présentation de la méthode de formulation de béton utilisée, la méthode de Dreux-Gorisse et l'ensemble des essais qui permettent de caractériser qualitativement et quantitativement les propriétés du béton à savoir la consistance du béton par l'essai d'étalement au cône d'Abrams ; la résistance à la compression à 28 jours. Dans ce chapitre sont présentés les modes opératoires des différents essais effectués au laboratoire de Géo matériaux de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées de l'ULPGL/GOMA.

2.2 LES MATERIAUX UTILISES

Etant donné que les constituants utilisés présentent des origines et natures différentes, dans cette section nous présentons respectivement la nature et l'origine de chaque constituant.

2.2.1 Les granulats

Les granulats employés pour cette recherche sont les graviers concassés, gravillons issus du concassage de la roche volcanique produite par l'entreprise CARIGO de classe 8/15.



Figure 1 Graviers concassés

Le sable utilisé est un sable roulé, provenant d'Idjwi de classe 0/5.



Figure 2 Sable roulé

2.2.2 Le ciment

Le ciment utilisé est le ciment CIMERWA de classe commerciale 42.5 produit au RWANDA



Figure 3 Ciment Cimerwa

2.2.3 L'eau de gâchage

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

2.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX

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 et du ciment, l'analyse granulométrique de sables et des graviers, le degré de propreté pour le sable, le taux d'absorption d'eau des graviers et du sable ainsi que la consistance normale du ciment.

2.3.1 Echantillonnage [19]

Pour une bonne répartition de matériaux d'échantillon, on utilise la méthode de quartage pour la détermination des différents échantillons. Le quartage a consisté à Placer l'échantillon dans un bac métallique à bord peu élevé (de préférence), et l'étaler. À l'aide d'une truelle, partager d'abords en deux moitiés (1), puis en 4 quarts (2), sensiblement égaux. Éliminer les fractions A et D, et réunir les fractions opposées B et C : on a ainsi la moitié de l'échantillon primitif. La figure 4 présente l'échantillonnage par quartage :

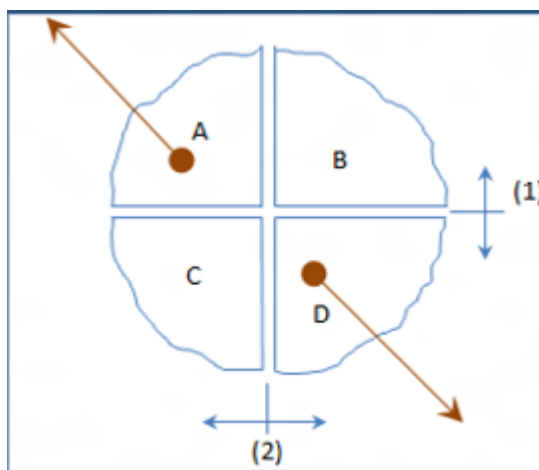


Figure 4 Echantillonnage par quartage

Si cette quantité ($1/2$) est encore trop importante, la partager suivant le même processus. D'où un échantillon représentatif égal au $1/4$ de la quantité primitive.

2.4 LES ESSAIS SUR LES MATERIAUX

2.4.1 Essais sur les granulats

Les essais sont effectués en tenant compte de la caractérisation granulométrique, géométrique et physique des granulats.

2.4.1.1 Caractérisation granulométrique

1) Analyse granulométrique

➤ But de l'essai

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

➤ Mode opératoire [15]

- Pour le sable, nous pesons à l'aide de la balance électrique un échantillon de masse 2000g et pour les graviers, un échantillon de 2000g
- Nous choisissons ensuite neuf tamis pour le sable et huit pour les graviers, dont les dimensions du diamètre des mailles en mm sont :
 - pour le sable : 5 ; 3,15 ; 2,5 ; 1,25 ; 1 ; 0,63 ; 0,315 ; 0,160 et 0,125
 - pour les graviers : 16 ; 12,5 ; 10 ; 8 ; 6,3 ; 5 ; 4 ; 3,15
- Nous plaçons les tamis (de bas en haut suivant l'ordre croissant des dimensions des diamètres des mailles) sur la tamiseuse. En dessous des tamis, nous plaçons le fond (récipient servant à recueillir les passants du dernier tamis).
- Nous mettons l'échantillon dans le tamis supérieur, nous couvrons puis nous procédons au tamisage pendant 20 minutes

- Après tamisage, on pèse le refus partiel de chaque tamis à l'aide de la balance électrique
- Puis on calcule le % de refus ainsi que celui des tamisats ; avec :

$$\%refus = \frac{Poids\ cumulé}{Poids\ échantillon} \times 100 \quad (II.1)$$

$$\%tamisat = 100\% - \%refus \quad (II.2)$$

- Enfin, nous dressons un tableau de résultats et la courbe granulométrique correspondante.

➤ **Appareillage**

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

2) **Classe granulaire**

L'interprétation de la classe granulaire caractérisée par sa classe d/D se fait suivant le tableau 2.1

Tableau 2.1 Classe granulaire

Granulats	d/D
Fines	0/D avec $D \leq 0,08$ mm
Sable	0/D avec $D \leq 6,3$ mm
Gravillons	d/D ; $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm
Cailloux	d/D ; $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm
Grave	0/D avec $6,3\text{mm} \leq D \leq 80\text{mm}$

3) Module de finesse

$$MF = \frac{1}{100} \sum Refus (\%) \quad (II.3)$$

Le tableau présente l'interprétation des résultats du module de finesse [9]

Tableau 2.2 Evaluation du sable en fonction du module de finesse

Valeur de MF	Conclusion
MF < 2,2	Le sable est en majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau
2,2 ≤ MF ≤ 2,8	Bon sable pour le béton
2,8 < MF ≤ 3,2	le sable est grossier et manque d'éléments fins, il fait perdre au béton en ouvrabilité

2.4.1.2 Caractérisation physique des granulats

1) La masse volumique apparente (ρ_{app})

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. Cette section présente le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage, et l'expression des résultats [20] [21].

L'essai a consisté au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule II.4.

➤ **But de l'essai**

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

➤ **Principe de l'essai**

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

➤ **Mode opératoire**

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

- Peser un récipient vide de masse M_1 et de volume connu V ;
- Verser à l'intérieur le matériau par couches successives en le répartissant sur toute la surface et sans tassement ;
- Araser avec soin à l'aide d'une réglette plate ;
- Peser le récipient rempli pour obtenir la masse M_2 .
- Effectuer au moins trois mesures pour faire une moyenne.

➤ **Appareillage**

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

➤ **Expression des résultats**

L'expression des résultats se fait à partir de la relation II.4

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

M La masse sèche du matériau en g

V Le volume du récipient en ml

2) La masse volumique absolue (ρ_{abs})

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. La masse volumique absolue a été déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables [20] [21].

➤ But de l'essai

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

➤ Principe de l'essai

Cet essai consiste à mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau dans un pycnomètre. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue.

➤ Mode opératoire

La masse volumique a été évaluée à partir des éprouvettes graduées

La marche à suivre est la suivante :

- On prélève un échantillon de masse M du matériau sec
- On remplit de l'eau l'éprouvette graduée de volume initial V1

- A l'aide de l'entonnoir, on insère petit à petit dans l'éprouvette la masse M du granulat;
- On agite mollement afin d'éliminer les bulles d'air et on laisse reposer pendant quelques minutes
- Enfin, on lit le volume final V_2 du niveau de l'eau due à l'ajout du granulat dans l'éprouvette.
- On refait la même opération avec une seconde éprouvette pour plus de précision.

➤ **Expression des résultats**

La masse volumique est calculée selon la relation II.5

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \text{(II.5)}$$

Avec :

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

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

Le tableau donne l'interprétions de la caractérisation des granulats suivant la masse volumique

Tableau 2.3 Caractérisation des granulats suivant la masse volumique

Granulats	Masse volumique en g/cm^3
Granulats légers	≤ 2
Granulats durs	$\geq 2,5$
Granulats courants	2,65-2,8
Granulats lourds	≥ 3

3) L'essai d'équivalent sable

➤ But de l'essai

Le but de cet essai est de déterminer le degré de pureté du sable.

Il est déterminé conformément à la Norme Française XP P 18-597 [22].

➤ Principe de l'essai

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

➤ Appareillage

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

➤ Mode opératoire

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

- A l'aide du tamis de 2 mm, procéder au tamisage du sable, ensuite peser à l'aide de la balance électrique un échantillon de 120g ;
- Introduire la solution lavante dans le tube en plexiglass jusqu'au premier trait repère ;
- Verser les 120g de l'échantillon dans le tube en plexiglass contenant la solution lavante
- Agiter verticalement pour éliminer les bulles d'air, ensuite laisser reposer pendant 10 minutes ;

- Placer les tubes bouchés sur l'agitateur électrique, puis mettre en marche l'agitateur ;
- Ajouter l'eau jusqu'au deuxième trait repère ;
- Laisser reposer le tube pendant 20 minutes ;
- Effectuer premièrement la lecture à vue, à l'aide de la règle métallique graduée, des hauteurs h_1 (hauteur du sable propre + flocculat) et h_2 (hauteur du sable propre). Et deuxièmement, effectuer la lecture à piston, à l'aide bien entendu du piston qu'on introduit dans le tube jusqu'à niveler la surface du sable propre pour besoin de précision.

Comme la mesure à vue présente n'est pas certaine nous chercherons à faire des mesures plus précises suivantes :

- Descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floccula, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. L'immobiliser au contact du sable
- Enfin on mesure h

➤ **Expression des résultats**

L'expression des résultats se fait à partir non seulement du tableau d'interprétation, mais aussi de la relation II.6 :

$$ES = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \times 100\% \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- h_1 : hauteur du sable propre + éléments fins
- h_2 : hauteur du sable mesurée à vue
- ES : équivalent de sable proprement dit ou mesuré à piston

La figure II.2 présente les éprouvettes de la détermination de l'équivalent sable

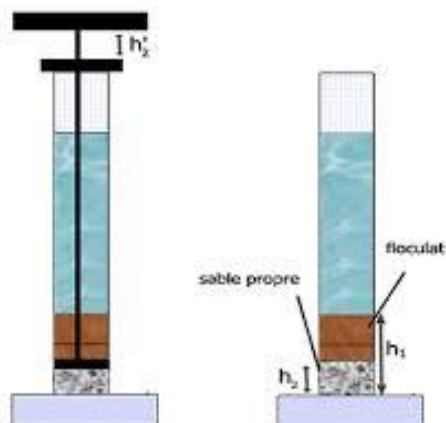


Figure 5 Essai de l'équivalent de sable

L'interprétation des résultats de l'équivalent de sable s'est faite également à partir du tableau 2.4.

Tableau 2.4 Interprétation des résultats de l'équivalent de sable [7]

Valeur de ES à vue	Valeur de ES au piston	Conclusion
$ES \geq 85$	$ES \geq 80$	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risques d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau
$75 < ES < 85$	$70 < ES < 80$	Sable propre: à faible % de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de haute qualité
$65 < ES < 75$	$60 < ES < 70$	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour le béton de bonne qualité quand on ne craint pas le retrait
$ES < 65$	$ES < 60$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de bonne qualité

4) Détermination du taux d'absorption

➤ But de l'essai

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne comme ceux d'origine volcanique qui est préjudiciable, en particulier, au dosage en eau des bétons ce qui influe à sa résistance. En effet, la détermination du coefficient d'absorption d'eau permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats afin d'en tenir compte pour le dosage en eau efficace lors de la formulation des bétons [3].

➤ Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption qui est le rapport de 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.

➤ Mode opératoire

- Pour les sables (classe 0.08mm-5mm) [21]

Après imbibition, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe de grain sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toute force d'attraction capillaire.

- Pour les gravillons (8-15) [20]

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement.

Ainsi pour le cas de nos essais au laboratoire de notre université, après séchage de nos matériaux traditionnellement au feu jusqu'à la masse constante, nous avons pris :

- Pour les sables une masse des matériaux secs $m_d = 800\text{g}$
- Pour les gravillons de la classe 8-15, $m_d = 500\text{g}$

➤ **Appareillage**

Les matériels utilisés pour la réalisation des essais ci-dessus cités sont les suivants :

- Tamis à mailles carrés
- Balance de précision
- Cuve à eau
- Bassin en plastique
- Tissus et éponge absorbants
- Sèche-cheveux

➤ **Expression de résultats**

$$Abs = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (II.7)$$

Avec :

M_s = masse de l'échantillon sec

M = masse de l'échantillon imbibé.

5) Détermination de la porosité des granulats

➤ **But de l'essai**

La détermination de la porosité d'un matériau permet de connaître la proportion des vides dans ce matériau.

➤ **Principe** [3]

- chasser tout le liquide et peser le matériau sec
- remplir ces vides avec de l'eau
- une nouvelle pesée donnera le résultat cherché

➤ **Mode opératoire**

- pour la préparation, prélever une quantité moyenne des matériaux
- ensuite passer au séchage de l'échantillon en le portant à une température de 105°C et l'y maintenir jusqu'à masse constante
- après c'est le pesage de l'échantillon sec, soit M_0 cette masse
- l'étape suivante consiste à remplir les pores de l'eau en plaçant l'échantillon dans de l'eau froide et l'y maintenir pour que l'eau rentre dans les pores
- peser à nouveau l'échantillon mais avant essayer chaque surface extérieure des grains (chiffon), soit M_1 cette masse
- en déduire la porosité n .

En effet $M_1 - M_0$ représente la masse d'eau contenue dans les pores, le même nombre mesure le volume de ces vides.

➤ **Expression de résultats**

$$n = \frac{M_1 - M_0}{\text{Volume du matériau}} \times 100 \quad (\text{II.8})$$

$$V_{\text{matériau}} = \frac{M_0}{\rho} \quad (\text{II.9})$$

D'où

$$n = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times \rho \times 100 \quad (\text{II.10})$$

6) Indice des vides

L'indice des vides e représente le rapport du volume des vides et du volume des grains. L'indice des vides est trouvé à partir de la porosité par la formule suivante (II.11):

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (\text{II.11})$$

2.4.2 Essais sur le ciment

2.4.2.1 Essai de consistance

L'essai de consistance normale a été réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10 mm, selon la norme NF EN 196-3 [23].

➤ But de l'essai

Le but est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour trouver la pâte à consistance normale de ciment.

➤ Principe de l'essai

L'essai de consistance vise à mesurer la fluidité d'une pâte de ciment. Une pâte de consistance normale est celle qui permet à une sonde de s'enfoncer d'une certaine distance sous une charge standard.

➤ Mode opératoire

- Pour la préparation de l'échantillon, Peser 500 g de ciment.
- Ajouter une quantité d'eau déterminée de 125 ml

- Malaxer le mélange à une vitesse plus ou moins lente
- Remplir un moule tronconique avec la pâte de ciment
- Placer la sonde de l'appareil de Vicat perpendiculairement à la surface de la pâte.
- Relâcher la sonde sans élan et mesurer la distance d'enfoncement après 30 secondes.

➤ Interprétation des résultats

- Si la sonde s'enfonce de $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, la consistance est normale.
- Si l'enfoncement est supérieur à 7 mm ou inférieur à 5 mm, ajuster le rapport eau/ciment et répéter l'essai jusqu'à obtenir la consistance souhaitée.

➤ Appareillage

L'essai de consistance normale du ciment nécessite :

- L'appareil de Vicat muni de la sonde
- Un moule tronconique
- Une spatule

2.5 METHODE DE FORMULATION DU BETON [24]

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques, mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point du béton peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux : les données du projet (caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferrailage, etc.), les données du chantier (matériels de mise en œuvre, conditions climatiques, etc.), les données liées aux propriétés du béton (maniabilité, compacité, durabilité, aspect, etc.).

Pour la formulation du béton, il existe plusieurs méthodes, comme la méthode des abaques de Dreux Gorisse, la méthode d'Abrams, la méthode de Bolomey et la méthode Faury. Parmi toutes ces méthodes, le choix dans ce travail, est porté sur la méthode de Dreux Gorisse, utilisée pour la confection des éprouvettes cylindriques de 16*32 cm.

2.5.1 Méthode de Dreux Gorisse [15]

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

2.5.1.1 Choix de la méthode

Cette méthode a l'avantage d'être issue, d'une part, de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et en donnant satisfaction. Elle est apte aux exigences liées au cahier des charges ; et est très simple d'utilisation et se base sur la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Cette méthode permet, d'autre part, une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois déterminée cette composition, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués.

2.5.1.2 Principe de la formulation [25]

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

2.5.1.2.1 Définition du cahier de charge

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

Les paramètres principaux devant être définis sont : la maniabilité et la résistance du béton, la nature du ciment et le type de granulats.

1) Critère de maniabilité

La maniabilité est caractérisée, entre autre, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (Aff.). Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier.

Le tableau 2.5 présente l'affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser.

Tableau 2.5 Usage fréquents des bétons en fonction de la valeur de l'affaissement

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

2) Critère de résistance

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique f_{cm} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$f_{cm} = 1,15 \times f_{c28} \quad (\text{II.12})$$

3) Choix du ciment

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie σ'_c et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc...). La classe vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé. Le cimentier garantit une valeur minimale atteinte par au moins 95 % des échantillons (dénomination normalisée spécifiée sur le sac de ciment). La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le Fabricant est donnée dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	35 à 45 MPa	45 à 55 MPa	> 55 MPa

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

2.5.1.2.2 Les étapes de calcul nécessaires à l'obtention de la formulation théorique du béton

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

1) Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$f_{cm} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

f_{cm} : Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c : Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C : Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E : Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G : Coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Le tableau 2.7 présente le coefficient granulaire en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max} .

Tableau 2.7 Coefficient granulaire en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max} .

Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	Fins $D_{max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

2) Détermination de C

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

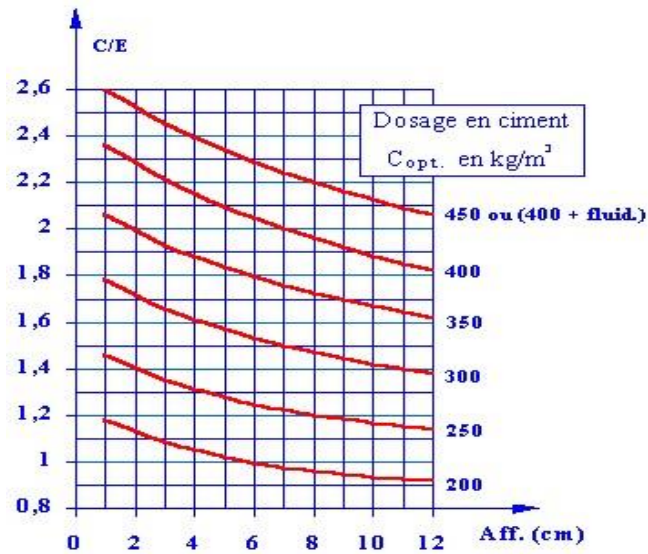


Figure 6 Abaque permettant la détermination de C_{opt}

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherché. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C_{opt} . Au-delà de 400 kg de ciment par m³ de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant (Fluide.).

Cependant, si la valeur de C_{opt} trouvée à partir de cet abaque de Bolomey est inférieure à celle trouvée par la formule préconisée par la norme, il faudra prendre cette deuxième valeur car elle est encore considérée comme la quantité minimale du dosage en ciment. Elle est trouvée par la formule (II.12)

$$c = \frac{250 + 10 * f_{ck}}{\sqrt[5]{D}} \quad (\text{II.14})$$

3) Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe

granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracer de la droite brisée de référence
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux tracés de la droite de référence de Dreux :
- La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum des vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y_A ;

En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm ; } X = \frac{D_{\max}}{2} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm ; } \text{Module}(X) = \frac{(\text{Module } D_{\max} + 38)}{2}$$

En ordonnée :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K' \quad (\text{II.16})$$

Y_A est donné en pourcentage de passants cumulés

K dépend du dosage en ciment, et du mode de vibration et est déterminé par le tableau 2.8

Les valeurs de K' se déterminent par l'expression ci-après :

$$K' = 6MF - 15 \text{ si } MF > 2,5$$

$$K' = 0 \text{ si } MF \leq 2,5$$

Tableau 2.8 K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluide	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

La droite de Dreux a pour origine les point 0, origine du graphe et pour extrémité le point Dmax caractéristique des plus gros granulats

4) Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, passants cumulés, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la

droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

5) Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, et de gravier). Sa valeur de base γ est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre. Des corrections (γ_1 , γ_2 et γ_3) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées. Le tableau 2.6 présente les valeurs du coefficient de compacité en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats.

La valeur de la compacité γ du béton permet de déterminer le volume total absolu de granulats $V_{granulats}$ intervenant dans la formulation du béton :

$$V_{granulats} = \gamma V_{Tb} - \frac{C}{\rho_C} \quad (II.17)$$

Avec :

V_{Tb} : Volume total béton (1m³)

ρ_C : Masse volumique absolue ciment

C : Dosage en ciment

Tableau 2.9 Les valeurs du coefficient de compacité en fonction du dosage en ciment, de la vibration et de la qualité des granulats.

Plasticité	Vibration	(granulats roulés ; C=350Kg/m3)					
		D=4	D=8	D=12,5	D=20	D=31,5	D=40
TP $10 \leq A \leq 15$	Puissante	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815
	Faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820
	Normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825
P $5 \leq A \leq 9$	Puissante	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830
	Faible	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835
	Normale	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840
F $0 \leq A \leq 4$	Puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,840	0,845
	Faible	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845
	Normale	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850

-0,01 (sable roulé, gravillon concassé)

6) Détermination des masses de granulats

Pour 1m^3 de béton dont les granulats sont secs (Sable et gravier 100% secs)

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolu de sable ($S\%$), et de gravier ($G\%$), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s), de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (M_s et M_G) :

$$V_s = V * S\% \quad (\text{II.18})$$

$$M_s = V * S\% * \rho_s \quad (\text{II.19})$$

$$V_G = V * G\% \quad (\text{II.20})$$

$$M_G = V * G\% * \rho_G \quad (\text{II.21})$$

- Pour 1m^3 de béton dont les granulats sont humides (sable et gravier 100% humides ou saturés) [5]

Alors leurs quantités sont déterminées par :

- Masse de sable $M_s = M_S * (1 + W_s)$ (II.22)

- Masse de gravillons $M_g = M_G * (1 + W_g)$ (II.23);

- Eau d'apport $E_{app} = E - (W_s * M_S) - (W_g * M_G)$ (II.24)

Avec :

- M_s et M_g : les masses humides de sable et de gravier ;
- M_S et M_G : les masses sèches de sable et de gravier
- W_s : la teneur en eau de sable et
- W_g : teneur en eau gravier

Il sied de préciser que pour notre travail, la teneur en eau des granulats est égale à leur taux d'absorption.

- Pour 1m^3 de béton dont les graviers sont secs (100% secs) et le sable est humide (100% humides ou saturé) [5]

- Masse des graviers secs $M_G = V_G * \rho_G$ (II.25)

- Masse de sable humide $M_s = M_S * (1 + W_s)$

- Eau d'apport $E_{app} = E - (W_s * M_S)$ (II.26)

Avec V_G volume absolu de gravier, E eau calculée,

- Pour 1m³ de béton dont le sable est sec (100% sec) et les graviers sont humides (100% humides ou saturés) [5]
- Masse de gravier humide $M_g = M_G * (1 + W_g)$;
- Masse de sable sec $M_S = V_S * \rho_S$ (II.27);
- Eau d'apport $E_{app} = E - (W_g * M_G)$ (II.28)

2.6 CONFECTION DES EPROUVETTES

Mise en place par aiguille vibrante : norme NF p 18-422 mise en place par piquage : norme NF p 18-423

La vérification de la qualité d'un béton nécessite de vérifier sa résistance à la compression à 28 jours, Fc28. Pour cela, des éprouvettes de béton sont confectionnées à l'aide de moule en acier et de forme cylindrique de 16 cm de diamètre et 32cm de hauteur.

La confection de l'éprouvette désigne deux choses.

- Il y a la quantité de béton nécessaire, la façon de remplir et de manipuler l'éprouvette afin de garantir la qualité de l'éprouvette en béton. Cette procédure est décrite dans la norme NF P 18-404.
- Il y a la mise en place du béton dans l'éprouvette par vibration pour reproduire les conditions de mise en place du béton selon l'ouvrabilité désirée. Ces procédures sont décrites dans la norme NF P 18-422, lorsque le béton est mis en place par une aiguille vibrante, et par la norme NF P 18-423, lorsque le béton est mis en place par piquage.

➤ **Quantité de béton** : Norme NF P 18-404

Le volume de béton nécessaire correspond au volume des éprouvettes majoré d'au moins 20% afin de compenser notamment les imperfections de dosage de la méthode C.E.S DREUX. Cela représente approximativement un volume de béton de 10L pour une confectionner éprouvette.

➤ **Moyen de vibration, nombre de couche et temps de**: Norme NF P 18-422 et NF P 18-423

La vibration du béton dépend de son ouvrabilité. Au-delà d'une ouvrabilité de 10 cm, le béton se met en place par un simple piquage. En deçà la mise en place du béton ne nécessite une forte vibration. Les éprouvettes sont vibrées par une aiguille de 25mm de diamètre, ce qui est notre cas.

La mise en place du béton s'effectue en deux couches. Le béton est confectionné en incorporant dans l'ordre, le gravier, puis le sable et en fin le ciment. Le mélange est brassé à sec durant approximativement une minute. L'eau est ensuite ajoutée doucement afin de vérifier visuellement l'ouvrabilité du béton. L'ensemble est ensuite brassé durant approximativement 2 minutes. L'essai d'ouvrabilité est mené afin de vérifier et d'ajuster le dosage en eau.

L'éprouvette est ensuite remplie selon le nombre de couches nécessaires à la vibration du béton et vibré. La dernière couche est remplie jusqu'au bord de l'éprouvette. Elle est ensuite vibrée conformément. La vibration contracte le béton. Le volume de béton dans l'éprouvette diminue. Cette diminution de volume est compensée en remplissant l'éprouvette au fur et à mesure afin que le niveau de béton soit maintenu jusqu'au bord supérieur de l'éprouvette.

L'éprouvette est arasée en deux phases. Une phase de dégrossissage consiste à passer un réglé sur le plat de son biseau. Une phase d'affinage consiste à passer le réglé sur le plat.

Elle est pesée, puis stockée 24h à 20°C. L'éprouvette est ensuite démoulée et stockée par immersion dans un bassin d'eau ou dans un local à 95% d'humidité et à 20°C.

2.7 ESSAI SUR LE BETON

2.7.1 Essai sur le béton frais

On note que le malaxage a été fait de manière manuelle et la vibration du béton a été assurée par une aiguille vibrante.

❖ Essai d'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton a été évaluée à l'aide du cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451 [26].

➤ Principe de l'essai

L'essai a consisté à introduire le béton frais dans un moule tronconique (DB = 20, db = 10, H = 30 cm) en trois couches, puis le moule a été retiré lentement et la mesure de l'affaissement a été prélevée en (cm).

➤ Mode opératoire

Conformément à la norme NF EN 12350-2, le déroulement de l'essai suit les étapes suivantes

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois couches et chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige 14 mm de diamètre ;
- Le cône est arasé avec une tige ;
- Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes ;
- Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près.

2.7.2 Essai sur le béton durci

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

❖ Résistance à la compression

La résistance mécanique du béton est caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton et du rapport E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment)

➤ Principe

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 NF EN 12390-3.

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et les déformations au cours de l'essai.

➤ Mode opératoire

L'éprouvette, de forme cylindrique (ou cubique) est placée dans la presse en plaçant les surfaces planes perpendiculairement à la direction de l'application de l'effort.

Les données sur l'éprouvette sont insérées sur la machine et la presse est mise en marche avec une vitesse de compression égale à celle du rapprochement des deux plateaux de la machine lorsqu'elle fonctionne à vide.

➤ Expression des résultats

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

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

- A est la section de l'éprouvette en mm

2.8 DETERMINATION DE L'INFLUENCE DE LA PRE-SATURATION DES GRANULATS

2.8.1 Détermination de l'influence de la pré-saturation sur la rhéologie du béton

Les granulats utilisés dans cette étude sont des granulats d'origine volcanique présentant des nombreux pores et peuvent regorger des quantités d'eau bien avant leur confection suivant leur condition de stockage par exemple.

Une quantité significative d'eau se retrouve piégée à l'intérieure de ces granulats, or au niveau des calculs des quantités des constituants qui doivent entrer dans la confection du béton, la quantité d'eau efficace trouvée est celle correspondant au mélange au moment du malaxage et ne tient pas compte de la quantité d'eau contenue par les granulats de par leur porosité.

D'où l'objectif de déterminer l'influence de cette eau piégée dans le granulat. Pour y arriver, nous allons varier l'état de granulat. Cette influence sera déterminée par la comparaison des résultats des essais d'affaissement au cône d'Abrams du béton de référence, béton confectionné avec des granulats secs aux bétons confectionnés avec différents états de pré-saturation des granulats, il va s'agir de comparer les quantités d'eau ajoutées dans chaque confection du béton. Le principe consistera à atteindre l'affaissement souhaité en ajoutant sur l'eau de gâchage une quantité d'eau supplémentaire en %. Cette quantité d'eau ajoutée sera fonction de l'eau de gâchage calculée.

Après la confection des différents bétons, il va s'agir d'évaluer les quantités réelles du dosage en eau de ceux-ci en les comparants entre eux.

2.8.2 Détermination de l'influence de la pré-saturation sur la résistance mécanique du béton

L'influence de la pré-saturation des granulats sur la résistance à la compression à 28 jours, sera déterminée en comparant les différentes résistances en compression trouvées des différentes confections effectuées.

Les éprouvettes des différents bétons sont démoulées 24h après la confection et sont plongées et conservées dans une piscine d'eau pendant 28 jours. Au bout de ces 28 jours, les éprouvettes sont retirées de l'eau, séchées et ensuite soumises à un essai de compression pour déterminer leur résistance à la compression.

Les résistances à la compression du béton réalisé avec des granulats secs et ceux aux granulats pré-saturés sont comparées.

Ainsi, une analyse comparative est réalisée pour mettre en évidence une éventuelle influence de la pré-saturation des granulats sur la résistance mécanique du béton.

2.9 CONCLUSION PARTIELLE

Ce deuxième chapitre présente les différents essais qu'on a effectués sur les matériaux ainsi que sur les bétons frais et durcis. Il présente aussi la méthode de Dreux Gorisse qui a été utilisée pour la confection du béton. Le chapitre qui suit présentera les résultats des essais sur les matériaux ainsi que ceux de la formulation des bétons.

CHAPITRE 3 PRESENTATION, ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

3.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à la présentation et l'analyse des résultats obtenus. Il contiendra premièrement la présentation des caractéristiques des constituants notamment celles des granulats et du ciment. Deuxièmement, il présentera les résultats de la formulation des bétons avec différents états de pré saturation ou non des granulats. Il s'agira enfin de la présentation de l'influence des états de pré saturation sur les caractéristiques des bétons.

3.2 CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS

3.2.1 Caractéristiques des granulats

A. Les masses volumiques

Le résultat de l'essai de détermination de la masse volumique absolue, apparente du sable et du gravier sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Masses volumiques des granulats

Matériaux	Masse volumique absolue en g/cm ³	Masse volumique apparente en g/cm ³
Sable roulé	3,125	1,540
Gravier concassé	2,72	1,33

B. Résultats de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée conformément à la norme NF P 18-560 dans le but d'évaluer la composition granulométrique de ces granulats, devant intervenir dans la détermination de la courbe granulométrique de référence. La figure 7 présente les courbes granulométriques du sable et des graviers.

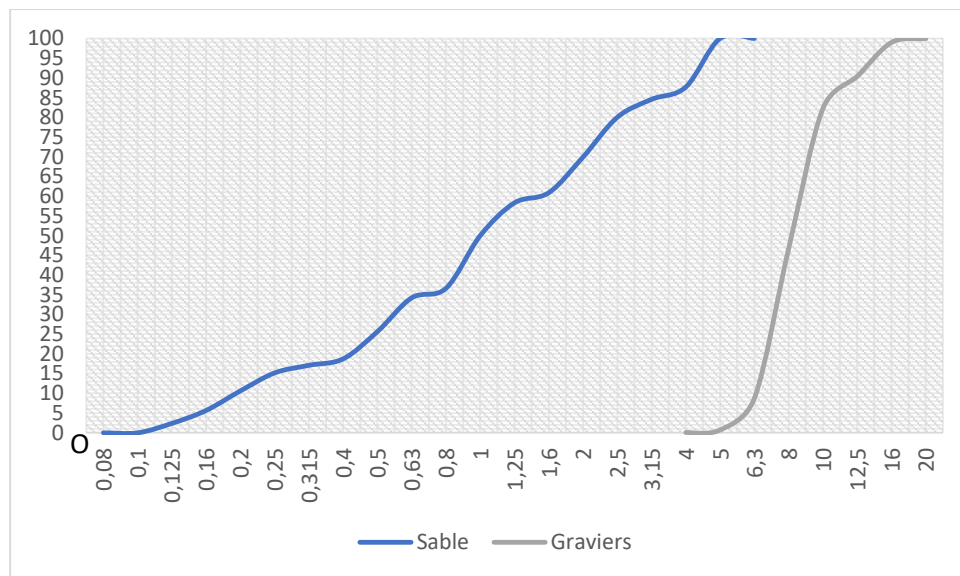


Figure 7 Analyse granulométrique des granulats

C. Module de finesse

Il a été calculé à partir de la formule (II.3)

La valeur trouvée du module de finesse M_f de ce sable est de 2,95.

On constate que $2,8 < M_f < 3,2$; donc ce sable est en manque d'éléments fins et perd en ouvrabilité du béton.

D. Equivalent de sable

L'équivalent de sable a été déterminé à partir de la norme NF P 18-598 et calculé à partir de la formule (II.6).

Le tableau 3.2 présente le résultat du degré de propreté du sable roulé d'Idjwi.

Tableau 3.2 Résultat du degré de propreté du sable roulé d'Idjwi

Essai	ES à vue	ES à piston	Moyenne en%
Équivalent de Sable	94,75	91.15	92.95

De ce résultats, nous avons $ES \geq 80$, ce sable est très propre et est donc bon à la formulation des bétons, cependant l'absence presque totale de fines argileuses risques d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau

E. Taux d'absorption

Le taux d'absorption des granulats a été déterminé par la formule (II.7).

Le tableau 3.3 présente les résultats du taux d'absorption du sable roulé d'Idjwi et des graviers concassés.

Tableau 3.3 Résultats du taux d'absorption des granulats

Granulat	Masse sèche	Masse humide	Taux d'absorption
Sable roulé	500g	515,5g	3,1%
Gravier concassé	800g	850,5g	6,3%

F. La porosité

La porosité des granulats a été calculée par la formule (II.8) et le tableau 3.4 présente les résultats de la porosité du sable roulé et le gravier concassés.

Tableau 3.4 Résultats de la porosité des granulats

Granulat	Masse sèche	Masse humide	Porosité(n)
Sable roulé	500g	515,5g	4,2%
Gravier concassé	800g	850,5g	9,7%

G. L'indice de vide

L'indice de vide des granulats a été calculé par la formule (II.11) et le tableau 3.5 présente les résultats de la porosité du sable roulé et le gravier concassés.

Tableau 3.5 Résultats d'indice des vides des granulats

Granulat	Masse sèche	Porosité(n)	Indice de vide(e)
Sable roulé	500g	4,2%	4,4%
Gravier concassé	800g	9,7%	10,7%

3.2.2 Caractéristiques du ciment

A. Masse volumique

La masse volumique du ciment utilisé est de 2,99g/cm³

B. Essai de consistance

Pour avoir la pâte normale, le ciment CIMERWA requiert une quantité en eau de 40%.

3.3 DOSAGE DES BETONS

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse a permis d'obtenir le dosage du sable, des granulats concassés, du ciment et de l'eau pour un mètre cube de béton.

Les données fondamentales des bétons d'étude à savoir la résistance souhaitée qui est la résistance en compression à 28 jours en Mpa, la résistance visée qui est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa, la consistance désirée.

Le type de vibration, la résistance du ciment, l'état des granulats ainsi que le diamètre du plus gros granulats sont reprises dans le tableau 3.6

Tableau 3.6 Données de la formulation du béton

Données de formulation du béton	
Résistance f_c 28	20MPa
Résistance moyenne f_m	23MPa
Affaissement	8cm
Type de vibration	Normal
Résistance vraie du ciment	40MPa
Coefficient granulaire	0,4
Dmax	16 mm

3.3.1 Détermination des dosages des constituants

3.3.1.1 Dosage en ciment et en eau

Le dosage en ciment a été déterminé par la formule (II.14). Le dosage en eau obtenu a été calculé suivant le rapport C/E et a été corrigé en fonction de D_{max} , dimension du plus gros granulat.

Pour les formulations avec l'un des granulats ou les deux se retrouvant à l'état de pré-saturation, les dosages en eau ont été trouvés respectivement par les formules (II.28), (II.26) et (II.24) car nous avons pris en compte la quantité d'eau coincée dans les granulats au préalable qui est l'eau de pré-saturation.

Le tableau 3.7 présente le dosage en ciment et en eau pour $1m^3$ des bétons formulés.

Tableau 3.7 Dosage en ciment et en eau pour $1m^3$

Dosage en	GS	Gs	Sg	gs
Ciment (kg/m^3)	373,326	373,326	373,326	373,326
Eau (L)	225,332	173,957	192,335	140,931

3.3.1.2 Dosage en granulats

A. Composition optimale

Le dosage des granulats est obtenu à partir du tracé de la courbe granulométrique de référence OAB. La figure 9 présente du tracé de la courbe granulaire de référence et la détermination du pourcentage du sable et des granulats concassés.

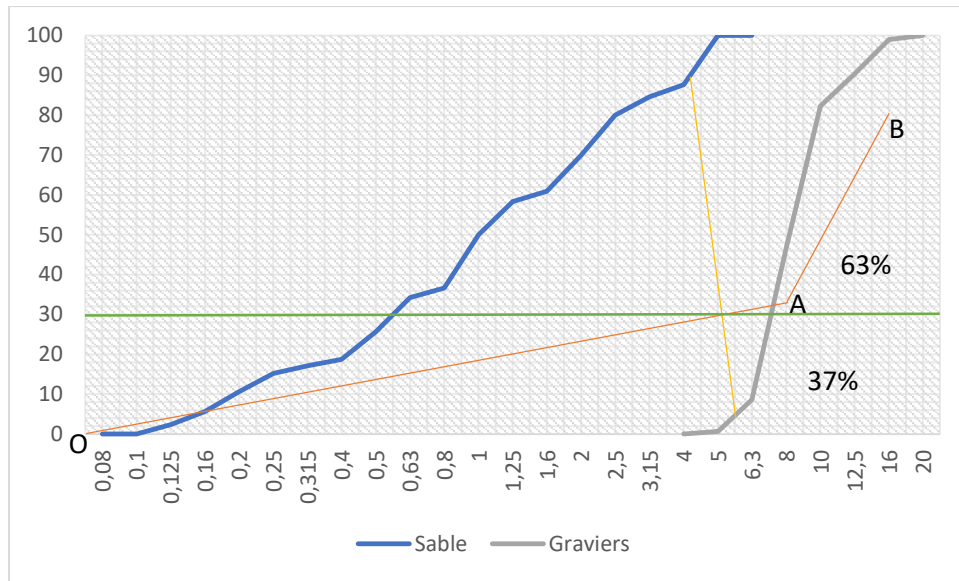


Figure 8 Tracé de la courbe granulométrique de référence

De cette courbe granulométrique, on déduit le pourcentage en sable et en granulats concassés qui sont respectivement de 37% et 63% dont le tableau 15 présente les résultats pour 1m^3 des bétons formulés.

B. Dosage massique des granulats

Tableau 3.8 Dosage massique des granulats pour 1 m^3 de béton

Granulat	GS	Gs	Sg	gs
Sable roulé (kg)	808,25	856,745	808,25	856,745
Gravier concassé (kg)	1067 ,88	1067 ,88	1099,916	1099,916

3.3.1.3 Dosage massique réduit des constituants pour trois éprouvettes

Nous avons fait la composition réduite à trois éprouvettes cylindriques 16 ×32cm, trois éprouvettes pour chacune des formulations aux états variés des granulats. Les éprouvettes utilisées ont un volume total de 0,01929216 m³.

En majorant, nous avons :

$$V = 0,01929216 + (20\% \text{ de } 0,01929216) = 0,02315059 \text{ m}^3$$

Le tableau 3.9 présente la composition réduite des constituants pour deux éprouvettes.

Tableau 3.9 Composition réduite des constituants pour trois éprouvettes.

Constituants	GS	Gs	Sg	gs
Ciment (kg)	8,63	8,63	8,63	8,63
Sable roulé (kg)	18,71	19,89	18,71	19,89
Gravier concassé (kg)	24,72	24,72	25,46	25,46
Eau(L)	5,21	4,02	4,45	3,26

3.4 CARACTERISTIQUES DES BETONS

3.4.1 Ouvrabilité des bétons

L'affaissement au cône d'Abrams a été réalisé conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-451.

Le tableau reprend les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams des bétons selon les différents dosages obtenus.

Tableau 3.10 Valeur d'affaissement des bétons

Béton	Dosage en eau réelle (L)	Affaissement (cm)
GS	7,21	7,6
Gs	4,70	7,1
Sg	5,80	7
gs	3,59	7,4

Le constat pour le tableau est que pour les bétons à granulats secs, pour atteindre la valeur d'affaissement désirée, le dosage en eau est plus élevé que lorsque l'un des granulats ou les deux se trouvent à l'état saturé au préalable.

Cela peut être mieux observé sur la figure 9

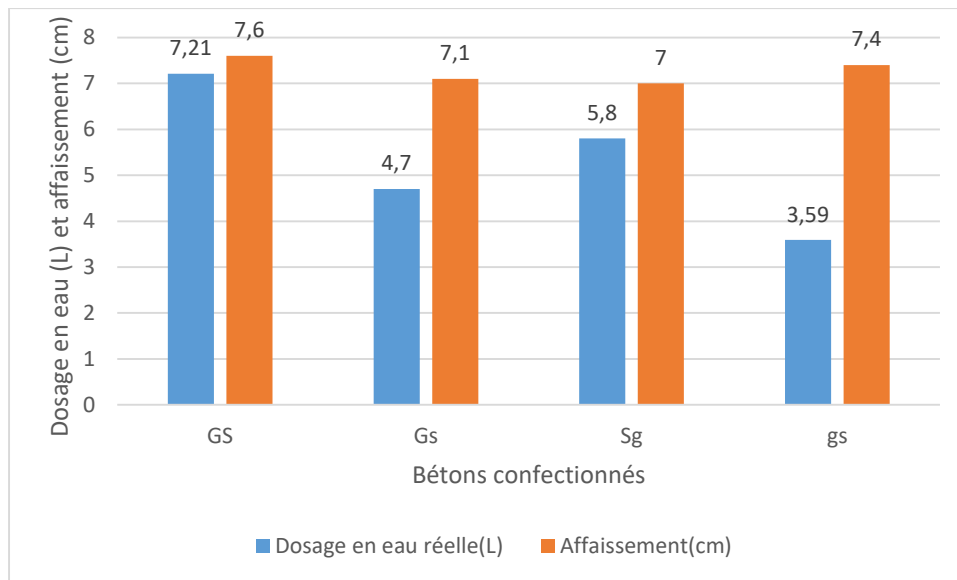


Figure 9 Dosage en eau réelle et affaissement

De ce qui précède, nous avons évalué le dosage en eau réelle en additionnant à l'eau calculée la quantité d'eau que nous avons ajoutée au mélange en vue de parvenir à la valeur d'affaissement souhaitée.

Le tableau 3.10 reprend les quantités d'eau calculées et celles ajoutées pour chacune des formulations.

Tableau 3.11 Evaluation du dosage en eau réelle

Dosage en eau	GS	Gs	Sg	gs
Eau calculée(L)	5,21	4,02	4,45	3,26
Eau ajoutée(L)	2	0,52	1,35	0,33
Eau totale(L)	7,21	4,70	5,80	3,59

3.4.2 Résistances des bétons

La détermination de la résistance à la compression a été réalisée conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12390-3. Les bétons obtenus ont été soumis à la compression 28 jours après leur confection et la figure donne les valeurs de la résistance à la compression.

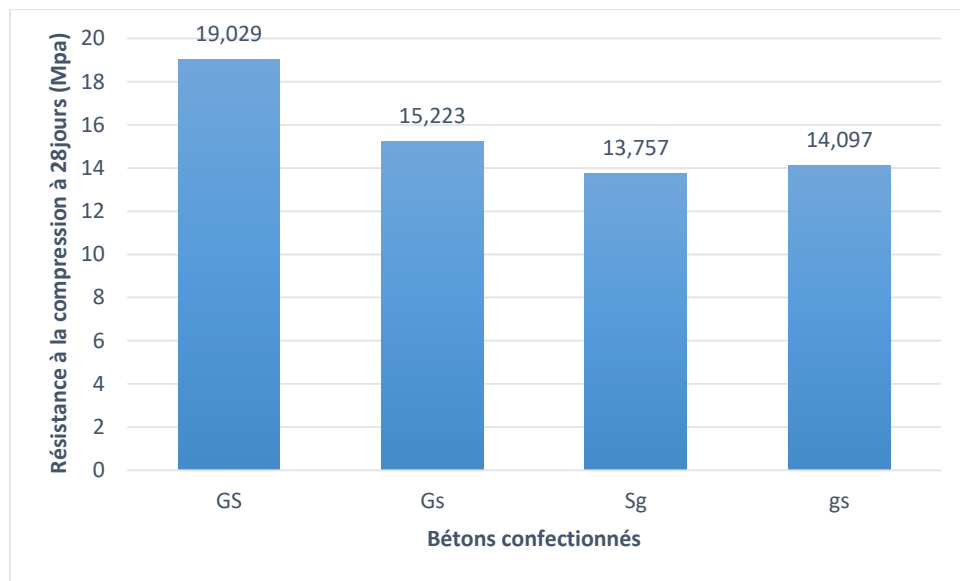


Figure 10 Résistance à la compression à 28 jours des bétons

Il ressort de la figure 10 que la résistance à la compression du béton varie suivant l'état des granulats. Il est observable que la résistance des bétons à granulats pré saturés est inférieure à celle du béton à granulats secs (tous les granulats secs).

3.4.3 Masses volumiques des bétons

La détermination de la masse volumique du béton a été effectuée sur différentes confections à l'état durci avant l'essai de résistance à la compression.

Le tableau présente les masses volumiques des bétons suivant les différents états des granulats.

Tableau 3.12 Masses volumiques des bétons

Masse volumique	GS	Gs	Sg	gs
A l'état durci (Kg/m ³)	2288	2271	2285	2263

Cela se visualise mieux par la figure 11.

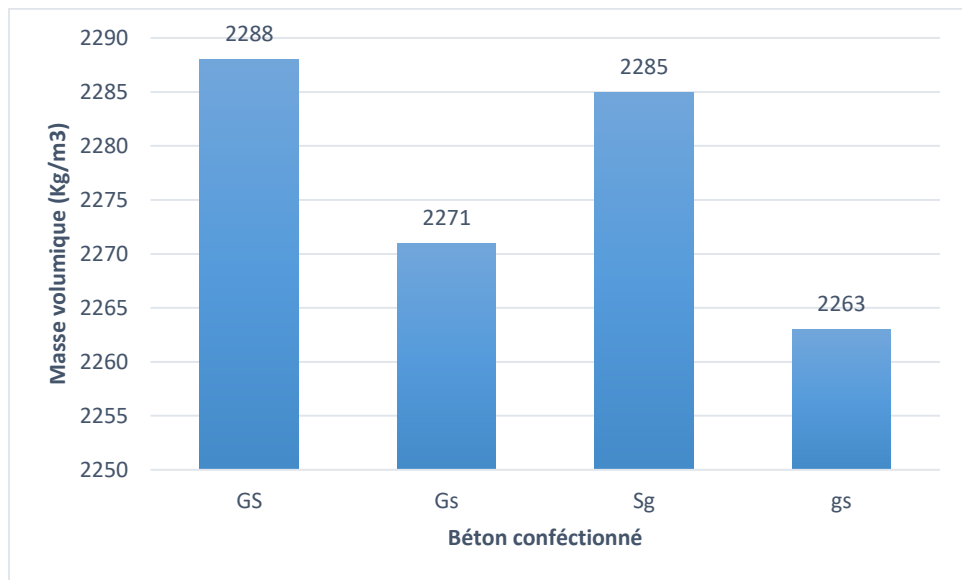


Figure 11 Masse volumique des bétons

Les résultats des masses volumiques à l'état durci, nous amènent à classer les bétons parmi les bétons lourds car $1800 \text{ Kg/m}^3 \leq \rho_{\text{béton}} < 2500 \text{ Kg/m}^3$.

3.5 INFLUENCE DE LA PRESATURATION DES GRANULATS SUR LES CARACTERISTIQUE DU BETON

3.5.1 Rhéologie du béton

➤ Pré saturation du sable (Gs)

L'étude de l'ouvrabilité du béton confectionné avec le sable pré saturé et les graviers secs, a été réalisée par l'évaluation de l'affaissement au cône d'Abrams, par variation du dosage en eau.

La figure 12 représente les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams du béton Gs.

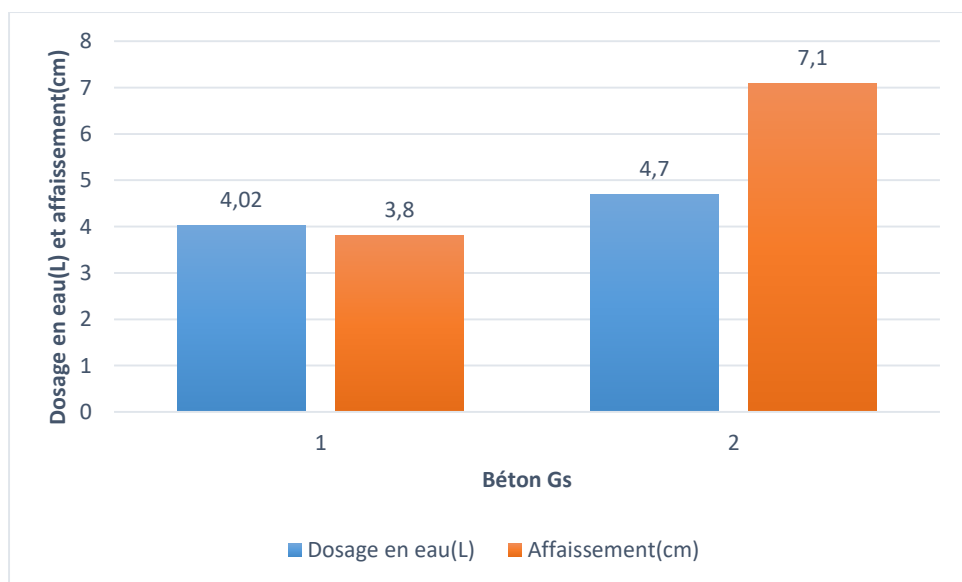


Figure 12 Evolution d'affaissement pour le Gs

En observant la figure 11, nous constatons que, pour le béton dont le sable est à l'état de pré-saturation, l'affaissement désiré n'est pas atteint avec le dosage en eau calculé. L'ajout en eau de 0,680 L, permet de passer du béton ferme au béton plastique, soit de 3,8 cm à 7,1 cm. Cela s'explique par le fait que dans ce béton, les graviers étant secs, ont eu à absorber une quantité d'eau ce qui n'a pas permis d'atteindre l'affaissement visé.

➤ Pré saturation des graviers (Sg)

Pour le béton confectionné avec les graviers pré saturés et le sable sec, l'étude de l'ouvrabilité a également été réalisée par l'évaluation de l'affaissement au cône d'Abrams, par variation du dosage en eau.

La figure 13 représente les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams du béton Sg.

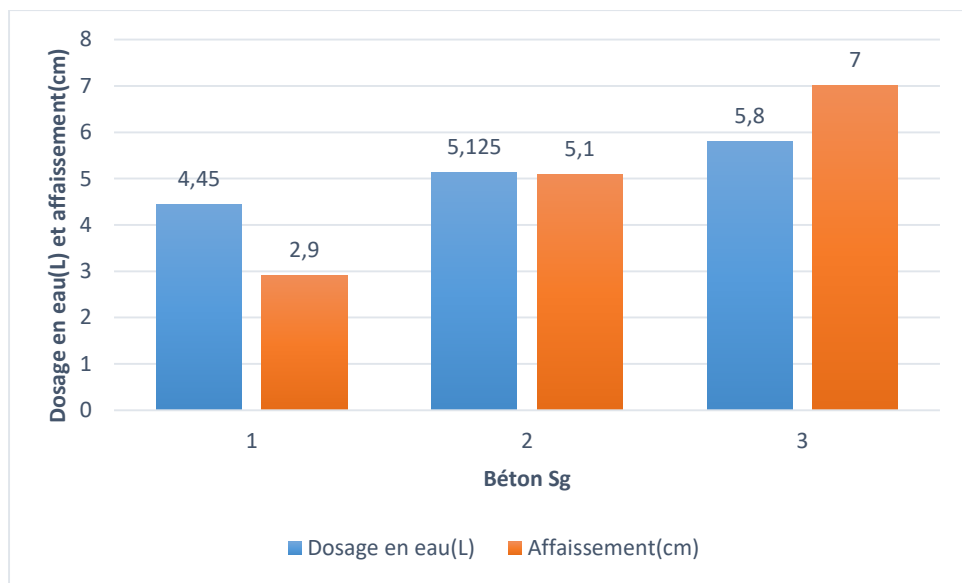


Figure 13 Evolution d'affaissement pour Sg

De la figure 12, nous constatons que, pour le béton dont les graviers sont à l'état de pré-saturation et le sable à l'état sec, l'ajout en eau de 1,35 L a permis de passer du béton ferme au béton plastique soit de 2,9 à 7cm. Cela s'explique par le fait que le sable étant sec, il a absorbé une quantité considérable d'eau d'apport, ce qui a nécessité un ajout en eau pour atteindre l'affaissement désiré.

➤ Pré saturation du sable et des graviers (gs)

Par l'évaluation de l'affaissement au cône d'Abrams, par variation du dosage en eau, nous avons fait l'étude de l'ouvrabilité du béton confectionné avec tous les granulats pré saturés.

La figure 14 représente les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams du béton gs.

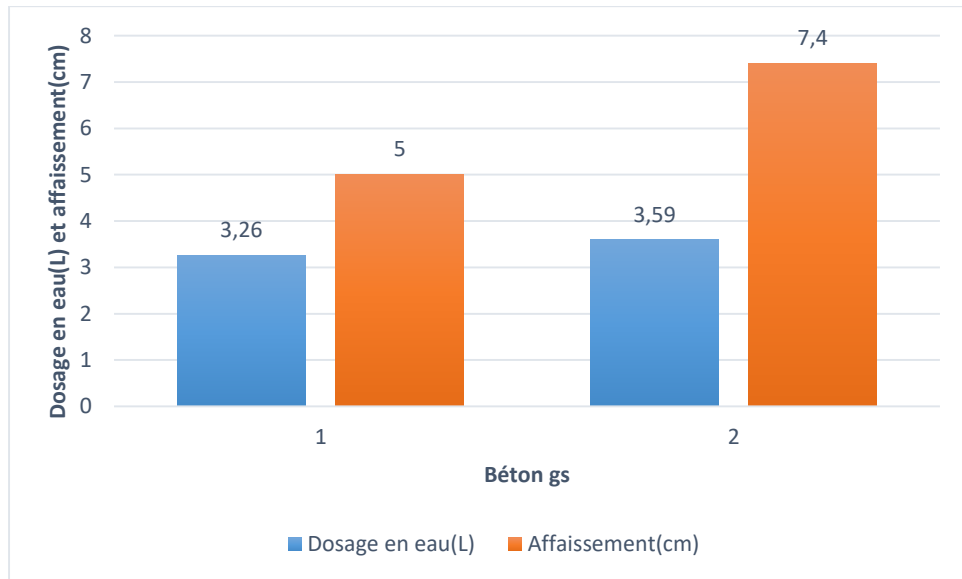


Figure 14 Evolution d'affaissement pour gs

De la figure 13, nous constatons que pour le béton à granulats pré saturés, nous obtenons, sans ajout en eau, un béton plastique avec un affaissement de 5cm. L'ajout en eau de 0,330L permet de passer de 5 à 7,4 cm d'affaissement.

3.5.2 Densité

La densité des bétons a été déterminée par les rapports des masses volumiques respectives à la masse volumique de l'eau qui est de 1000Kg/m³.

La figure 15 présente les valeurs de densité des différents bétons suivant les granulats qui sont pré-saturés.

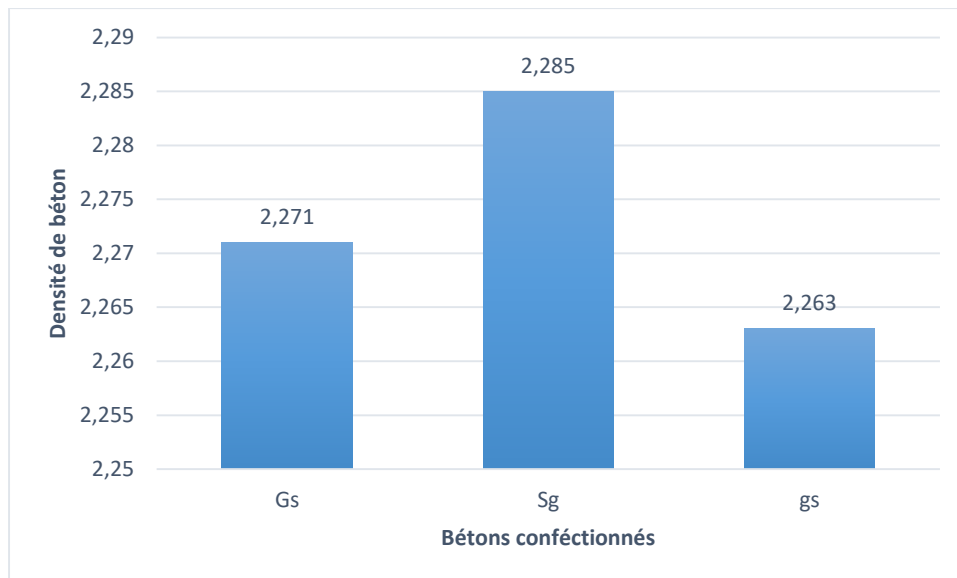


Figure 15 Densité des bétons

Les valeurs des densités montrent que les bétons confectonnés sont des bétons traditionnels car $2,2 \leq d < 2,4$.

3.5.3 Résistance mécanique

Chaque éprouvette des bétons à étudier est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La figure 10 présente les moyennes des différentes contraintes maximums et des résistances à 28 jours.

Il ressort du tableau que le béton dont le sable est pré saturé (Gs) a atteint une résistance moyenne à la compression de 15,223MPa, un peu plus supérieur à celles des bétons à granulats pré-saturés (gs) et à graviers pré-saturés (Sg) qui ont atteint respectivement une résistance moyenne de 14,097 et 13,757 MPa.

3.6 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents résultats des essais sur les matériaux, de dosage de chaque matériau obtenu à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse. Nous avons présenté les résultats sur l'essai de consistance des bétons directement lié à la variation du

dosage en eau, les masses volumiques ainsi que les résultats de l'essai des résistances à la compression des bétons à 28 jours. Le constat important effectué est tel que la pré-saturation des granulats, quoi que jouant en faveur de la consistance des bétons, influe négativement sur la résistance de ces derniers.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur l'étude de l'influence de la pré-saturation des granulats sur les propriétés du béton, notamment sa rhéologie et la résistance à la compression à 28 jours.

Il s'observe que les granulats d'origine volcanique de Goma présentent des nombreux pores si bien qu'ils peuvent regorger des quantités d'eau avant ou pendant la confection des bétons et cela en fonction de leur absorption liée à leur porosité. L'observation relative à la non-prise en compte de ce paramètre par les constructeurs, a initié la nécessité d'en évaluer l'influence sur les propriétés du béton. Pour ce faire, il a été premièrement question de caractériser les matériaux par des essais en laboratoire nous ayant permis de déterminer les paramètres tels que la granulométrie des granulats, le taux d'absorption, le module de finesse, l'équivalent de sable, les masses volumiques, la consistance du ciment. Ensuite, il a été question de formuler, par la méthode de Dreux-Gorisse et confectionner un béton plastique en variant l'état hydrique des granulats (graviers et sable secs ; graviers secs et sable pré-saturé ; graviers pré-saturés et sable sec ; graviers et sable pré-saturés). Enfin, nous avons effectué des essais sur les bétons confectionnés : l'essai de consistance au cône d'Abrams qui a permis d'évaluer la rhéologie des bétons en fonction de l'affaissement recherché dépendant à son tour du dosage en eau ; nous avons également évalué la résistance à la compression à 28 jours des différents bétons confectionnés. Ainsi il s'est observé que, l'affaissement du béton dont les graviers sont pré-saturés et le sable sec croit de 40%, celui dont les graviers sont secs et le sable pré-saturé croit de 52% et celui pour lequel les graviers et le sable sont pré-saturés croit de 70%, par rapport à l'affaissement du béton dont les granulats sont secs. Il s'est également observé que la résistance à la compression à 28 jours du béton décroît de 20% lorsque les graviers sont secs et le sable pré-saturé; elle décroît de 28% lorsque les graviers sont pré-saturés et le sable sec et lorsque les graviers et le sable sont pré-saturés, la résistance à la compression décroît de 26%.

Ces résultats nous indiquent que la pré-saturation des granulats peut influencer positivement la rhéologie du béton cependant au préjudice de la résistance à la compression du béton.

Les résultats obtenus dans ce travail ne peuvent pas s'étendre sur tous les autres matériaux. Ainsi donc, la perspective des travaux futurs pourrait s'orienter sur la même problématique tout en considérant soit les bétons ternaires, une méthode de formulation autre que celle de Dreux-Gorisse ou encore d'autres types de granulats.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Festa et G. Dreux, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris: EYROLLES, 2007.
- [2] A. N. Ally, «Influence du taux d'absorption d'eau des granulats sur les propriétés des mortiers et bétons,» *BLESSING PUBLISHERS*, 2019.
- [3] F. N. G. O. Chérif BISHWEKA, «Etude du coefficient d'absorption d'eau des granulats d'origine volcanique de Goma et son influence dans la formulation du béton,» *International journal of innovation and applied studies*, vol. 15, n° %11, pp. 141-152, 2016.
- [4] H. Solihu et A. Abdulkadir, «Influence of Pre-saturation of Gravel on the Mecanical Properties of Concrete,» *Journal of Building Material Science*, vol. 04, n° %101, 2022.
- [5] A. N. Freddy, «Etude de l'influence du taux d'absorption des granulats sur le dosage en eau,» ULPGL, Goma, 2022.
- [6] K. Sarah, «Etude de la revalorisation du verre dans le béton en vue du remplacement partiel des graviers par les calcins,» GOMA, 2021.
- [7] D. A. ALINABIWE, Cours de physique et technologie du béton; G3-GC, GOMA, 2021-2022.
- [8] Jounieh, Matériaux de construction, KASLIK: Université SAINT ESPRIT DE KASLIX.
- [9] D. Fouad, Science des matériaux de construction, Tlemcen: Université ABOU BEKR BELKAID.
- [10] D. I. H. Daniel, Syllabus du cours de Technologie du béton, Université du Burundi.
- [11] D. T. BOUBEKEUR, Matériaux de construction 01, Tissemsilt: Centre universitaire de Tissemsilt, 2017.
- [12] P. Fouad, Matériaux de construction, Tlemcen: Université Abou bekr belkaid.
- [13] M. Abdelkrim, «Etude de l'effet des adjuvants sur la durabilité des bétons,» Université du 8 Mai1945, Guelma, 2018.

- [14] M. G. OLEMBE, «Contribution à l'étude des matériaux couramment utilisés à Goma en vue de la confection des bétons,» ULPGL, Goma, 2017.
- [15] F.NGAPUE, Cours de technologie et physique du béton;G3 Genie Civil, 2016-2017.
- [16] Holcim, Guide pratique du béton. Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables, 2016.
- [17] B. K. Yvan, «Etude comparative des bétons autoplacants formulés à partir de la méthode de Dreux-Gorisse et celle de Bolomey,» ULPGL, Goma, 2021.
- [18] CIMBETON, «Les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre,» Paris, 2013.
- [19] Z. M. Landrine, «Etude comparative des bétons à granulats concassés et à granulats en calcin,» ULPGL, Goma, 2021.
- [20] N. P. N. F. 18-554, Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption d'eau et en teneur en eau des gravillons et cailloux, AFNOR, 1990.
- [21] N. F. N. P. 18-555, Granulats- Mesures des masse volumiques , coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, 1990.
- [22] 1.-5. N. F. X. P, Granulats-Détermination de la propriété des sables: équivalent de sable à 10%de fines, AFNOR, 1990.
- [23] D. R., L. R. et S.-A. JC, Granulats, sols, ciments et bétons, CASTEILLA, 1995.
- [24] Holcim, Guide pratique du béton.Concevoir et mettre en oeuvre des betons durables, 2016.
- [25] «GenieCivilPDF,» [En ligne]. Available: [www.GenieCivilPDF.com//Formulation des bétons: Méthode de Dreux-Gorisse](http://www.GenieCivilPDF.com//Formulation%20des%20bétons%20Méthode%20de%20Dreux-Gorisse). [Accès le Août 2024].
- [26] P. 1.-4. N. Française, Béton frais essai d'affaissement au cône, Béton et constituants du béton, T2 ciment et chaux, recueil de normes francaises AFNOR, 1990.
- [27] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [28] B. A. I. KHELIFA, «Corrélation entre fragmentation dynamique et aplatissement pour gravier roulé et comparaison avec gravier concassé,» Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.

- [29] P. GUIRAUD, «INFOCUMENTS,» Decembre 2020. [En ligne]. Available: <http://www.infociments.fr>. [Accès le 02 Aout 2024].
- [30] K. Louise, «Etude de l'influence de certains ajouts sur le ciment courant: cas des ciments utilisés dans la ville de Goma,» ULPGL, Goma, 2020.
- [31] M. G. Lionel, «Etude de l'influence de la substitution partielle du ciment par la cendre d'écorces de riz, sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons,» ULPGL, Goma, 2020.

ANNEXES

ANNEXES A TABLEAUX D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

1. Analyse granulométrique

i. Analyse granulométrique du sable

Numéro TAMIS		OUVERTURE (en mm)		REFUS CUMULES		TAMISAT	REMARQUE
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(%)	(%)	
1/4"	39	6,35	6,3	0	0	100	
3/16"	38	4,76	5	0	0	100	
5	37	4	4	308	12.32	87.68	
6	36	3,36	3,15	386	15.44	84.56	
8	35	2,38	2,5	500	20	80	
10	34	2	2	752	30.08	69.92	
12	33	1,68	1,6	978	39.12	60.88	
16	32	1,19	1,25	1042	41.68	58.32	
18	31	1	1	1250	50	50	
20	30	0,84	0,8	1584	63.36	36.64	
30	29	0,59	0,63	1644	65.76	34.24	
35	28	0,5	0,5	1858	74.32	25.68	
40	27	0,4	0,4	2031	81.24	18.76	
50	26	0,315	0,315	2072	82.88	17.12	
60	25	0,25	0,25	2120	84.8	15.2	
70	24	0,2	0,2	2234	89.36	10.64	
100	23	0,16	0,16	2358	94.32	5.68	
120	22	0,125	0,125	2440	97.6	2.4	
140	21	0,1	0,1	2500	100	0	
200	20	0,08	0,08	2500	100	0	

ii. Analyse granulométrique des graviers

Numero TAMIS		OUVERTURE (en 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	16	0,64	99,36	
1/2"	42	12,7	12,5	212	8,48	91,52	
3/8"	41	9,52	10	1166	46,64	53,36	
1/3"	40	7,93	8	2056	82,24	17,76	
1/4"	39	6,35	6,3	2404	96,16	3,84	
3/16"	38	4,76	5	2420	96,8	3,2	
5	37	4	4	2490	99,6	0,4	
6	36	3,36	3,15	2500	100	0	

ANNEXES B FORMULATION DU BETON

I. Données préalables

Résistance en compression à 28 jrs, $f_{c28} = 20\text{Mpa}$

Consistance du béton (Plastique), Affaissement $A = 8$

$D_{\max} = 16\text{ mm}$

Mode de vibration : Normal

Origine des granulats : Sable roulé et graviers concassés

Masse volumique abs des graviers = $2,427\text{ g/cm}^3$

Masse volumique abs du sable = $3,125\text{ g/cm}^3$

Masse volumique abs du ciment = 2,997 g/cm³

II. Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$f_{cm} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) [1]$$

Avec :

f_{cm} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa ; cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage. D'où :

$$f_{cm} = 1,15 \times f_{c28}$$

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

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa ; $\sigma'_c=40Mpa$

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G = Coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats ;

$$G= 0,47$$

De [1], On a :

$$23=0,47 \cdot 40 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$$\frac{C}{E}=1,723$$

III. Détermination de C

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

Pour des valeurs de C / E de 1,7 et un affaissement au cône de 8 cm, la quantité optimale de ciment nécessaire à la confection d'un mètre cube de béton est de 350 Kg.

En utilisant la formule suivante préconisée par la norme pour trouver la valeur du dosage minimal on a :

$$c = \frac{250 + 10 * fck}{\sqrt[5]{D}}$$

On a donc :

$$c = \frac{250 + 10 * 40}{\sqrt[5]{16}} = 373,326Kg$$

Comme le dosage minimal préconisée par la norme est supérieure que celui trouvé par la courbe, nous utiliserons le dosage trouvé par la formule préconisée par la norme, d'où

$$c=373,326kg$$

IV. Détermination de E

On a :

$$\frac{C}{E} = 1,723$$

$$c= 373,326 Kg$$

$$D'où E= 216,672 L/m^3$$

V. Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

Tracer de la droite brisée de référence

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux tracés de la droite de référence de Dreux :

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum des vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y_A ;

En abscisse :

Comme $D_{max} \leq 20 \text{ mm}$ $X = D_{max}/2$

$$X = \frac{16}{2} = 8 \text{ mm}$$

En ordonnée :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K'$$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés

K dépend du dosage en ciment, et du mode de vibration ; et pour notre cas, $K = +2$

Les valeurs de K' se déterminent par l'expression ci-après :

$$K' = 6MF - 15 \quad \text{car } MF = 2,94 > 2,5$$

$$K' = 6 * 2,94 - 15 = 2,64$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{16} + (2) + 2,64 = 41,36\%$$

La droite de Dreux a pour origine le point 0 du graphe et pour extrémité le point Dmax caractéristique des plus gros granulats

Après représentation, nous avons trouvées comme pourcentage de granulats, les valeurs ci-dessous :

% sable=37% et le % gravier=63%

VI. Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, et de gravier). Sa valeur de base γ est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre.

La valeur de la compacité γ du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V_{granulats} = \gamma V_{Tb} - \frac{C}{\rho_C}$$

Avec V_{Tb} = Volume total béton (1m³)

ρ_C = Masse volumique absolue ciment (2997kg/m³)

C = Dosage en ciment (373,326kg/m³)

γ Pour notre cas est compris entre 0,820 et 0,830 et après interpolation, nous trouvons une valeur de 0,824

$$V_{granulats} = 0,824 * 1 - \frac{373,326}{2997} = 0,699m^3$$

VII. Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats $V_{(granulats)}$ ou V et les pourcentages en volume absolu de sable (S %), et de gravier (G %), déterminons les volumes de sable (V_S), de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S et G) :

$$V_s = V * S\%$$

$$V_s = 0,699m^3 * \frac{37}{100} = 0,258m^3$$

$$MS = V_s * \rho_s$$

$$MS = 0,2586m^3 * 3125kg/m^3 = 808,125kg$$

$$V_G = 0,699m^3 * \frac{63}{100} = 0,440m^3$$

$$MG = 0,440m^3 * 2427 kg/m^3 = 1067,88kg$$

La correction en dosage en eau, étant de +4%, nous aurons donc

$$V_{eau} = 216,672 + (216,672 * 0,04) = 225,332 L$$

D'où, pour 1m³, nous avons :

- ✓ Mgravier= 1067,88 kg
- ✓ Msable= 808,25 kg
- ✓ Mciment= 373,326kg

$$\checkmark V_{\text{eau}} = 225,332L$$

Ce précédent dosage massique sera d'usage pour les granulats secs.

Pour ce qui est des granulats humides, c'est-à-dire les graviers concassés et le sable roulé sont tous à l'état humide, leurs quantités sont déterminées par :

- Masse de sable

$$Ms = MS * (1 + Ws)$$

$$Ms = 808,25kg * (1 + 0,06) = 856,745kg$$

- Masse de graviers

$$Mg = Md * (1 + Wg)$$

$$Mg = 1067,88 * (1 + 0,03) = 1099,916kg$$

- Eau

$$E - (Ws * Mhs) - (Wg * Mhg)$$

$$E_{ap} = 225,332 - (0,06 * 856,745) - (0,03 * 1099,916) = 140,931L$$

Avec :

Eap : Eau d'apport

E : Eau calculée

Ws : Teneur en eau du sable = 6%

Wg : Teneur en eau des graviers= 4%

Pour 1m³ on aura donc les quantités :

$$\checkmark M_{\text{gravier}} = 1099,916 \text{ kg}$$

✓ Msable=856,745 kg

✓ Mciment= 373,326kg

✓ Meau= 140,931L

Pour les graviers secs et le sable humide

▪ Masse de sable

$$Ms = MS * (1 + Ws) = 856,745kg$$

▪ Masse de graviers secs

$$MG = Vg * \rho_G = 1067,88 \text{ kg}$$

▪ Eau d'apport

$$Eap = E - (Ws * Mhs)$$

$$Eap = 225,332 - (0,06 * 856,745) = 173,957L$$

Pour 1m3 on aura donc les quantités :

✓ Mgravier= 1067,880 kg

✓ Msable= 856,745 kg

✓ Mciment= 373,326kg

✓ V eau= 173,957L

Pour les graviers humides et le sable sec

▪ Masse de sable sec

$$MS = Vs * \rho_S = 808,25kg$$

- Masse de graviers humides

$$Mg = MG * (1 + Wg) = 1099,916kg$$

- Eau d'apport

$$Eap = E - (Wg * Mhg)$$

$$Eap = 225,332 - (0,03 * 1099,916) = 192,335L$$

Pour 1m³ on aura donc les quantités :

- ✓ Mgravier= 1099,916 kg
- ✓ Msable= 808,25 kg
- ✓ Mciment= 373,326kg
- ✓ V eau= 192,334L