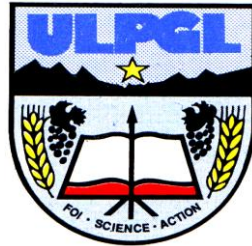


**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**ETUDE DE L'EFFET DE LA SUBSTITUTION PARTIELLE DU SABLE
PAR LES LIMAILLES DE FER SUR LES PROPRIETES DU BETON**

Par **MUMBERE MUHINGIRWA Daniel**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
licence en Sciences de l'ingénieur.

Option : Génie civil

Directeur : Prof. Dr. Ir. BISHWEKA CHERIFF

Encadreur : CT Ir MASIKA MUHIWA Grâce

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 – 2024

Épigraphe

« La durabilité d'un matériau réside non seulement dans ses propriétés physiques, mais aussi dans son impact sur l'environnement »

Prof. Dr. Michael F. Ashby

Dédicace

À mes très chers parents, KAKULE KAMATHE ROGER et KAHAMBU KITSA SEMIDA.

MUMBERE MUHINGIRWA Daniel

Par l'étudiant Mumbere muhingirwa daniel

Remerciements

Au terme de cet ouvrage, fruit d'élans combinés d'origine diverses, qu'il nous soit permis d'adresser nos remerciements à ceux qui, de près ou de loin, ont posé une prière à la réalisation de cet édifice.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu tout puissant, pour toutes grâces dont nous jouissons sur cette terre. Que lui soient rendus gloire et adoration.

Nous avons l'insigne honneur de gratitude adressé au Prof. Dr. Ir BISHWEKA CHERIFF de s'être rendu disponible, malgré ses occupations multiples, pour diriger le présent travail ; à la CT. Ir. Grace MUHIWA MASIKA qui a pu donner de son temps pour l'encadrement de ce travail ; à tout le corps professoral de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'ULPG, qui, par son accueil, a contribué à notre formation avec beaucoup de pédagogie et de patience.

Nos sincères remerciements à nos parents, à nos frères, à nos sœurs, pour nous avoir entouré d'une affection abyssale et appris que la vie est un perpétuel combat.

À tous nos camarades et amis qui ont fait de ce parcours une expérience inoubliable, nous adressons notre profonde reconnaissance.

A tout personne de bonnes volontés qui a contribué à la réalisation de ce travail, nous disons merci sincèrement.

MUMBERE MUHINGIRWA Daniel

Par l'étudiant Mumbere muhingirwa daniel

Résumé

La réutilisation des déchets industriels offre une solution aux problèmes économiques et environnementaux, en valorisant les ressources locales pour la formulation d'un béton aux caractéristiques comparables ou supérieures aux bétons usuels. Dans ce contexte, ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale qui consiste à l'incorporation des limailles de fer provenant des travaux du tournage et l'évaluation de leur influence dans le béton ordinaire. Dans cette étude, nous avons réalisé une série d'expériences pour évaluer l'impact de la substitution partielle du sable par les limailles de fer sur les propriétés du béton. Des mélanges de bétons ont été préparés avec différents pourcentages de substitution notamment 0%,10%,20%,30%,40 %et 50%. Chaque mélange a été soumis à des essais de caractérisation, entre autres la résistance à la compression, la densité. Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des bétons à base des limailles de fer présentant des propriétés mécaniques et physiques intéressantes. Notons que l'incorporation des limailles de fer non traitées dans le béton étudié entraîne une diminution de la résistance mécanique à la compression et une augmentation du pouvoir hydrique mais elle permet de diminuer la densité du béton. De ce fait, l'utilisation des limailles de fer peut servir à la confection des bétons légers suite à sa densité qui varie entre $0,5 \ll \rho \ll 1,5$.

Mots clés : Limailles de fer, Béton, Résistance à la compression.

Abstract

The reuse of industrial waste offers a solution to economic and environmental problems, by valuing local resources for the formulation of concrete with comparable or Superior characteristics of the usual concrete. In this context, this work presents the results of an experimental study which consists in the incorporation of iron swallows from filming work and the evaluation of their influence in ordinary concrete.

In this study, we have carried out a series of experiences to assess the impact of the sand by iron filings on the proprieties of concrete mixtures have been prepared with different substitution percentages notably 0%,10%,20%,30%,40% and 50%. Each mixture has been subjected to characterization tests, including compression resistance, density.

The results show that it is possible to obtain concrete based on iron filing with interesting mechanical and physical properties. As a result, the use of iron filings can be used to make light following his density which varies between 0,5 and 1,5.

Keywords : iron filings, concrete, compression resistance.

Table des matières

Épigraphe	1
Dédicace.....	2
Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Abstract	5
Table des matières.....	6
Liste des abréviations et symboles.....	10
Liste des tableaux.....	12
Liste des figures	13
Introduction générale	14
Chapitre 1 : Généralités sur le matériau béton et les déchets de fer.....	17
1.1 Introduction	17
1.2 Généralités sur le matériau béton	17
1.2.1 Constituants du béton.....	17
1.2.2 Ciment portland	18
1.2.1 Adjuvants	20
1.2.2 Eau de gâchage	20
1.2.3 Granulats	21
1.3 Typologie des bétons.....	26
1.3.1 Typologie de béton selon la destination.....	26
1.3.2 Typologie des bétons selon la masse volumique	27
1.4 Typologie des bétons selon la résistance à la compression.....	28
1.5 Pathologie du béton.....	29
1.5.1 Les pathologies physico-chimiques :	29

1.5.2	Les pathologies mécaniques	30
1.6	Quelques méthodes de formulation du béton.....	31
1.6.1	Méthode de Dreux-Gorisse	31
1.6.2	Méthode de Bolomey	31
1.6.3	Méthode de Faury	32
1.6.4	Méthode d'Abrams	32
1.6.5	Méthode de Caquot	33
1.6.6	Méthode de valette	33
1.6.7	Méthode de joisel.....	33
1.7	Généralités sur les déchets de fer	34
1.7.1	Déchets.....	34
1.7.2	Fer	35
1.8	Type de déchets de fer.....	35
1.8.1	Les copeaux de fer	35
1.8.2	Limaille de fer.....	36
1.8.3	Granulats de fer.....	37
1.9	Conclusion partielle.....	38
Chapitre 2 . Méthodologies.....		39
2.1	Introduction	39
2.2	Composants granulaires	39
2.2.1	Graviers.....	39
2.2.2	Sables	39
2.2.3	Limailles de fer	39
2.3	Essais de caractérisation des matériaux	39
2.3.1	Ciment.....	40
2.3.2	Le granulats	40
2.4	L'essai Los Angeles	50
2.5	Caractérisation des limailles.....	51
2.5.1	Substitution partielle de sable par les limailles de fer.....	51
2.6	Formulation du béton	52
2.6.1	Méthode de Dreux -Gorisse	52

2.6.2	Différents dosages.....	54
2.7	Propriétés du béton.....	59
2.7.1	Propriété du béton à l'état frais.....	59
2.7.2	Propriétés du béton à l'état durci.....	61
2.8	Résistance à la compression du béton.....	62
2.9	Le pouvoir hydrique du béton.....	62
2.10	Eau de gâchage.....	63
2.11	Conclusion partielle.....	63
Chapitre 3 Présentation et interprétation des résultats.....		64
3.1	Introduction.....	64
3.2	Caractéristiques des constituants.....	64
3.2.1	Ciment.....	64
3.2.2	Résultat sur le ciment.....	64
3.3	Les granulats.....	64
3.3.1	Analyse granulométrique par tamisage.....	65
3.3.2	Degré de propreté du sable.....	66
3.3.3	Masse volumique absolue et apparente des granulats.....	67
3.3.4	Essai los Angeles du gravier.....	67
3.4	Résultats de la formulation.....	68
3.5	Densité.....	72
3.5.1	Ouvrabilité.....	72
3.5.2	Masse volumique du béton à l'état frais.....	73
3.6	Propriétés des bétons à l'état durcis.....	74
3.6.1	Masse volumique du béton durcis.....	74
3.6.2	Pouvoir hydrique.....	76
3.6.3	Resistance a la compression.....	76
3.7	Conclusion partielle.....	77
Conclusion générale.....		79
Bibliographie.....		81

ANNEXES 83

Liste des abréviations et symboles

Abréviations

AG : Analyse granulométrique

BO : Béton Ordinaire

BTHP : Béton à très haute performance

BN : Béton ordinaire chargé des limailles de fer non traités

CLA : Coefficient Los Angeles

C/E : Rapport Ciment sur Eau

EN : European Norm

ES : Équivalent Sable

F : Force

MF : Module de Finesse

KN : Kilo Newton

Mpa : Méga pascal

NF : Norme française

P : Poids

REGIDESO : Régime de distribution d'Eau

IF : Limailles de fer

ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

Symboles

C : Dosage en ciment

D_{max} : Diamètre du plus gros granulat

d_{min} : Diamètre du plus petit granulat

E : Dosage en eau

e : Épaisseur

G : Coefficient granulaire

g : Gramme

g/cm³ : Gramme par centimètre cube

h : hauteur

kg : kilogramme

KN : Kilo Newton

m : masse

mm : millimètre

P_g : Masse du gravier

P_s : masse du sable

rs : Proportion en sable

rg : Proportion en gravier

σ_c' : Classe vrai du ciment

σ₂₈ : Résistance en compression du béton après 28jours

σ_n : Résistance désirée en compression

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

ρ_{app} : Masse volumique apparente

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1: Classification des granulats [7]</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 1-2. Classification des bétons selon la résistance à la compression [7]</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 2-1: valeurs préconisées de l'équivalent de sable [7]</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 2-2: valeurs du coefficient granulaire G [9].....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 2-3: Valeur du coefficient correcteur en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité [1]</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 2-4 : valeur du coefficient de compacité [7].....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 2-5 : Classe de consistance des bétons [7]</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3-1: Les masses volumiques absolues et apparentes des granulats utilisés</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 3-2 : Données de base et hypothèse du travail</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 3-3 : Substitution partielle du sable et ajout des limailles</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 3-4 : Dosage des constituants en Kg/m³ pour chaque type de béton.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 3-5 : Dosage des constituants en Kg dans des éprouvettes cylindrique</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 3-6 : Variation de la proportion d'eau</i>	<i>73</i>

Liste des figures

Figure 1-1 : Constitutions du béton [7]	18
Figure 1-2 : Évaluation physico-chimique de la pâte de ciment [7]	19
Figure 1-3 : Granulats et sable roulés [7].....	22
Figure 1-4 : Granulats concassés [7].....	23
Figure 1-5 : Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après short et kinniburg [9]	27
Figure 1-6 : Classification des bétons légers [1].	28
Figure 1-7 : Échantillons copeaux de fer [10].....	36
Figure 1-8 : Échantillons limailles fer [10].....	36
Figure 1-9 : Les granulats fer [15]	37
Figure 2-1: Courbe granulométrique de quelques granulats [7]	42
Figure 2-2 : Lecture en piston de h_1 et h_2 [7].....	43
Figure 2-3 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir sur base du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée. [7].....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2-4 : Courbe de référence OAB [9].....	56
Figure 2-5 : Détermination de l'affaissement au cône d'Abrams	60
Figure 3-1 : Courbe granulométrique du sable.....	65
Figure 3-2 : Courbe granulométrique du Gravier concassé 15-25.....	66
Figure 3-3 : Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement recherchée.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3-4 : Traçage de la courbe optimale de Dreux	69
Figure 3-5 : Valeur de l'affaissement des différents bétons utilisés.....	72
Figure 3-6 : Évaluation des masses volumiques du béton a l'état frais	74
Figure 3-7 : Évaluation des masses volumiques a l'état durci.....	75
Figure 3-8 : Évaluation du pouvoir hydrique du béton a l'état durcis	76
Figure 3-9 : Évaluation de la résistance à la compression	77

Introduction générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé. C'est une pierre artificielle produite par une certaine technique et non par la nature. Il est composé de liants, dont des granulats, et d'adjuvants choisis de manière rationnelle [1].

Cependant l'importance de ce dernier à entraîner une demande croissante et des impacts environnementaux.

Pour pallier à ces inconvénients, des matériaux industriels tels que les cendres résiduelles du charbon, les cendres volantes et la limaille de fer sont utilisés comme substituts aux granulats fins [2].

La limaille de fer, générée comme sous-produit dans les ateliers et les fonderies, peut être recyclée pour éliminer les déchets et réduire la pollution environnementale, tout en améliorant le résultat en matière de production de béton à un prix abordable [3].

À Goma, le fer est un matériau couramment utilisé dans des nombreuses applications notamment dans la construction d'ouvrages de génie civil.

La limaille de fer issue de sa transformation est un élément important car le fer est une ressource renouvelable et inépuisable.

L'utilisation de la limaille de fer semble être une alternative permettant de contribuer à une résistance accrue au béton en raison de sa haute teneur en magnétique Fe_3O_4 [4], à réduire la corrosion des armatures en béton en formant une barrière protectrice contre l'oxydation et la corrosion, à l'écologie, à l'isolation et à l'esthétique.

Une fois le fer utilisé dans le béton, on obtient un matériau composite généralement composé d'une matrice de ciment et des charges végétales de forme granulaire et adjuvant [1].

Des nombreux chercheurs à l'instar de CHATURVEDI et COLL(2018) ; JR Khatri et AL(2017) ; MS Islam(2013) ont étudié les caractéristiques physiques, mécanique et thermique des bétons légers à base des limailles de fer ([4]; [1]; [3]). C'est dans le même contexte que s'inscrit le présent travail visant à analyser l'influence de la substitution partielle du sable par la limaille de fer sur les performances du béton.

Vu ce qui précède dans la présente recherche, il sera indispensable de répondre aux questions suivantes :

- ❖ Quelle est l'influence des limailles de fer sur la masse volumique, l'affaissement et la résistance mécanique du béton ?
- ❖ Quelle est l'influence de la limaille de fer sur le pouvoir hydrique du béton ?
- ❖ Quelles sont les effets de l'incorporation de limailles de fer sur la prise et le durcissement du béton ?

Face aux questions de recherche soulevées, les hypothèses suivantes sont postulées :

- L'incorporation des limailles de fer comme agrégat léger, diminuerait la masse volumique, l'affaissement ainsi que la résistance du béton.
- L'incorporation des limailles de fer augmenterait le pouvoir hydrique du béton.
- La modification des propriétés du béton par les limailles de fer est indépendante de la granulométrie et de la quantité de limailles ajoutées.

L'objectif de ce présent travail est d'analyser l'influence de la substitution du sable par les limailles de fer sur les propriétés du béton obtenu.

Pour atteindre cet objectif global, les objectifs spécifiques sont les suivants :

- ✚ Analyser les variations du comportement du béton à l'état frais et à l'état durci suite à l'incorporation des limailles de fer, en prenant comme indicateur respectivement l'affaissement et la résistance en compression à 28 jours.
- ✚ Analyser le taux d'absorption du béton à l'état durci pour les différents taux de substitution par les limailles de fer.

Eu égard à l'objectif du présent travail, les intérêts de cette étude semblent multiples, entre autres :

- Réduire l'impact environnemental en recyclant les limailles de fer issues de la ferraille ou de l'industrie métallurgique, tout en contribuant à la réduction des déchets et à préserver les ressources naturelles.
- Réduire les coûts de production en utilisant les matériaux de substitution moins coûteux que le sable, il est possible de réduire le coût du béton.
- Améliorer les propriétés mécaniques du béton en substituant partiellement le sable par les limailles de fer.

Pour mener à bien ce travail, plusieurs méthodes seront utilisées, notamment :

Par l'étudiant *Mumbere muhingirwa daniel*

La méthode documentaire permettant de consulter la documentation disponible sur le sujet. Cela inclue la documentation sur le béton et la limaille de fer pour comprendre ce qui a déjà été fait dans la littérature, les méthodes qui ont été utilisés permettant ainsi de se démarquer des travaux antérieurs.

La méthode expérimentale, par les essais (Analyse granulométrique ; degré de propreté ; masse volumique apparente et absolue ; Los Angeles ; ouvrabilité ; compression ; pouvoir hydrique) qui seront effectués dans les laboratoires de génie civil de l'ULPG-Goma en vue de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux étudiés.

- La méthode analytique pour formuler le béton. Dans le cadre de ce travail, la méthode Dreux-Gorisse a été utilisée.

Outre l'introduction générale et la conclusion générale, le présent travail est reparti en 3 chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur le béton et les limailles de fer de manière plus détaillée.
- Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie.
- Le troisième chapitre se concentre sur la présentation des résultats ainsi que leurs interprétations.

Chapitre 1: Généralités sur le matériau béton et les déchets de fer

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous traiterons le matériau « *béton* » ; un mélange obtenu en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau, de granulats et éventuellement des adjuvants [1]. C'est la dimension D du plus gros granulats qui détermine l'appellation de celui-ci. Ainsi, lorsque D est supérieur à 4mm on parle du béton, tandis que lorsqu'il est inférieur à 4mm, on parle du mortier tout simplement. Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton tandis que le ciment et l'eau forment la pâte liante [5].

On appelle « *limaille de fer* »; les déchets ou les matériaux mis au rebut produit couramment dans les industries ou les usines mécaniques augmentent quotidiennement ; constituant ainsi une pollution accrue de l'environnement. La limaille de fer qui est un sous-produit du broyage, du limage ou du broyage du produit fini en fer [6].

Notons que les déchets (limailles de fer), non biodégradables présentent un risque environnemental important pour les organismes vivants et leur élimination nécessitant des efforts, du temps et de l'argent [4].

1.2 Généralités sur le matériau béton

1.2.1 Constituants du béton

Comme le montre la figure (1-1) ; les principaux constituants du béton sont : les granulats, le liant, l'air, l'eau et éventuellement les adjuvants.

Chaque constituant joue un très grand rôle dans la fabrication du béton et ses caractéristiques influent sur les propriétés et la destination du matériaux [7].

Dans cette partie nous présentons les constituants du béton ordinaire dans une approche détaillée.



Figure 1-1 : Constitutions du béton [7]

1.2.2 Ciment portland

C'est un liant hydraulique qui durcit et conserve ses propriétés mécaniques non seulement à l'air mais dans l'eau.

Comme tout autre liant, le ciment a pour but d'assurer la liaison entre ; les granulats dans le béton et les éléments d'une structure.

1.2.2.1 Caractéristiques du ciment portland

a. Prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat). Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels que : la nature du ciment, la finesse de mouture du ciment, ...

b. Durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter [12]. La figure (1-2) montre l'évolution physico-chimique de la pâte du courant du ciment.

La figure (1-2) nous présente l'évaluation physico-chimique de la pâte de ciment visant à caractériser ses propriétés fondamentales afin de comprendre l'impact de la substitution partielle du sable par les limailles de fer. Cette étape est cruciale pour assurer la compatibilité et la performance du béton modifié.

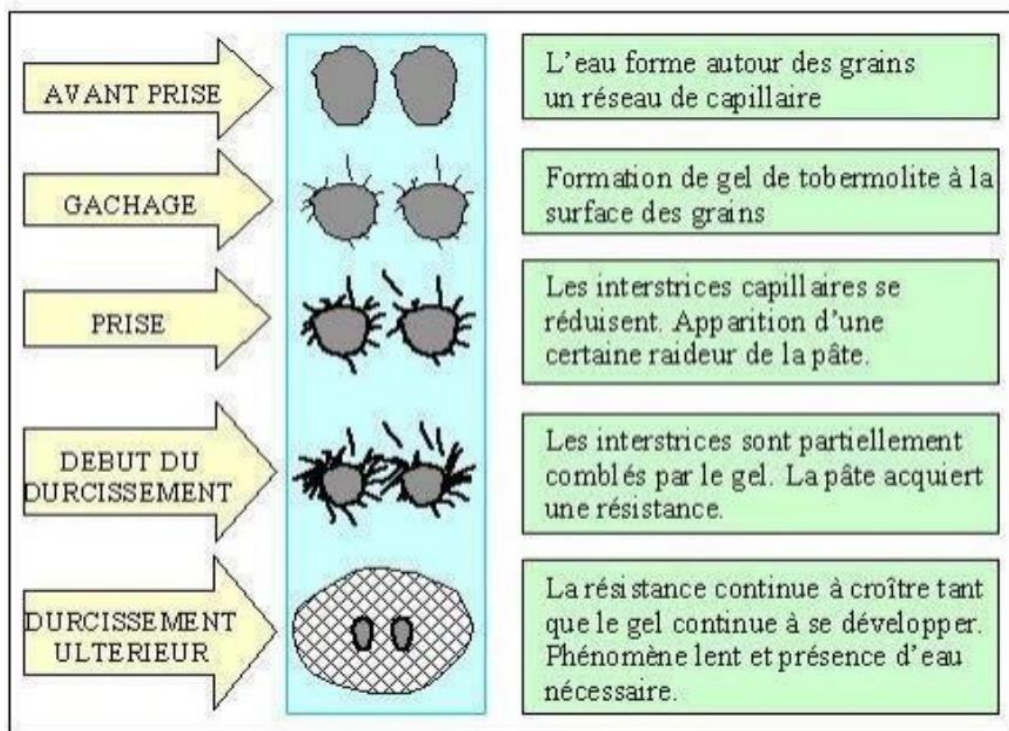


Figure 1-2 : Évaluation physico-chimique de la pâte de ciment [7]

1.2.1 Adjuvants

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale unique. Il est caractérisé par la modification majeure qu'il apporte aux propriétés du béton à l'état frais ou durci. Cette fonction peut varier selon le dosage de l'adjuvant et les matériaux utilisés.

En plus de sa fonction principale, un adjuvant peut avoir une ou plusieurs fonctions secondaires (ex : plastifiant-retardateur, retardateur -plastifiant-réducteur d'eau). Un adjuvant n'est pas palliatif.

Il n'a ni pour effet ni pour mission de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage, d'une mauvaise composition ou d'une mise en œuvre défectueuse. Bien au contraire il peut avoir des effets secondaires néfastes au béton [11].

1.2.2 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'un des éléments nécessaires dont il faut tenir compte lors de la confection du béton [12]. Elle déclenche l'hydratation du ciment qui conduit à la prise et au durcissement du béton.

Son dosage optimal dépend de plusieurs paramètres (surtout le dosage en ciment et la consistance du béton) et permet de faciliter la maniabilité du béton. D'une manière générale le dosage en eau varie entre 140 et 210 l/m³ [10]. Et il est souhaitable que le rapport C /E soit compris entre 1,66 et 2,5 [12].

Notons que l'excès tout comme l'insuffisance d'eau de gâchage dans le béton, entraînent des désordres non négligeables tels que [12]: le retrait, la fissuration, la ségrégation des granulats et des chutes de la résistance mécanique. L'eau de gâchage doit satisfaire à certaines propriétés régies par la norme française NFEN-100 notamment :

- Elle doit être potable et ne doit contenir ni des particules en suspension ni des matières organiques au-delà d'une certaine valeur.
- Le degré de salinité (teneur en chlorure de sodium) doit être le plus faible possible avec une de la proportion de chlorure de sodium qui ne doit excéder 30mg/litres

1.2.3 Granulats

Les granulats constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air [8].

Ils sont constitués de sables (Gros et fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton [7].

1.2.3.1 Classification des granulats

Les granulats sont classés selon plusieurs critères notamment leur origine, masse volumique (réelle, absolue, apparente), coupure granulométrique ou granularité [7].

i. Selon leur origine

On distingue :

a. Granulats naturels

Lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine, et n'ayant subi aucune transformation autre mécanique (concassage, criblage ...) À ce stade on a : les granulats alluvionnaires dits roulés et granulats concassés dits de carrière [9].

➤ Granulats roulés ou alluvionnaires

Les granulats roulés sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se forment des dépôts sédimentaires de grains de grosseurs allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes.

Notons trois catégories de granulats existant dans la nature, entre autres :

- Les granulats de rivière (d'oued),
- Les granulats de mer
- Les granulats de dunes.

La figure (1-3) montre les granulats issus du processus de concassage et de tri roche naturelles, qui ont subi un processus de roulage lors de leur fabrication. Ce procédé confère à ce granulats une surface généralement plus lisse et une forme arrondie, favorisant une meilleure cohésion dans le béton. Le sable roulé quant à lui, désigne un sable dont la surface a été modifiée par un processus

de roulage ou de traitement mécanique. Ce type de sable est souvent utilisé pour améliorer la fluidité du béton et réduire la consommation d'eau grâce une meilleure capacité de compactage.



Figure 1-3 : Granulats et sable roulés [7]

1.2.3.2 Granulats concassés (de carrière)

Les granulats concassés (de carrière) ils proviennent du concassage de roches dures (granit, porphyre, basaltes, calcaire durs...etc.). Ils sont caractérisés par un caractère anguleux à arêtes vives [7].

Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leurs textures de surface et leur rugosité [9]. La figure (1 :4) montre un exemple de granulats concassés.

La figure (1-4) présente les granulats concassés issus de la fragmentation mécanique de roches naturelles ou de matériaux de carrières, tels que le granites, le calcaire ou basaltes. Ces granulats sont caractérisés par leurs duretés, leur forme angulaires ainsi que leurs surfaces rugueuses, ce qui favorise une meilleure adhérence dans le mélange du béton.



Figure 1-4 : Granulats concassés [7]

A. Les granulats artificiels

Ils sont issus de la transformation thermique et mécanique de roches ou de minérales [7]. Ils sont regroupés en différent sous-groupes notamment les sous-produits industriels (concassés ou non) ; les granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement, les granulats allégés par expansion ou frittage et les granulats très légers [9].

➤ Les sous-produits industriels (concassés ou non)

Le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau sont les sous-produits industriels (concassés ou non) les plus utilisés. Leur masse volumique apparente est supérieure à 1250kg/m^3 pour le laitier cristallisé concassé, supérieur à 800kg/m^3 pour le granulé [9].

➤ Les granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels, ou granulats réfractaires [9].

➤ Les granulats allégés par expansion ou frittage

Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granulométrie, ils permettent de réaliser aussi bien isolation thermique [9].

B. Granulats recyclés

Ils sont obtenus à partir des démolitions d'ouvrages, ou des granulats réalisés.

ii. Selon la masse volumique absolue :

Ces derniers sont rangés en trois classes, entre autres :

a. Les granulats légers : dont la masse volumique est inférieure à 2g/cm³ [10].

- **Les granulats légers naturels** : la ponce ou la pouzzolane, matériaux volcaniques.
- **Les granulats légers ayant subi un traitement thermique** : granulat d'argile, de schiste, d'ardoise ou de perlite expansée naturels de structure très poreuse.
- **Les granulats légers de matériaux artificiels** : le mâchefers, sous-produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères.
- **Les granulats légers des matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux** : sont des granulats de nombreux déchets, comme le laitier de haut fourneau que l'on peut expanser.

b. Les granulats courants

Ce sont des granulats dont la masse volumique est comprise entre 2 et 3 g/cm³. Ils sont plus utilisés dans la formulation du béton,

c. Les granulats lourds : dont la masse volumique est supérieure à 3g/cm³

iii. Selon leur granularité

Les granulats sont désignés du point de vue granulaire par leurs dimensions extrêmes dont d où D représente la dimension minimale du granulat et D la dimension maximale.

D'après ces dimensions granulaires on distingue :

- Les fillers : O/D avec $D < 0,08\text{mm}$;
- Les sables : O/D avec $D < 6,3\text{mm}$;
- Les gravillons : d/D avec $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 31,5\text{mm}$;
- Les cailloux : d/D avec $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 80$;
- Les graves : d/D avec $d \geq 6,3\text{mm}$ et $D \leq 80\text{mm}$;

- Les ballasts : d/D avec $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$;

Le tableau (I :1) ci-dessous donne une synthèse sur la classification des granulats.

Tableau 1-1: Classification des granulats [7]

Classification	Types de granulats
Selon l'origine	Granulats naturels Granulats artificiels Granulats recyclés
Selon la masse volumique réelle	Granulats légers Granulats courants Granulats lourds
Selon la granularité	Fillers Sables Gravillons Cailloux Graves Ballasts

Dans la conception et la réalisation des ouvrages de génie civil, la sélection constitue une étape fondamentale suite à son influence directe sur la résistance, la durabilité et la stabilité des matériaux utilisés. La classification des granulats, telles qu'établies dans le tableau (1-1) présenté ci-haut, repose principalement sur leur origine, leur taille, leur forme, et leur composition.

B. Propriétés des granulats

Toute formulation du béton exige au préalable l'identification des matériaux. Identifier ou caractériser les matériaux revient à déterminer les différentes propriétés de ceux-ci dans l'objectif de vérifier s'ils répondent aux exigences souhaitées lors de la formulation du béton.

Cette caractéristique est nécessaire car elle influence beaucoup ont seulement le dosage des autres constituants mais surtout la résistance en compression du béton.

Les propriétés principales des matériaux granulaires peuvent être divisées en plusieurs groupe tel que [11];

- ✚ **Propriétés physiques** : dimension, la propreté, densité, masse volumique, la porosité, absorption, teneur en eau, perméabilité, retrait et gonflement.
- ✚ **Propriétés mécaniques** : la résistance en compression, en traction, a la fragmentation, à l'usure ...
- ✚ **Propriétés chimiques** : l'alcalinité (concentration en ions OH^-), l'acidité, solubilité, oxydation et corrosion ...
- ✚ **Propriétés géométriques** : liées à la morphologie.
- ✚ **Propriétés granulométriques** : l'analyse granulométrique.

Dans cette étude, on va devoir s'intéresser aux propriétés ou caractéristiques : physiques, mécanique et géométriques des granulats.

1.3 Typologie des bétons

Les bétons sont classifiés selon plusieurs paramètres notamment la masse volumique, la résistance à la compression, la destination, le liant utilisé etc. avec les nouveaux moyens technologiques, la famille des bétons est en consistante évolution.

Le béton est un matériau dont la composition peut évoluer. On peut adapter son dosage et ses constituants.

1.3.1 Typologie de béton selon la destination

1.3.1.1 Le béton ordinaire (BO)

Le béton ordinaire est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Ce type de béton peut être armé ou non, ou même précontraint.

Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de forme d'ouvrage [12].

Le béton ordinaire est destiné aux éléments de construction de porteurs ; poteaux, dalle, poutre, etc. [7]

1.3.1.2 Les bétons hydrotechniques (BH)

Ceux-ci sont généralement destinés aux barrages, écluse, revêtement des canaux, etc. [7]

1.3.2 Typologie des bétons selon la masse volumique

Suivant la masse volumique du béton, on distingue :

- **Le béton très lourd (extra-lourd)** : dont la masse volumique est $\geq 2,5 \text{g/cm}^3$
- **Le béton lourd** : dont la masse volumique est $1,89 \text{g/cm}^3 \leq \rho \leq 2,4 \text{g/cm}^3$
- **Le béton léger** : dont la masse volumique est $0,5 \leq \rho \leq 1,5 \text{g/cm}^3$

Les bétons extra-lourds sont formés de ciment et d'agrégats spéciaux à masse volumique élevés. Ils sont utilisés souvent pour la protection contre les rayons radioactifs. Les bétons légers sont formés de ciment et d'agrégats poreux naturels ou artificiels [7].

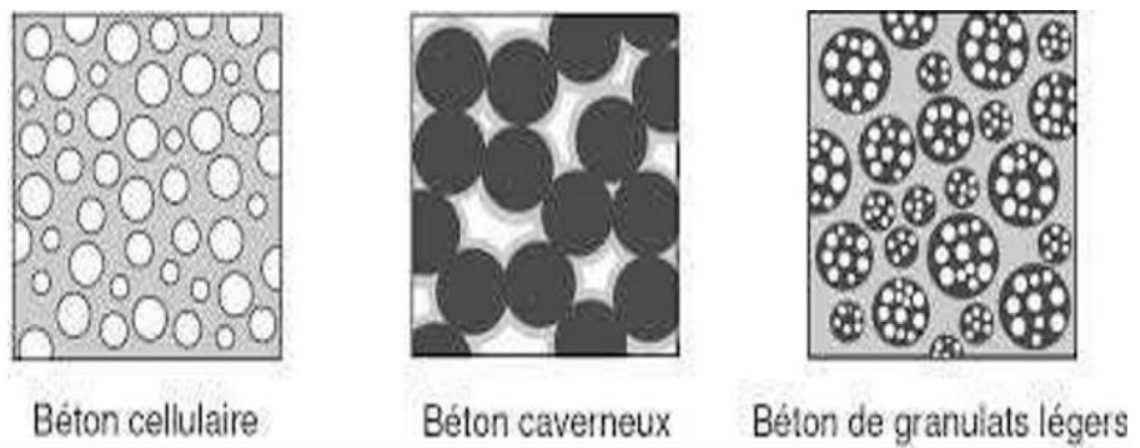


Figure 1-5 : Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après Short et Kinniburg [9]

Les figures (1-5) présentent respectivement la classification des bétons légers proposés par Short ; Kinniburg et Lafarge « béton-granulats légers » [1]

1.4 Typologie des bétons selon la résistance à la compression

La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression suivant le tableau (1-2) :

Tableau 1-2. Classification des bétons selon la résistance à la compression [7]

Classe	C12/15	C16/20	C20/30	C25/30
F_{ck} (cyl) (MPa)	12	16	20	25
F_{ck} (cube)(MPa)	15	20	30	30

Dans le tableau (1-2) ; F_{ck} (cyl) est la résistance caractéristique mesurée sur les éprouvettes cylindriques ; F_{ck} (cube) est la résistance caractéristique mesurée sur des éprouvettes cubiques [7].

La figure (1-6) présente la classification des bétons légers qui repose sur leur composition, leur densité et leur usage. Notons que cette classification permet d'orienter le choix du béton en fonction des performances légères souhaitées pour un projet donné.

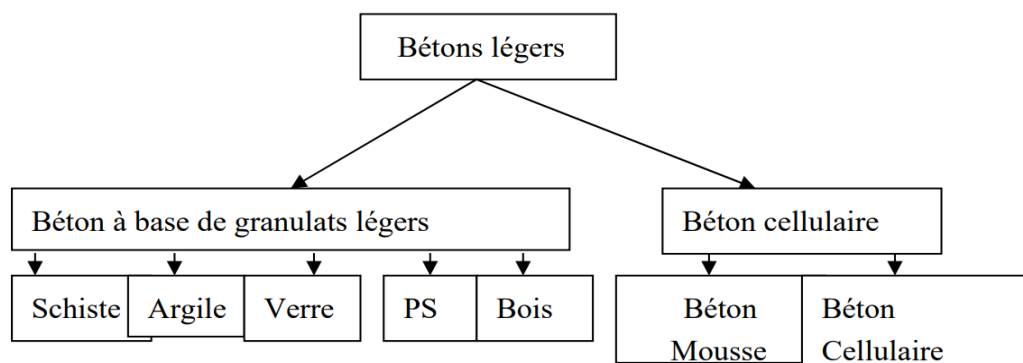


Figure 1-6 : Classification des bétons légers [1].

1.5 Pathologie du béton

Tout au long de son existence, le béton est soumis à de multiples phénomènes (climatiques, physico-chimiques, mécaniques, etc.) pouvant entraîner de potentiels désordres et dégradations impactant directement la santé des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages. Il existe plusieurs types de pathologies dont voici ci-dessous une liste non exhaustive. Nous allons subdiviser ces pathologies en deux catégories [11].

1.5.1 Les pathologies physico-chimiques :

A. La carbonatation : le portlandite du ciment hydraté réagit petit à petit avec le CO₂ de l'air. Cette réaction réduit donc le pH du béton de 13 à 9 environ. Il se fait remarquer par la corrosion des armatures entraînant le gonflement voire l'éclatement du béton.
Traitement : utilisation des bétons peu poreux, avec un ciment composé générant peu de portlandite (ciment au laitier, aux cendres, fumée de silice, etc.) [11].

B. Attaque par les ions chlorures : les ions chlorures peuvent pénétrer à travers les réseaux poreux du béton et provoquer l'amorce de la corrosion. Il se fait remarquer par la corrosion des armatures avec présence des fissures dans le béton, réduction de la section des aciers, éclatement local du béton et apparition des rouilles à la surface du béton sous forme de tache non esthétique.

Traitement : utilisation de mortier de réparation après brossage des aciers, rajout d'armatures par scellement ou soudage. Mais pour prévenir, nous pouvons aussi choisir un béton compact, d'un enrobage conforme aux règles de l'art et d'un ciment adapté, utilisation d'armatures en acier galvanisé ou en inox [11]

C. Alkali-réaction : il provient de l'incompatibilité entre les granulats et le ciment. Il se fait voir par l'apparition des réseaux des fissures multidirectionnelles et gonflement pouvant affecter la structure et générant d'autres pathologies. Traitement : limiter la teneur en alcalin du béton [11]

D. Réaction sulfatique interne (RSI) : elle est dû à l'élévation de la température au-delà de 65°C d'un béton à base de constituants non adaptés, traitement thermique non approprié,

à l'industrie de préfabrication ou certaines conditions de forte alcalinité, humidité et température. Pour les symptômes, ils sont les mêmes que l'alcali-réaction en termes de fissurations et déformation.

Traitement : pas réellement de solution directe mais pour ralentir le phénomène, réduire les apports d'eau exogènes. Nous pouvons prévenir en limitant la température du béton avec l'utilisation de ciments peu exothermiques, eau froide, de granulats refroidies à la glace, etc.

- E. Gel et dégel** : les cycles gel et dégel fragilisent le béton. Si l'eau pénètre dans le réseau des fissures et de pores du béton pour favoriser le processus (état de saturation favorable). Il se fait observer par des fissurations internes dues à un gonflement du béton à cœur, écaillage du béton à sa surface sous l'effet du gel avec de déverglaçage.

Traitement : utilisation d'isolants pour éviter au béton de subir les températures inférieures à zéro. Pour prévenir, on utilise des granulats non gélifs et entraîneurs d'air

1.5.2 Les pathologies mécaniques

A. Désordre structurel lié à l'action des charges supérieures aux charges de service :

Provient d'une mauvaise conception ou mise en œuvre déficiente. Il se manifeste par des fissures de retrait, de déformation de poinçonnement, de compression, de flexion, d'effort tranchant [11].

Traitement : Renforcement par l'ajout d'armatures, reprises en sous-œuvre.

- B. Désordre structurel lié à un sinistre** : provient d'un incendie, dégât des eaux ou catastrophe naturelle de type action du vent ou séisme. Il se manifeste par des fissures mécaniques ou de retrait, de flexion, d'effort tranchant suite à des surcharges ou actions mécaniques supérieures à celles de la capacité portante.

Traitement : en cas d'un incendie, remplacer la partie du béton altérée et renforcer par un mortier de réparation avec de la fibre polypropylène. Il est à noter que la meilleure

protection contre ces pathologies se situe en amont de la construction, dans le choix, la qualité et la formulation des matériaux et dans leur mise en œuvre [11].

1.6 Quelques méthodes de formulation du béton

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation [4]. Plusieurs méthodes de formulation existent, notamment de Caquot, la méthode de Bolomey, la méthode d'Abrams, la méthode de Faury, la méthode de Dreux-Gorisse, la méthode valette, méthode de joisel etc.

Seule la méthode de Dreux-Gorisse va nous intéresser ; car c'est elle qui nous servira d'application pour la formulation du béton dans ce travail.

1.6.1 Méthode de Dreux-Gorisse

Elle permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulat, et ciments nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. La méthode de Dreux-Gorisse passe par plusieurs étapes successives dans le but d'obtenir la formulation théorique du béton en se basant sur la nature de l'ouvrage, l'ouvrabilité et la résistance souhaitée [7].

1.6.2 Méthode de Bolomey

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m³ ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants. Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), la courbe qui soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la formule (1-1) :

$$P = A + (100 - A) * \left(\sqrt{\frac{d}{D}}\right) \quad (1-1)$$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ;

D : est le diamètre des plus gros grains ;

A : la valeur de A dépendra de :

- La consistance souhaitée de béton ;
- La prévenance des granulats.

Elle varie de 6 à 16, étant plus élevés que le dosage en ciment est plus fort. Signalons que cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue [8].

1.6.3 Méthode de Faury

Cette méthode est venue en 1941 compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent une résistance mécanique supérieure aux bétons Bolomey correspondants. Cette méthode présente des particularités du fait qu'elle est applicable à tous les granulats, quelle qu'en soit leur masse volumique. Faury étudie l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{D}$.

Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi et du Rayon moyen du moule [8]. L'effet de paroi est déterminé à l'aide de la relation (1-2) et le rayon moyen du moule par la relation (1-3).

$$E_p = \frac{D}{R} \quad (1-2)$$

$$R = \frac{\text{Volume du béton (acier deduits)}}{\text{surface de tout ce qui est en contact du béton (coffrage+aciens)}} \quad (1-3)$$

1.6.4 Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à

employer. Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduits au minimum [8].

1.6.5 Méthode de Caquot

Caquot a proposé, dès 1937, une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètre maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise en œuvre, la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains [8].

1.6.6 Méthode de valette

VALETTE a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». On calcule d'abord le dosage de sable et du ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment [8].

1.6.7 Méthode de joisel

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale, est fonction de \sqrt{dm} , m dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage ; m peut alors varier de 3 à 10. Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Comme pour les méthodes Faury et Valette, le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement, sur le plan granulométrique, à la compacité maximale ; ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200Kg/m³) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400Kg/m³ dans la plupart des cas). Une correction doit donc être apportée dans ce sens [8].

1.7 Généralités sur les déchets de fer

1.7.1 Déchets

Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, en cet état ou après modification. Seuls les déchets qualifiés d'ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter des positions de l'environnement [4].

Les bétons de limailles de fer sont des mélanges spécifiques de béton où la limaille de fer est incorporée, généralement en remplacement partiel des granulats traditionnels.

L'ajout de limaille de fer, obtenue par le broyage de déchets métalliques, permet d'améliorer certaines propriétés mécaniques du béton, notamment sa résistance à la compression et sa durabilité.

Ces bétons peuvent également offrir une meilleure résistance à la traction, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant des performances accrues sous charge.

L'utilisation de limaille de fer dans le béton présente également des avantages en termes de conductivité thermique. Ce trait est particulièrement intéressant pour des applications comme les planchers chauffants, où une bonne transmission de la chaleur est recherchée.

De plus, l'incorporation de limaille de fer peut contribuer à réduire le poids du béton, simplifiant ainsi la manipulation et le transport tout en maintenant sa solidité. Cependant, l'équilibre entre la qualité de limaille de fer et les autres composants du mélange est crucial pour éviter des défaillances structurelles.

En outre, les bétons de limaille de fer offrent des avantages environnementaux notables. En utilisant des déchets de limailles, souvent issus de la transformation des métaux, ce type de béton contribue à la réduction des déchets industriels et encourage le recyclage des métaux [2].

1.7.2 Fer

Le fer joue un rôle essentiel dans le domaine du génie civil, principalement grâce à ses propriétés mécanique et sa durabilité. En tant que composant clé du béton armé, il confère une résistance à la traction qui permet de renforcer les structures, telle que les ponts, les immeubles et les routes, tout en optimisant leur longévité [13]. De plus, le fer est largement utilisé dans la fabrication des barres d'armature, ce qui augmente la stabilité des constructions face aux charges et aux contraintes environnementales [4].

Sa capacité à être recyclé le rend également une option durable et économique, favorisant ainsi des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement. En somme, le fer est indispensable pour assurer la sécurité, la résilience et la performance des infrastructures moderne [14].

1.8 Type de déchets de fer

1.8.1 Les copeaux de fer

Les copeaux de fer sont de petits morceaux ou particules de fer obtenus par usinage, découpage, abrasion de pièces métalliques.

Ils peuvent être de différentes tailles et formes, selon le processus de fabrication. Ils ont pour masse volumique d'environ $7,85\text{g/cm}^3$ [7]. La figure (I-7) montre la forme des copeaux de fer.

La figure 1-7 présente des copeaux de fer qui sont des petites particules ou fragments métalliques obtenus lors des opérations de coupes, de fraisage, ou tournage de pièces en fer ou en acier.



Figure 1-7 : Échantillons copeaux de fer [10]

1.8.2 Limaille de fer

La limaille de fer est composée de petites particules ou copeaux de fer. Elle est généralement utilisée dans divers domaines, notamment en mécanique, en métallurgie, en électromagnétisme. Sa masse volumique dépend de plusieurs facteurs, entre autres : sa taille, sa forme et de son degré de compactage .sa masse volumique est estimé autour de 2 à 4 g/cm³ [4]

La figure 1-8 nous présente un ensemble des fines particules par la coupe, le meulage ou tournage de pièces en fer ou en acier.



Figure 1-8 : Échantillons limailles fer [10]

1.8.3 Granulats de fer

Les granulats de fer sont de petites particules de fer, souvent utilisées dans divers domaines tels que la construction, l'industrie et l'ingénierie. Avec 1 à 10mm de diamètre et les longueurs qui peuvent dépasser ces mesures en fonction des spécificités de la production. Masse volumique autour de $7,8\text{g/cm}^3$. Ce qui reflète la densité élevée du fer [4].

La figure (1-9) présente les granulats de fer, également appelés agrégats de fer, sont des matériaux granulaires issus de la fragmentation ou de la transformation du fer. Ils jouent un rôle essentiel dans diverses applications en génie civil, notamment dans la fabrication de béton, de mortier, ou comme adjuvant pour renforcer certains matériaux.



Figure 1-9 : Les granulats fer [15]

NB : Les déchets de fer, issus principalement des activités industrielles telles que la construction, l'automobile et l'usinage, représentent une part significative des déchets métalliques générées dans le monde. Ils incluent des chutes de production, des Pièces défectueuses et des équipements en fin de vie, et leur gestion représente en enjeu majeur pour l'environnement et l'économie [15].

La collecte et le recyclage des déchets de fer permettent non seulement de réduire l'impact environnemental en diminuant les besoins en matières premières vierges, mais aussi de contribuer à l'économie circulaire en réintroduisant ces matériaux dans le cycle de production [15].

En favorisant le traitement et la valorisation des déchets de fer, on peut ainsi limiter les décharges, réduire les émissions de CO₂ et stimuler l'innovation dans les technologies de recycles.

1.9 Conclusion partielle

En conclusion partielle, nous déduisons que l'incorporation des déchets industriels soient la limaille de fer en particulier dans le béton ordinaire, nous conduira à la valorisation de certains sous-produits de l'industrie de transformation de fer dans le domaine de construction.

C'est pourquoi dans ce premier chapitre, nous nous sommes consacrés à présenter les généralités sur le béton et les déchets de fer.

Chapitre 2. Méthodologies

2.1 Introduction

Ce chapitre structure tous les éléments qui vont nous aider à répondre aux objectifs assignés de ce travail, la marche à suivre y compris toutes les formules possibles, à présenter la caractérisation des matériaux, formulation et caractérisation du béton.

2.2 Composants granulaires

2.2.1 Graviers

Les graviers utilisés dans cette étude est un granulat concassé issu de la roche volcanique de Goma et fourni par l'entreprise CARIGO/SARL vers KIBATI. Sa classe granulaire est de 15 /25.

2.2.2 Sables

Nous avons utilisé un sable roulé et dragué dans la rivière au Rwanda, avec une classe granulaire de 0/5.

2.2.3 Limailles de fer

La limaille de fer utilisée dans ce présent travail, a été obtenue auprès d'un atelier de mécanique local a l ITIG Don Bosco ; ou sont effectués le limage, le tournage, le meulage, de l'acier/fer. La figure 1-8 montre la limaille de fer utilisé pour l'enquête.

2.3 Essais de caractérisation des matériaux

Le ciment, le sable, le gravier, les limailles de fer et l'eau sont les principaux matériaux utilisés dans le béton dont fait l'objet de ce travail. Ces derniers sont d'origines et de nature différentes.

2.3.1 Ciment

Pour le ciment, la masse volumique absolue est évaluée à partir du pycnomètre de le Chatelier par un essai normalisé.

i. Mode opératoire

- ❖ Introduire la solution dans le pycnomètre jusqu' au premier trait de repère, note $V_1=0\text{ml}$;
- ❖ Peser le pycnomètre contenant la solution, note M_1 en grammes ;
- ❖ Introduire une quantité de ciment dans le pycnomètre jusqu' au deuxième trait de repère ; note V_2 en millilitres.
- ❖ Peser à nouveau le pycnomètre contenant la solution et le ciment, note M_2 en grammes.

Et le calcul de celle-ci se fait par la relation. (1-1) [7]

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (2-1)$$

Où :

- **M1**, la masse du pycnomètre contenant la solution en grammes.
- **M2**, masse du pycnomètre contenant la solution et le ciment en grammes ;
- **V2** et **V1** : la lecture sur le pycnomètre de le Chatelier gradué avant et après l'introduction du ciment en (ml) [5].

2.3.2 Le granulat

Notons que la série d'essais sur le granulat se résume à la recherche des caractéristiques granulométriques, géométriques, physiques et mécaniques.

2.3.2.1 Caractéristiques granulométriques des granulats

Cette caractéristique est déterminée par l'essai d'analyse granulométrique par voie sèche pour notre cas. L'analyse granulométrique est régie par la norme NFP18-560 et a pour but de déterminer les grosseurs et les proportions pondérales de différentes catégories granulaires qui constitue l'échantillon [10]

- **Principe de l'essai**

L'échantillon de masse M préalablement sèche dans une étuve (105 ± 5) °C et tamise à travers une série de tamis qui correspond pour chaque granulat. Ces tamis sont disposés les uns sur les autres suivant un ordre décroissant de dimension de leur maille. L'ordre des particules selon leurs dimensions est obtenu par l'action du vibrotamis ou tamiseuse électrique.

Pour cette analyse ; le refus et la quantité du matériau qui est retenu sur le tamis par contre le tamisât et la proportion des matériaux qui passent à travers les mailles du tamis [7].

Les masses de différents refus ont été rapporté à la masse initiale du matériau et ont été exprimé en pourcentage. La courbe granulométrique est obtenue en rapportant sur l'axe des abscisses de dimension des ouvertures des mailles de différents tamis à l'échelle arithmétique et les proportions des tamisât à l'échelle logarithmique sur l'axe des ordonnées [8]. La figure (2-1) montre l'exemple des courbe granulométriques.

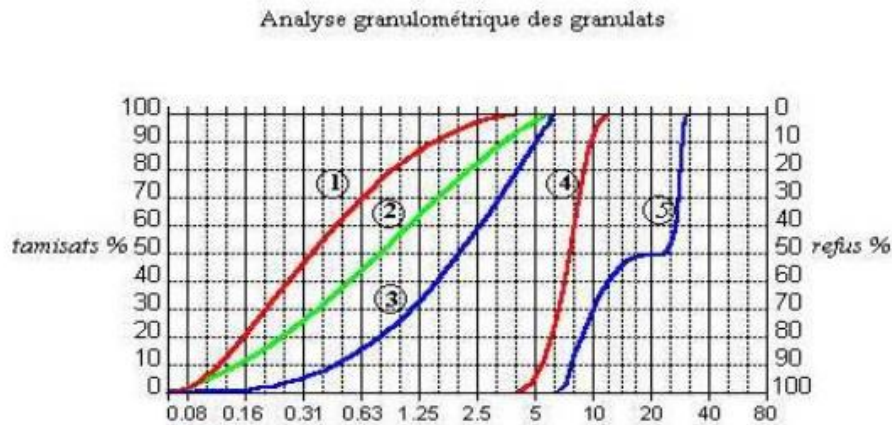


Figure 2-1: Courbe granulométrique de quelques granulats [7]

- Sable a majorité des grains fins
- Sable plutôt grossier
- Sable normal
- Gravillons 5/10^e à granulométrie continue
- Gravillons 8/25 à granulométrie discontinu

- **Mode opératoire**

Le mode opératoire de l'essai d'analyser granulométrique consiste à :

- Choisir neuf tamis pour le sable et cinq pour le gravier, dont les dimensions de diamètre des mailles en millimètres sont de 5 ;3,15 ;1,25 ;1 ;0,63 ;0,315 ;0,160 ;0,125. Pour le sable et 31,5 ;25 ;20 ;16 ;12,5 ;5 pour le gravier.
- Placer les tamis de bas en haut suivant l'ordre croissant des dimensions de diamètre des mailles sur la tamiseuse électrique. En dessous des tamis placer les fonds (récipient servant à recueillir les passants du dernier tamis).
- Mettre l'échantillon dans le tamis supérieur, couvrir puis allumer la tamiseuse. Le tamisage se fait pendant 20 minutes ;

- Après tamisage, peser le refus partiel de chaque tamis à l'aide de la balance électrique.

Enfin, dresser un tableau de résultats et une courbe granulométrique correspondante

2.3.2.2 Propreté du sable (ES)

Le degré de propreté du sable ou l'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumique entre les grains fins et les autres.

Il permet donc de caractériser l'importance des fines particules par une valeur numérique. Il est déterminé suivant la norme NFP 18-598 [5].

Nous présenterons dans la suite le mode opératoire et l'expression des résultats de l'essai d'équivalent sable.

$$ES = \frac{H1}{H2} * 100 \quad (2-2)$$

Avec :

H1 : la hauteur totale y compris le floculat (fine en suspension) en (cm)

H2 : la hauteur du dépôt de sable visible en (cm)

La figure (2-2) montre la lecture à piston de H1 et H2

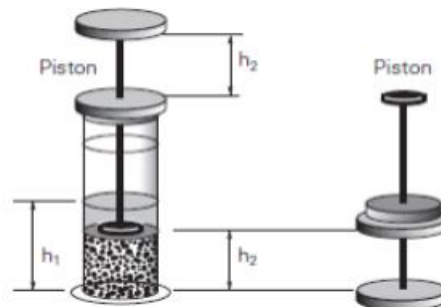


Figure 2-2 : Lecture en piston de h1 et h2 [7]

- **Mode opératoire**

- Peser deux masses $m1 = m2 = 120g$;
- Considérer deux éprouvettes et remplir ces derniers de la solution lavante jusqu'au premier trait de repère (jauge) ;

- Chasser les bulles d'air en secouant l'éprouvette contre la paume de la main et laisser reposer la solution pendant 10 minutes ;
- Boucher les éprouvettes et agiter d'un mouvement rectiligne sinusoïdal d'amplitude 20cm (90 aller et retour en 30 secondes) ;
- Nettoyer et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface, on ferme le robinet lorsque la solution atteint le deuxième trait de repère (supérieur) et on sort le tube laveur ;
- Laisser la solution se reposer pendant 20 minutes en évitant toute vibration ;
- Enregistrer les hauteurs h1 et h2

À l'issue des résultats de l'essai d'équivalent de sable, celui-ci est classifié selon le degré de porosité qui par la suite règle son domaine d'utilisation selon le tableau (2 -1) [7]

Tableau 2-1: valeurs préconisées de l'équivalent de sable [7]

ES à vue (%)	ES à piston (%)	Nature et qualité
$ES \geq 65$	$ES > 60$	Sable argileux, non convenable pour le béton de qualité.
$65 \leq ES < 75$	$60 \leq ES \leq 70$	Sable légèrement argileux, convenable pour les bétons courants.
$75 \leq ES \leq 85$	$70 \leq ES \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage des fines argileuse, parfaitement convenable pour des bétons de qualité.
$ES \geq 85$	$ES \geq 80$	Sable très propre, risque d'un défaut de plasticité du béton.

A. Module de finesse

Dans le cas particulier du sable, le module de finesse est un paramètre intrinsèque qui fixe les proportions des éléments fins contenus dans le sable.

Ce coefficient augmente lorsque le sable est riche en particules fines ; le module de finesse de sable est régi par la norme XP18-540. Ses calculs selon la relation (1-3) :

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumules en \% de tamis (0,16; 0,315; 0,63; 1,25; 2,5; 5)mm} \quad (2-3)$$

Selon le module de finesse, distinguons 3 types de sable [10] :

- ✚ **Le sable un peu trop fin** : c'est le sable dont le module de finesse est compris entre 1,8 et 2,2. Ces valeurs sont importantes lorsqu'on vise la facilité de la mise en œuvre du béton.
- ✚ **Le sable préférentiel** : c'est celui dont la valeur des MF est comprise entre 2,2 et 2,8. Ce type de sable convient parfaitement pour un bon béton
- ✚ **Le sable un peu grossier** : c'est celui dont le MF est entre 2,8 et 3,20. Ce sable est recherché lorsqu'on vise une grande résistance ; cependant il entraîne certaines pathologies du béton notamment la ségrégation.

Dans le cas où la valeur du module de finesse ne répond pas aux exigences, une correction de cette dernière est envisageable. Cette correction est exprimée par les relations (1-4).

$$S1 = \frac{MF - MF2}{MF1 - MF2} \quad \text{et} \quad S2 = \frac{MF1 - MF}{MF1 - MF2} \quad (2-4)$$

Avec :

- ❖ **S1** : proportion du sable grossier ;
- ❖ **S2** : proportion du sable fin ;
- ❖ **MF** : module de finesse recherchée ;
- ❖ **MF1** : module de finesse du sable grossier ;

- ❖ **MF2** : module de finesse du sable fin.

B. Coefficient d'uniformité (Cu)

La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité appelé aussi coefficient de HAZEN [7]. Il est déterminé à l'aide de la formule (1-5).

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2-5)$$

Avec :

- ❖ **D60** : le diamètre effectif correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖ **D10** : le diamètre effectif correspondant à 10% de tamisât.

La granulométrie est dite serrée (ou uniforme) lorsque Cu est inférieur ou égal à 2 et elle est dite étalée (ou variée) dans le cas où Cu est supérieur à 2.

C. Coefficient du courbure (Cz)

Ce coefficient permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres D10 et D60. Il est déterminé à l'aide de la formule (1-6).

$$Cz = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2-6)$$

Avec :

- ❖ **D60** : le diamètre effectif correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖ **D30** : le diamètre effectif correspondant à 30% de tamisât ;
- ❖ **D10** : le diamètre effective correspondant à 10%.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure se situe entre 1 et 3 est que le coefficient d'uniformité est supérieur à 4 pour le gravier et à 6 pour le sable, la courbe granulométrique

descend d'une manière assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Dans un tel cas, on dit que **la granulométrie est bien graduée**.

2.3.2.3 La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un granulat est une propriété comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que des vides entre les particules [10].

Elle est régie par les normes NFP18-554 [11]. Pour les gravies et NFP18-555 [5] pour le sable.

- **Mode opératoire 1**

L'essai consiste au remplissage d'un récipient vide de volume V du matériau sec non tassé pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule (1-7) [5] :

$$\rho = \frac{M - M1}{V} \quad (2-7)$$

Avec :

M : la masse riche du matériau en g ; $M1$ la masse du récipient et V le volume du récipient en ml

- **Mode opératoire 2**

- Détermination de la masse $M1$ et du V du récipient ;
- Placer le récipient dans le bac en plastique ;
- Verser les granulats secs par couche successive ;
- Arroser avec la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient ;
- Enregistrer la masse M du récipient rempli ;
- Vider les granulats dans un autre bac en plastique ;
- Renouveler l'opération au moins trois pour un échantillon de même type

2.3.2.4 La masse volumique absolue

C'est une caractéristique courante des granulats. Elle exprime la masse de l'échantillon séché en étuve et le volume qu'il occupe dans l'eau ; y compris les pores fermés (formant la porosité fermée) ; mais à l'exclusion de ceux accessibles à l'eau [11].

La masse volumique absolue est liée à la densité absolue qui est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du granulat lorsque ce dernier est soumis à une température donnée à la de l'unité de volume d'eau distillé. la masse volumique du granulat et sa masse sèche rapportées à l'unité de volume de matière solide seule sans tenir compte du volume interstitiel et le volume des pores [10]. Elle est régie par les normes NFP 18-554 [11] pour les graviers et NFP 18-555 pour le sable [5]. La méthode utilisée est celle de l'éprouvette graduée.

- **Principe de l'essai**

L'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 granulats dans une quantité d'eau. la différence de volume rapporté à la masse du matériau a donné à la masse absolue selon la formule (1-8)

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2-8)$$

Avec :

M : masse de l'échantillon

V1 : volume initial de l'eau

V2 : volume final

- **Mode opératoire**

- Placer l'éprouvette dans le bac en plastique ;
- Verser de l'eau dans l'éprouvette (En mi-hauteur et noter le niveau V1) ;
- Préparer les granulats échantillonnés et séchés préalablement à étuve à une température de 105°C, on prend ainsi la masse M de cet échantillon (environ 300g) ;
- Verser l'échantillon précédemment préparer dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et éliminer les vides en agitant le mélange avec la tige agitatrice ;
- Noter les granulats dans un bac en plastique et jeter son contenu ;
- Renouveler l'opération au moins trois fois.

2.3.2.5 Coefficient d'absorption d'eau (porosité)

C'est le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon de granulats à sa masse sèche (après passage à l'étuve) ; du fait l'échantillon la pénétration de l'eau dans les pores accessibles à l'eau, suite à l'immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24h [11].

Notons que, l'absorption constitue un véritable défi lors de la formulation du béton car elle influence le dosage en eau ;

Sur ce, les granulats requis pour un béton de qualité sont peu poreux. Il est donc impérieux de tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats afin de mieux déterminer la qualité d'eau optimale pour la confection du béton.

2.3.2.6 La teneur en eau d'un granulat

C'est le rapport du temps d'eau contenu au poids des grains composants le granulat. Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Voilà pourquoi, on doit disposer de moyens nécessaires pour mesurer l'eau contenant les granulats.

2.4 L'essai Los Angeles

L'essai Los Angeles pour le gravier est régi par la norme NFP 18 573. C'est un essai qui évalue la manière dont les graviers résistent à la fragmentation par les chocs et à l'usure des contacts, mutuels [10].

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs des boules normalisées et aux flottements réciproques dans la machine de Los Angeles. Notons que la granulométrie est choisie dans la gamme 4 / 0,63mm-6,3/10mm-10/14mm-16/31,5mm et 25/50mm [10].

Le coefficient Los Angeles est obtenu par la relation (1-9) :

$$C.L.A = \frac{P}{5000} * 100 \quad (2-9)$$

Avec :

P ; le poids d'éléments inférieurs à 1,6mm produits au cours de l'essai en gramme

- **Mode opératoire**

- La préparation de l'échantillon dont la granulométrie est incluse ;
- L'introduction de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge des boules conformes à la granulométrie choisie ;
- Mise en place du couvercle et serrage des boulons de fixation ;
- Démarrage de l'essai par actionnement de la machine suivant 500 rotations à une fréquence comprise entre 30 et 35 tr/minutes ;
- Retrait de l'échantillon dans la machine et recueil du granulat dans un bac placé sans la machine ;
- Tamisage du matériau recueilli dans le bac sur le tamis de 1,6mm ;
- Lavage du refus dans le bac suivi du remuage à l'aide d'une truelle et à fin passage à l'étuve ;
- Pesage du refus ainsi séché.

2.5 Caractérisation des limailles

La caractérisation des limailles de fer est une étape essentielle pour comprendre leur influence sur les propriétés du béton lorsqu'elles sont utilisées en substitution partielle du sable.

De ce fait, nous avons opté pour certaines méthodes Principales nomment :

- a. **Les propriétés physiques :**
 - Densité pour connaître la masse volumique des limailles
 - Porosité et absorption d'eau pour évaluer la porosité et la capacité d'absorption, qui influencent l'adhérence avec la pâte de ciment.
 - Humidité naturelle pour ajuster la formulation du béton.
- b. **Propriétés chimiques :** pour vérifier la compatibilité avec le ciment, notamment la présence de substances susceptibles de provoquer des réactions indésirables.
- c. **Propriétés mécaniques et thermiques :**
 - Dureté et résistance mécanique pour évaluer la résistance à l'usure
 - Conductivité thermique

Notons que la caractérisation précise des limailles de fer permettra d'anticiper leur influence sur les propriétés du béton, telles que la résistance mécanique, la durabilité, la porosité, etc.

2.5.1 Substitution partielle de sable par les limailles de fer

Dans notre étude, cette substitution consiste à déterminer le pourcentage de sable obtenu par la méthode de Dreux Gorisse pour pouvoir incorporer les limailles de fer à différentes proportions choisies. Ainsi le pourcentage de sable à considérer lors de l'incorporation des limailles de fer est obtenu par la formule (1-10) :

$$\%S' = \%S - \%IF \quad (2-10)$$

Avec :

%s': pourcentage de sable à considérer ;

%S : pourcentage de sable obtenu ;

% IF : pourcentage des limailles de fer choisi.

2.6 Formulation du béton

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques [5]. Formuler ou étudier la composition d'un béton consiste à définir la conception optimale des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [16] ou d'une partie de l'ouvrage de Bolomey, de Faury, d'Abrams, Dreux Gorisse, Valette, la méthode CES etc.

En effet, nous utilisons la méthode de Dreux Gorisse car elle est avantageuse d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est aussi très simple d'utilisation par le fait qu'elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés. Elle permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulat et ciment) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges [7].

2.6.1 Méthode de Dreux -Gorisse

Elle passe par plusieurs étapes successives dans le but d'obtenir la formulation théorique du béton en se basant sur : la nature de l'ouvrage, l'ouvrabilité et la résistance souhaitée.

2.6.1.1 Étape de la formulation du béton par méthode de Dreux-Gorisse

A. Les données de base

La méthode de Dreux de Gorisse exige au préalable la connaissance de trois données de base à savoir : la dimension maximale des granulats, la résistance souhaitée et la consistance destinée.

1) La dimension maximale granulaire

Elle définit l'aptitude qu'à le béton face à la compression sur des éprouvettes cylindriques appropriées après une durée de 28 jours. Cette résistance donnée par la relation (1-11) est fonction

de la résistance visée à 28 jours d'âge. La consistance souhaitée quant à elle, dépend des conditions de bétonnage et évalue généralement la plasticité du béton par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

$$\sigma_{28} = 1,15\sigma_n$$

Avec :

σ_{28} : Résistance en compression désirée ou souhaitée à 28 jours ;

σ_n : Résistance visée en compression à 28 jours.

2) La consistance désirée

Elle est fonction de l'élément à bétonner (plus ou moins massique où plus ou moins ferrailleur, de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams.

B. Détermination du dosage en eau et en ciment

Les dosages en eau et en ciment sont déterminés par la relation (1-11) dite de Bolomey donnée par :

$$\sigma_{28} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2-11)$$

Avec :

σ_{28} : Résistance à la compression désirée à 28 jours en MPa ;

σ'_c : Classe en ciment à 28 jours en MPa ;

C : Dosage en ciment en Kg/m³ ;

E : Dosage en eau en l/m³ ;

G : Coefficient granulaire (compris entre 0,35 et 0,65) est fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats.

Il suffit de positionner sur l'abaque Figure (2-3) les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de Copt.

Tableau 2-2: valeurs du coefficient granulaire G [9]

Qualité des granulats	Dimension maximale de granulat		
	Fins $D_{max} < 12,5 \text{ mm}$	Moyens $20 \leq D_{max} \leq 31,5 \text{ mm}$	Gross $D_{max} > 50$
Excellent	0,55	0,50	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Une fois le rapport C/E obtenu ; la figure (2-3) permet de déterminer le dosage en ciment nécessaire, en fonction de l'affaissement et du rapport C/E. la connaissance de C permet alors de déterminer E.

2.6.2 Différents dosages

Ayant obtenu par la relation (2-11) dites de Bolomey ; pour 1 m^3 de béton on a :

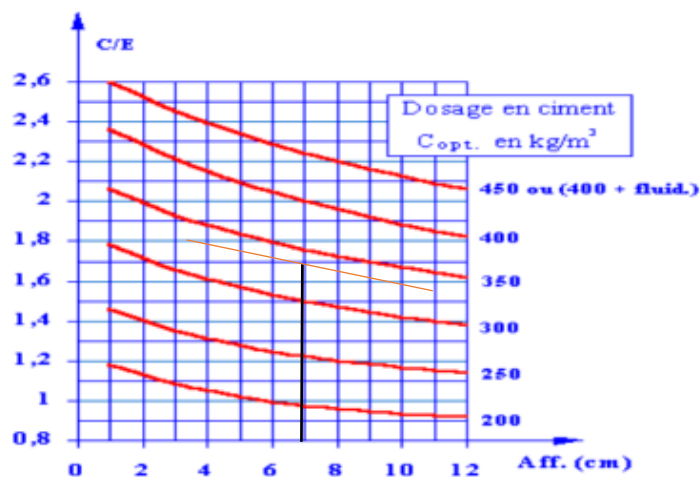


Figure 2-3 : Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement recherchée.

La lecture de l'abaque de la figure (3-3) nous a permis de trouver le dosage en ciment $C = 342 \text{ kg}$ et en remplaçant C dans l'équation (1) obtient le dosage théorique en eau $E = 200 \text{ kg}$.

C. Détermination des proportions granulaires

Il s'agit de déterminer les pourcentages qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum des vides. Pour déterminer ces pourcentages, il est impérieux de passer le traçage de la courbe granulométrique théorique d'un matériau à vide schématisée par une droite brisée dite « Droite de Dreux OAB ».

Le point O correspond à son origine, le point B Correspond en l'abscisse à la dimension D du plus gros granulat et en ordonné au 100% de tamisât. Le point A quant a lui appelé point de brisure a pour coordonnées :

- Si $D_{max} \leq 20\text{mm}$, alors l'abscisse $X_A = D_{max}$
- Si $D_{max} > 20\text{mm}$, X_A est situé du segment "Segement gravier " limité par le module 38 (5mm) et le module correspond à D_{max} .

En coordonnées, Y_A s'obtient à partir de la relation (1-12) :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K \quad (2-12)$$

Avec :

D : la dimension du plus gros granulat et **K** : le coefficient correcteur.

Le coefficient correcteur **K** est fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats. Ses différentes valeurs sont présentées dans le tableau (2-3).

Tableau 2-3: Valeur du coefficient correcteur en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité [1]

Vibration	Faible		Normal		Puissance	
Forme des granulats	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+ superplastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+7	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Les coordonnées (X, Y) ainsi trouvées permettent de tracer la droite de référence en prenant pour origine le point O et Dmax pour extrémité. L'importance de cette courbe est qu'elle facilite la lecture des proportions volumétriques des granulats. Outre la courbe de référence, on définit également la droite ou ligne de partage qui relie le point correspondant à 5% de refus pour le granulat de faible granularité et 95% pour le granulat a forte variété dimensionnelle. Le pourcentage en volume absolu des granulats correspond au point de croisement de la droite de partage et la courbe de référence OAB. Ce point de croisement est nommé point de brisure. La figure (2-4) montre une courbe référence et une droite de partage d'un béton binaire.

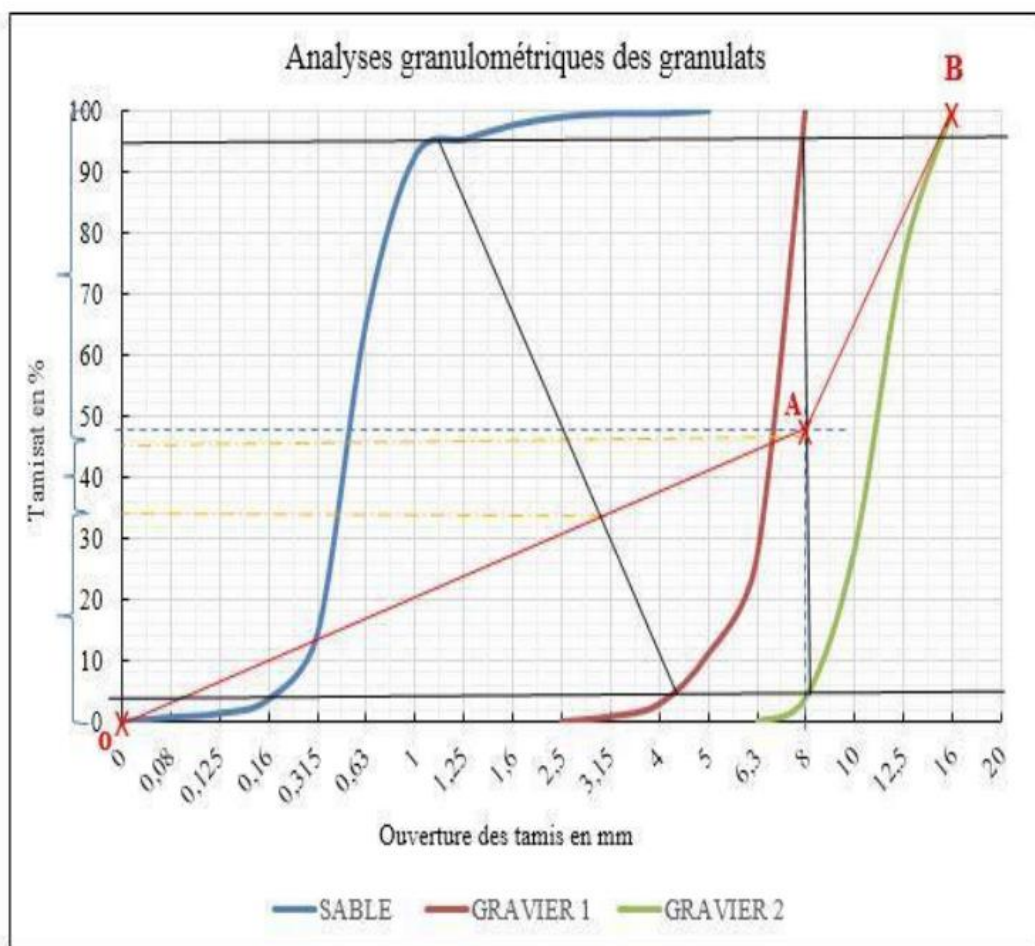


Figure 2-4 : Courbe de référence OAB [9]

D. Évaluation de la compacité et composition théorique du béton

1. Évaluation de la compacité

La compacité du béton est l'un des critères les plus recherchés lors de la formulation du béton. Le coefficient de compacité γ du béton représente le report du volume des matières solide (granulat ciment) au volume total du béton vibre. Il se détermine par la lecture directe du tableau (2-6) qui est fonction de la consistance du béton, du serrage ainsi que de la dimension du plus gros granulat D [7]

Tableau 2-4 : valeur du coefficient de compacité [7]

Consistance	Serrage	Compacité (Co)						
		Dmax=5	Dmax=8	Dmax=12,5	Dmax=20	Dmax=31,5	Dmax=50	Dmax=80
Molle (TP-fluide)	Piquage	0,755	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835

	Vibrati on normal e	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibrati on puissan te	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme(F)	Vibrati on faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibrati on normal e	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibrati on puissan te	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont susceptibles d'être corrigées pour les granulats roulés et peuvent subir l'interpolation linéaire en cas nécessaire.

2. Composition théorique du béton

La composition théorique s'établit en fonction du dosage en ciment, en granulat et du coefficient de compacité.

Le volume absolu des granulats est donné par la relation (1-13) :

$$V = Y - \frac{C}{\rho C} \quad (2-13)$$

Avec :

Y : le coefficient de compacité

C : Le dosage en ciment

ρ_c : La masse volumique du ciment

Les compositions massiques des graviers et du sable s'obtiennent respectivement par les relations (1-14) et (1-15)

$$M_s = r_s * v * \rho_{abs} \quad (2-14)$$

$$M_g = r_g * v * \rho_{abs} \quad (2-15)$$

Avec :

r_s : proportion en sable ;

r_g : proportion en gravier

V : volume du béton

ρ_s : masse spécifique du sable;

ρ_g : masse spécifique des graviers

La masse totale des granulats et la masse volumique théorique du béton s'obtiennent respectivement par les deux relations (1-16) et (1-17)

$$G = M_s + m_g \quad (2-16)$$

Avec :

M_s : masse du sable

M_g : masse des graviers

$$\rho = G_r + C + E \quad (2-17)$$

Avec :

G_r : masse des granulats ;

C : masse du ciment ;

E : masse de l'eau ;

2.7 Propriétés du béton

Le béton étant que matériau de construction possède deux états. Il est soit à l'état frais, soit à l'état durci [7].

2.7.1 Propriété du béton à l'état frais

2.7.1.1 La densité du béton à l'état frais

Elle est déterminée par la relation (1-18)

$$\rho = \frac{M-m}{V} \quad (2-18)$$

Avec :

M : masse de l'éprouvette rempli du béton frais ; **m** : masse de l'éprouvette vide ;

V : Volume de l'éprouvette.

2.7.1.2 Essai d'ouvrabilité du béton

C'est une caractéristique qui rend parfait la mise en œuvre du béton avec succès sur chantier ; et permet à remplir impeccablement les coffrages. Elle conditionne également le ferrailage pour le cas du béton armé et elle agit de façon adéquate à la performance du béton a son état frais. Cette propriété se réfère à la maniabilité et à la consistante du béton frais [10].

L'ouvrabilité du béton s'évalue à l'aide du cône d'Abrams, conformément à la norme NFP 18-451. L'essai consiste à introduire le béton frais dans un moule tronconique (D=20, d=10, H=30cm). En trois couches, où chacune subi 25 coups de piquage à l'aide d'une tige de 16 mm de diamètre, puis le moule a été retiré lentement et la mesure de l'affaissement est prélevée en (cm) [5].

La figure (2-5) : présente la détermination de l'affaissement au cône d'Abrams.



Figure 2-5 : Détermination de l'affaissement au cône d'Abrams

Comme le montre le tableau (2-5), les bétons frais peuvent être classifiés selon différentes valeurs de l'affaissement observées au cône d'Abrams.

Tableau 2-5 : Classe de consistance des bétons [7]

Affaissement en cm	Plasticité	Mise en œuvre	Domaine d'utilisation
0 à 4±1 cm	Ferme	Puissance	Béton de propreté, fondation non armée, voirie.
5 à 9±2 cm	Plastique	Normale	Semelle coffrée, mur de soutènement, plancher, dalles, poteaux, voile
10 à 15±3 cm	Très plastique	Faible	Fondation coulée en fouille, voile de faible épaisseur.
Supérieur à 15±3 cm	Fluide	Léger piquage	Pieux, parois moulés

2.7.2 Propriétés du béton à l'état durci

2.7.2.1 Densité du béton à l'état durci

Elle est régie par la norme << NF EN 12390-7 >> ; et définie par la masse d'une quantité de béton rapporté à son volume après 28 jours de durcissement. La formule (1-19) exprime la masse volumique du béton durci.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

(2-19)

2.8 Résistance à la compression du béton

Le béton étant le matériau qui s'adapte mieux à la compression, la recherche de cette propriété constitue le principal objectif poursuivi lors de la formulation du béton ; c'est elle qui conditionne le chargement du béton pendant le dimensionnement des ouvrages. La résistance à la compression du béton est la capacité de celui-ci à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression [10]. La résistance à la compression s'évalue à partir des essais normalisés qui peuvent être destructifs (au laboratoire sur des éprouvettes) ou non destructifs (pratiqués in situ).

L'essai le plus souvent effectué au laboratoire est un essai destructif normalisé (NF P 18-406, Décembre 1981) appelé « Essai de compression à la presse hydraulique ». La formule ci-dessous donne la résistance à la compression simple des bétons [8].

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (2-20)$$

Avec :

F : la force qui agit sur l'éprouvette en Newton

A : la section de l'éprouvette en mm

2.9 Le pouvoir hydrique du béton

Le pouvoir hydrique du béton s'évalue par l'essai d'absorption d'eau par immersion. Cet essai consiste à immerger des échantillons de béton dans l'eau pendant un certain temps puis à mesurer la variation des masses pour déterminer la quantité d'eau absorbée par la relation (1-21).

$$W = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \quad (2-21)$$

Avec :

M_{sat} : masse de l'échantillon saturé d'eau après immersion à 28 jours ;

M_{sec} : masse de l'échantillon séché.

2.10 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable fournie par la REGIDESO et puisée au robinet. Utilisée également dans la ville de Goma.

Étant donné que la quantité d'eau dans le béton contrôle des propriétés fraîches et durcies du béton, notamment l'ouvrabilité, la résistance à compression, la perméabilité, l'étanchéité à l'eau, la durabilité et les intempéries, le retrait au séchage et le potentiel de fissuration. Pour ces raisons, il est important de limiter et de contrôler la quantité d'eau dans le béton pour améliorer la constructibilité et la durée de vie.

2.11 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons eu à présenter la caractérisation des différents matériaux, ensuite les différents essais effectués sur les matériaux (ciment, sable, gravier, limaille fer) ainsi que ceux effectués sur le béton frais et durci enfin la méthode de formulation de Dreux Gorisse qui sera utilisée dans confection des éprouvettes cylindriques de béton 16*32cm.

Chapitre 3 Présentation et interprétation des résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre consistant à présenter l'originalité de notre analyse, présente d'abord les résultats des essais auxquels ont été soumis les différents matériaux entrant dans la formulation du béton ainsi que le béton proprement dit à l'état frais et durcis. Ensuite, il aborde les différentes variations en pourcentage des limailles de fer ainsi que l'évaluation de leur influence sur le béton ordinaire.

3.2 Caractéristiques des constituants

3.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland nommé «CIMERWA ». Ce dernier provient du RWANDA et acheté au marché .sa résistance caractéristique commerciale est de 42.5 MPa et sa classe vraie est de 38 MPa. Ce ciment a été choisi non seulement suite à son excellente ouvrabilité mais aussi pour sa facilité de mise en œuvre ainsi que sa bonne résistance à longue échéance.

3.2.2 Résultat sur le ciment

La masse volumique absolue a été déterminée par l'équation (2-1) :

$$\rho = \frac{217 - 168,8}{16} = 3,01 \text{ g/cm}^3 \quad (3-1)$$

Notons que, cette valeur nous a servi dans la formulation du béton lors de la détermination du volume absolu des granulats.

3.3 Les granulats

Signalons d'abord que les caractéristiques des granulats déterminées sont ceux ayant intervenus dans la formulation du béton entres autre : l'analyse granulométrique, le module de

finesse du sable, degré de propreté du sable, les masses volumiques absolues et apparentes des granulats (sable, gravier et limailles de fer).

3.3.1 Analyse granulométrique par tamisage

La figure (3-1) présente la composition granulaire du sable et la figure (3-1) quant à elle, présente la composition granulométrique du gravier. Les répartitions granulométriques de sable et de gravier seront présentées respectivement dans le premier et le deuxième tableau de l'annexe 1.

Courbe granulométrique du sable

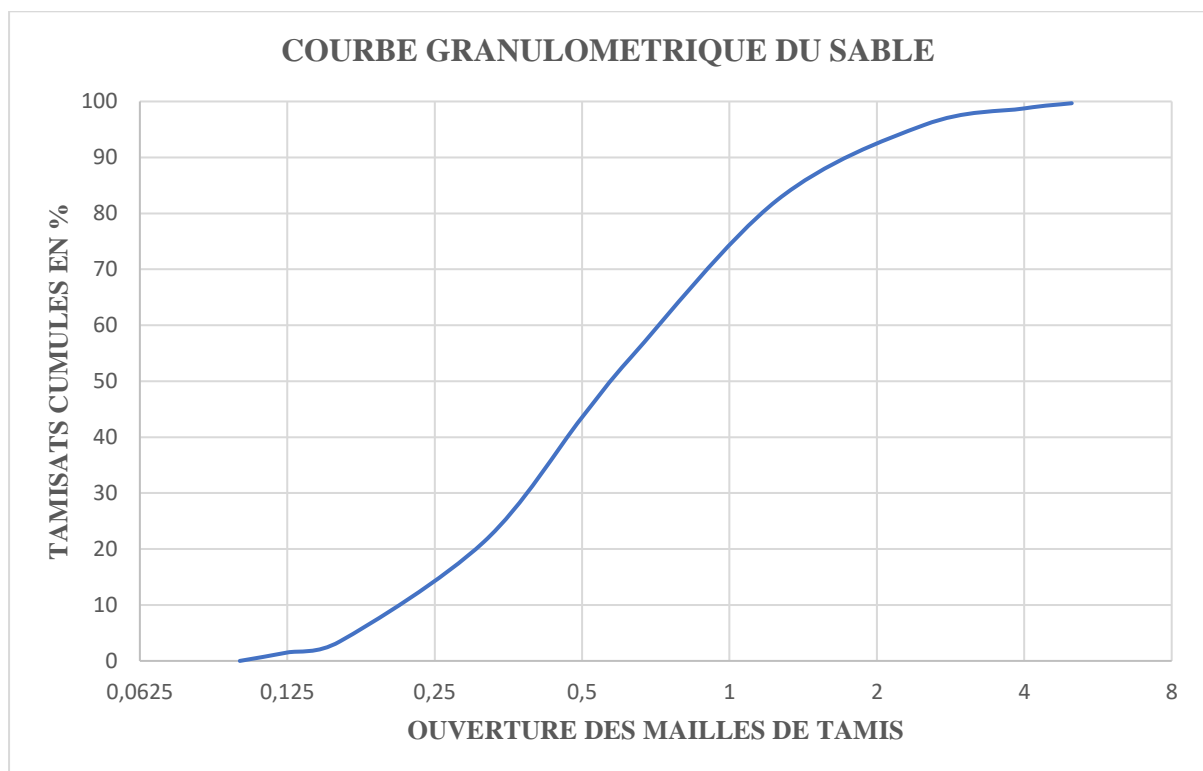


Figure 3-1 : Courbe granulométrique du sable.

La figure (3-1) atteste que la classe granulométrique du sable roulée utilisée est de 0/5.

Le module de finesse du sable obtenu par la formule (2-2) est :

Par l'étudiant Numbere muhingirwa daniel

$$M_f = \frac{0,315+4,195+17,665+45,68+78,735+96,53}{100} = 2,4312 \quad (3-2)$$

La formule valeur du module de finesse 2,4312 atteste que ce sable est convenable pour le béton car elle est comprise entre 2,2 et 2,8.

Courbe granulométrique Gravier concassé 15-25

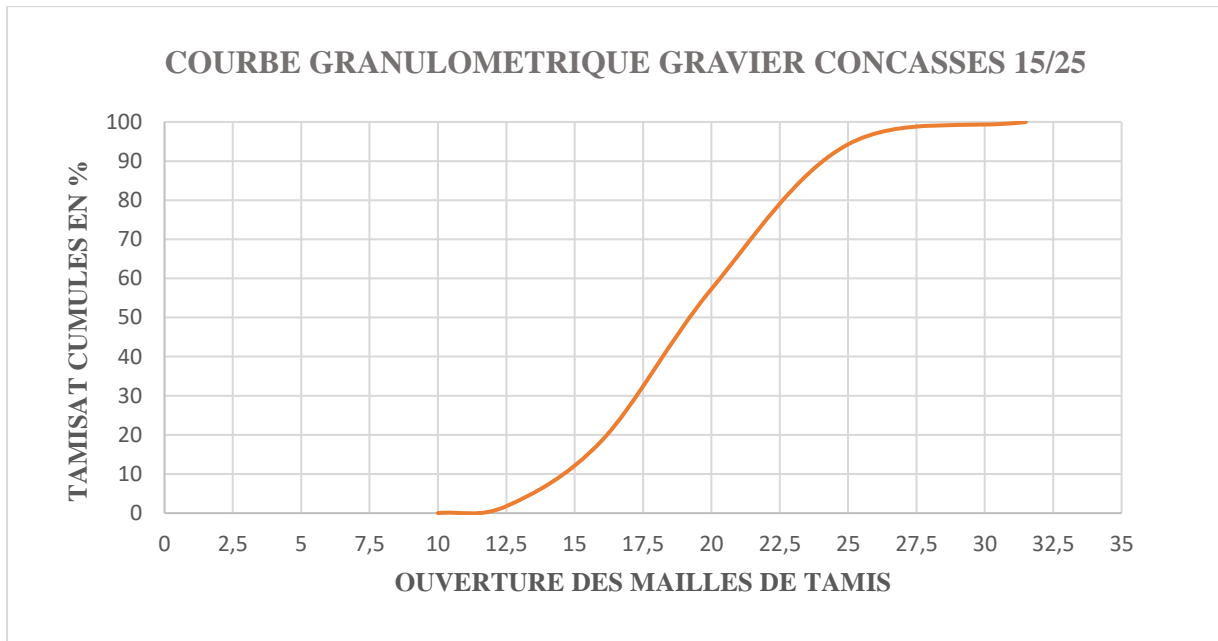


Figure 3-2 : Courbe granulométrique du Gravier concassé 15-25.

La figure (3-2) montre que la classe granulaire du gravier est de 15-25. Il est évident que la dimension du plus gros granulat D_{max} est donc 25mm. Cette dernière est l'une des données de base de la formulation du béton par la méthode de Dreux-Gorisse.

3.3.2 Degré de propreté du sable

Le troisième tableau en annexe 1 atteste que l'équivalent sable est de 86,3% et a été obtenu par la formule (2-5).

Par contre, conformément à la norme XPP18-597 ce sable est très propre et convient pour la formulation du béton.

3.3.3 Masse volumique absolue et apparente des granulats

Les masses volumiques absolues et apparentes sont aussi des caractéristiques physiques des granulats déterminés dans notre étude. Leurs valeurs sont présentées dans le tableau (3-1) et ont été obtenues respectivement par les équations (2-3) et (2-4)

Tableau 3-1: Les masses volumiques absolues et apparentes des granulats utilisés

Granulats	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Graviers	1,19	2,69
Sable	1,32	2,52
Limailles de fer	0,36	1,51

Il en découle les résultats présentés dans le tableau (3-1) que le sable et le gravier utilisés dans cette étude entrent dans la catégorie des granulats courants car leurs masses volumiques absolues sont comprises entre 2 et 3 g/cm³ ;

3.3.4 Essai los Angeles du gravier

Le coefficient trouvé par la relation (2-3) est de :

$$CLA = \frac{0,722}{5} \times 100 = 14,459\% \quad (3-3)$$

Cette valeur nous montre que notre gravier est très bon pour le béton car elle est inférieure à 15% conformément à la norme NF P 18573.

3.4 Résultats de la formulation

Le tableau (3-2) présente les données de base et hypothèses pour la formulation du béton de ce travail.

Tableau 3-2 : Données de base et hypothèse du travail

Resistance visée en compression du béton a 28jours (MPa)	20
Dmax(mm)	25
Affaissement plastique (cm)	7
Coefficient granulaire	0,50
Classe vraie du ciment (MPa)	38

3.4.1.1 Détermination de la composition granulaire

La détermination du dosage en granulat d'un béton passe par : le traçage de la courbe de référence, la détermination des proportions en volume des granulats, la détermination du coefficient de compacité du béton afin d'aboutir à la composition théorique du béton.

i. Traçage de la courbe OAB

- O (0,08 ; 0) : l'origine de la courbe de référence.
- B (25 ; 100) : en abscisse on a la dimension Dmax du plus gros granulat et en ordonné ; 100% des tamis.
- A :

Y_A ; l'ordonné du point A, a été obtenu par la relation (2-12) :

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

$$D \text{ ou } Y_A = 50 - \sqrt{1,25} * 25 + 2 + 0 + 0 = 46,41\%.$$

La proportion en volume des granulats est reprise sur la figure (3-4) :

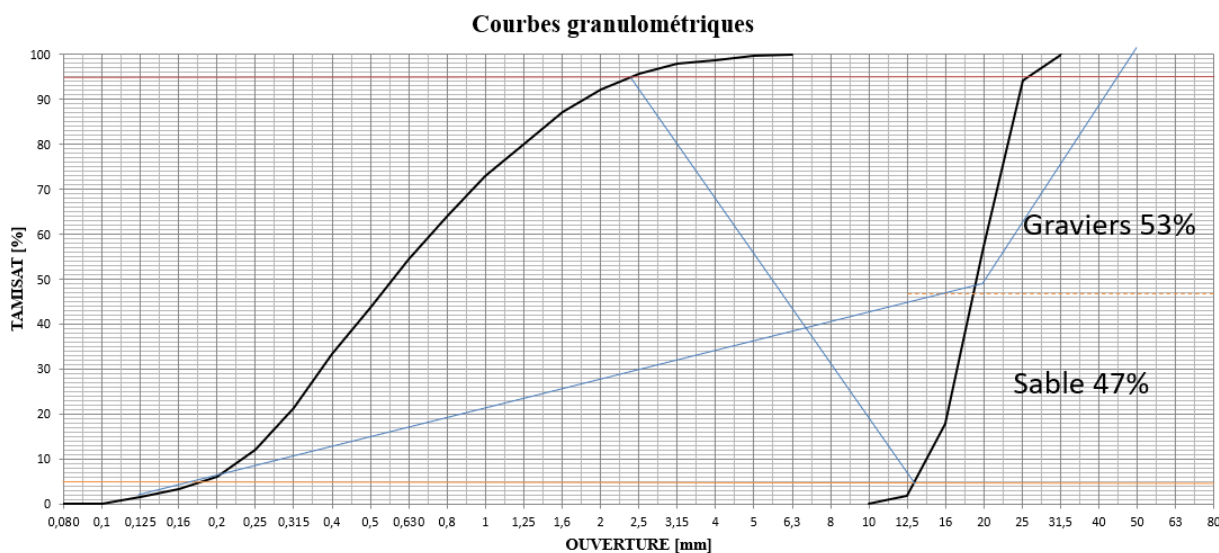


Figure 3-3 : Traçage de la courbe optimale de Dreux

3.4.1.2 Substitution partielle du sable et ajout des limailles de fer

En premier lieu nous avons substituer 10% de la proportion du sable et obtenir la nouvelle proportion du sable par la formule (2-18).

Tableau 3-3 : Substitution partielle du sable et ajout des limailles

Types de béton	Masse de sable substitué (kg/cm ³)	Masses des limailles obtenues (kg /cm ³)	% en sable	% en limailles de fer

BO	838,5552	0	47	0
BN ₁₀	660,1392	178,416	37	10
BN ₂₀	481,7232	356,832	27	20
BN ₃₀	303,3072	535,248	17	30
BN ₄₀	124,8912	713,664	7	40
BN ₅₀	53,5248	785,0304	3	44

Le tableau (3-3) présente différentes proportions de substitution, exprimées en pourcentage allant de 0%(témoin) a un pourcentage maximal a l'instar de 10%,20%,30%,40 %et 50%, afin d'analyser l'influence de ces ajouts sur des paramètres tels que la résistance à la compression, la densité, la porosité et autres propriétés pertinentes. Chaque ligne du tableau ci-haut correspond a une formulation spécifique du béton avec un taux de substitution donnée, permettant ainsi d'évaluer comment l'incorporation de limailles de fer modifier le comportement du matériau par rapport à un béton de référence sans substitution.

Tableau 3-4 : Dosage des constituants en Kg/m³ pour chaque type de béton

Types de beton	C/E	Dosage des constituants en Kg/m ³				
		Ciment	Eau	Sable	Gravier	limailles de fer
BO	1,71	342	200	839,2	1010,1	0
BN10	1,71	342	200	660,1392	1010,1	178,416
BN20	1,71	342	200	481,7232	1010,1	356,832
BN30	1,71	342	200	303,3072	1010,1	535,248

BN40	1,71	342	200	124,8912	1010,1	713,664
BN50	1,71	342	200	53,5248	1010,1	785,0304

Le tableau (3-4) montre le dosage pondéral (en masse) des constituants du béton dans les éprouvettes cylindriques (16*32) de volume 0,00643072 m³, en considérant un coefficient de sécurité de 1,4 pour chaque constituant.

Tableau 3-5 : Dosage des constituants en Kg dans des éprouvettes cylindrique

Type de béton	Dosage des constituants en Kg dans des éprouvettes cylindriques				
	Ciment	Eau	Sable	Gravier	Limaille de fer
BO	6,5	3,8	839,2	19,4	0
BN10	6,5	3,8	14,57	19,4	1,6
BN20	6,5	3,8	12,95	19,4	3,2
BN30	6,5	3,8	11,33	19,4	4,8
BN40	6,5	3,8	9,7	19,4	6,4
BN50	6,5	3,8	8,09	19,4	8,09

Nous avons dénommé les bétons de la manière suivante :

- **BO** : béton ordinaire (ou de référence).
- **BN₁₀** : béton ordinaire chargé de limaille de fer non traités (10%).
- **BN₂₀** : béton ordinaire chargé de limailles de fer non traités (20%).

- **BN₃₀** : béton ordinaire chargé de limailles de fer non traités (30%).
- **BN₄₀** : béton ordinaire chargé de limailles de fer non traités (40%).
- **BN₅₀** : béton ordinaire chargé de limailles de fer non traités (50%).

3.5 Densité

3.5.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité du béton a été déterminée à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. L'essai a consisté à remplir une masse de béton frais dans le cône tronconique en trois couches tassées avec une tige d'acier, dont chacun subit 25 coups de piquages. Après démoulage ; l'affaissement est alors mesuré à l'aide d'une règle normalisée.

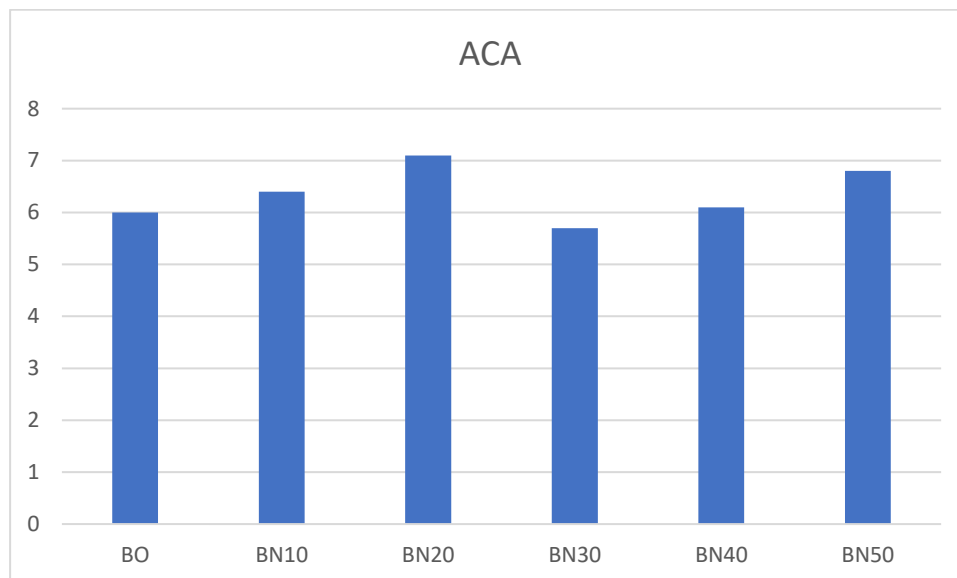


Figure 3-4 : Valeur de l'affaissement des différents bétons utilisés

L'histogramme de la figure (3-5) montre que l'affaissement du béton diminue avec l'augmentation du taux des limailles de fer dans le béton. Cette diminution est essentiellement justifiée par l'absorption d'une grande quantité d'eau de gâchage qui influe évidemment sur l'ouvrabilité des mélanges.

L'affaissement au cône diminue de 7 cm à 6cm soit 14,28% de chute pour une incorporation de 50% des limailles de fer au béton ordinaire. Cette chute doit être prise en compte lors de la mise en œuvre de ces types de bétons en augmentant une proportion d'eau tout en tenant compte de l'affaissement au cône désirée.

Dans notre cas ; le tableau (3-6) montre la manière selon laquelle nous avons augmenté la proportion en eau pour atteindre 7cm ; l'affaissement désiré au cône d'Abrams.

Tableau 3-6 : Variation de la proportion d'eau

Types de béton	Proportion d'eau ajoutée en %
BO	0
BN ₁₀	16
BN ₂₀	16
BN ₃₀	12
BN ₄₀	12
BN ₅₀	12

3.5.2 Masse volumique du béton à l'état frais

La lecture de l'histogramme de la figure (3-6) montre clairement que la masse volumique du béton à l'état frais diminue considérablement en augmentant la proportion des limailles de fer.

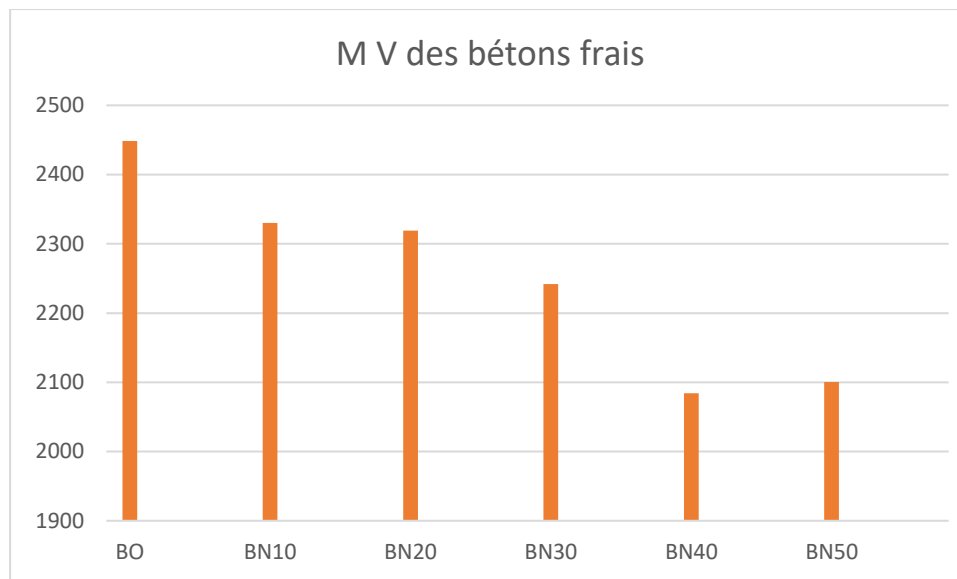


Figure 3-5 : Évaluation des masses volumiques du béton à l'état frais

On observe une diminution de 2448,66 Kg/m³ à 2100,33 Kg/m³ de la masse volumique soit 14,2 % pour une incorporation de 50% des limailles de fer au béton ordinaire. Ceci s'explique par la faible masse volumique des limailles de fer incorporée dans le béton.

3.6 Propriétés des bétons à l'état durcis

3.6.1 Masse volumique du béton durcis

La masse volumique des bétons durcis a été mesurée après séchage des échantillons de béton au soleil jusqu'à ce que leurs masses restent constantes. La lecture de l'historique de la figure 3-7 montre clairement que plus on augmente la quantité des limailles de fer dans le béton, plus la masse volumique du béton à l'état durcis diminue considérablement. Ceci s'explique par la faible masse volumique de la limaille de fer.

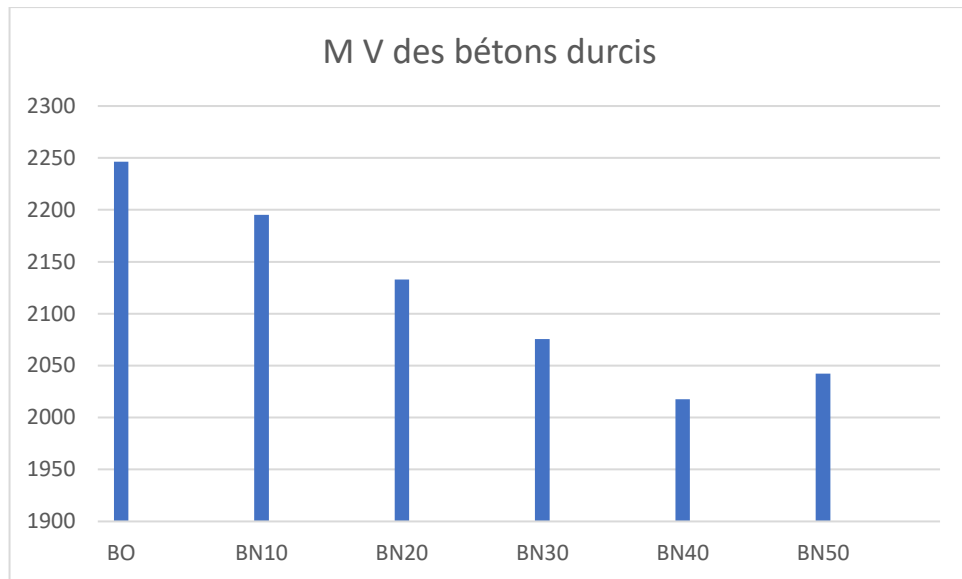


Figure 3-6 : Évaluation des masses volumiques a l'état durci

On observe une diminution de 2246,5 Kg/m³ à 2042,17 Kg/m³ soit 9,1% pour une incorporation de 50% de limaille de fer au béton ordinaire. Ceci s'explique par la faible masse volumique de la limaille fer incorporée dans le béton.

3.6.2 Pouvoir hydrique

Les résultats du pouvoir hydrique du béton sont illustrés dans l'histogramme de la figure (3-8).

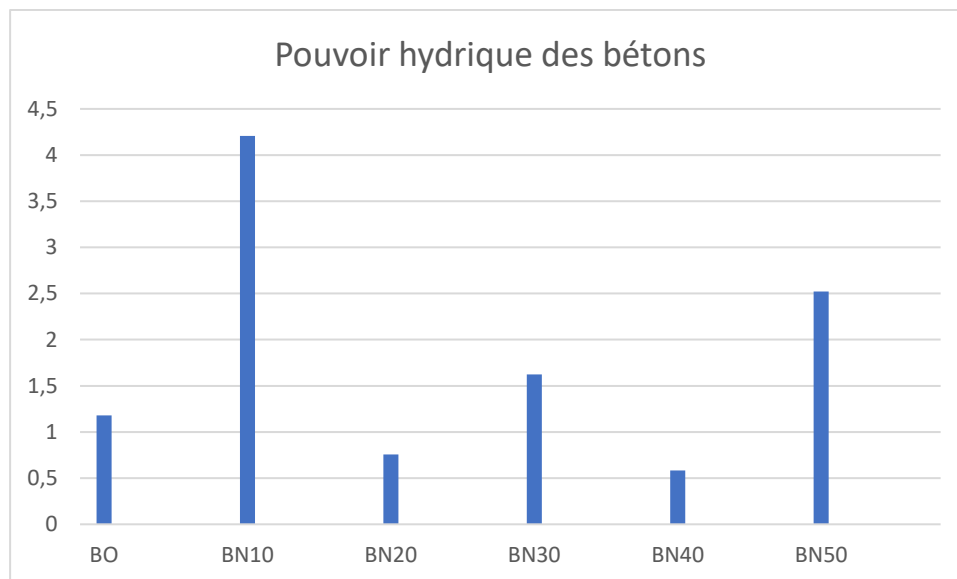


Figure 3-7 : Évaluation du pouvoir hydrique du béton a l'état durcis

Comme le montre la figure (3-8) l'incorporation des limailles de fer augmente le pouvoir hydrique (la capacité d'absorption d'eau) du béton. Cette augmentation s'explique par sa capacité à réagir avec l'eau et à favoriser une meilleure hydratation des composants cimentaires qui à son tour contribue à augmenter la disponibilité de l'eau dans la matrice, renforçant ainsi le pouvoir hydrique du béton.

3.6.3 Résistance a la compression

Les essais de compression ont été réalisés après 28 jours par écrasement des éprouvettes cylindriques 16*32 à l'aide de la presse hydraulique. Les résultats obtenus de la résistance à la compression sont illustrés dans la figure (3-9).

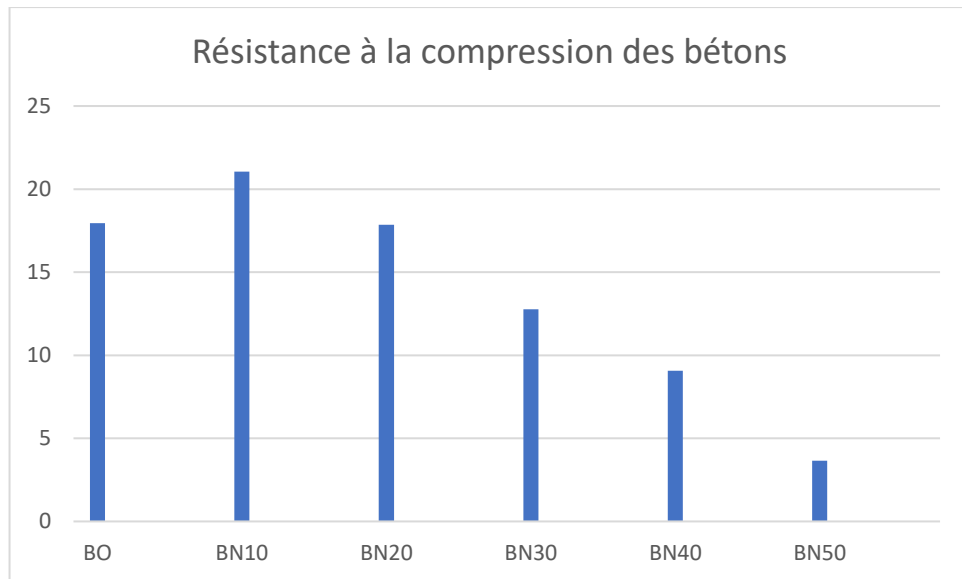


Figure 3-8 : Évaluation de la résistance à la compression

Après 28 jours de durcissement, on remarque une chute de résistance de 17,94 MPa à 3,65 MPa soit 79,65 % pour une incorporation de 50% au béton de ordinaire (ou de référence). Les résultats ont montrés que lorsque la limaille de fer était utilisée pour remplacer le sable de 10% et 20%, la résistance à la compression du béton augmentait de 17 % par rapport au mélange témoin (0% de limaille de fer); 0,5% respectivement, tandis que la résistance à la compression du mélange à 30%, 40%, et 50% de la limaille de fer diminuait de 28%; 49%; 79,6%; par rapport au béton témoin.

L'augmentation constatée par les mélanges de limailles de fer à 10 et 20% pourrait être attribuée à la résistance et à la ténacité de la limaille de fer ainsi qu'à ses propriétés pouzzolaniques.

3.7 Conclusion partielle

Ce chapitre a révélé de manière succincte les différents résultats et interprétations conformes aux échantillons considérés. S'ouvrant par une brève introduction, celui-ci a présenté d'abord les résultats relatifs à la caractérisation des granulats puis l'exhibition des résultats conformes à la formulation du béton. Les limailles de fer présentent une grande influence sur les propriétés du béton. L'augmentation des limailles de fer provoque une diminution de la maniabilité, de la masse

volumique et de la résistance mécanique à la compression suite à l'absorption de l'eau par les limailles de fer.

Conclusion générale

Dans cette recherche nous avons étudié l'influence de l'incorporation des limailles de fer sur les caractéristiques du béton à l'instar de l'ouvrabilité, la masse volumique, le pouvoir hydrique et la résistance à la compression. La caractérisation des matériaux nous a permis de formuler efficacement les différents bétons étudiés. Pour fixer les constituants, nous avons utilisé la méthode de Dreux Gorisse. La variation des pourcentages en limailles de fer dans les bétons confectionnés respectivement à 10%, 20%, 30%, 40% et 50% a montré que celles-ci influencent les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

Avec un remplacement de limaille de fer à 30%, il y a eu une réduction des résistances à la compression à 28 jours de durcissement et cette réduction reste proportionnelle puisque le pourcentage à augmenter vers 50%. L'augmentation en pourcentage des résistances à la compression à un remplacement de 10% et 20%. Le pourcentage de réduction des résistances à la compression de 30% à un remplacement de 50% est de 79,6% ; ce qui représente une diminution de la résistance de 21% pour chaque augmentation de 10% du remplacement des déchets à partir de 30% et plus.

Il est cependant recommandé que le béton produit dans ces conditions (remplacement de 10% et 20%) puisse être utilisé à toutes fins de construction où le béton est requis. De plus, étant donné que la construction de chaussée (route) nécessite d'énormes travaux de terrassement et que parfois les bancs d'emprunt ne sont pas facilement disponibles ou accessibles, il est donc recommandé d'étudier ces fameux déchets pour vérifier leurs aptitudes comme sous-couches et matériaux de base pour les projets de travaux routiers.

Notons qu'à partir des résultats ci-dessus, nous pouvons assurer l'amélioration des propriétés du mélange de béton grâce à l'ajout de limailles de fer. Dans notre travail, de nombreux avantages ont été obtenus grâce à l'incorporation des limailles de fer dans le béton. Ceux-ci réduisent la pollution des sols et protègent l'environnement.

En effet ; sur base des expériences réalisées dans le cadre de la présente recherche, on peut conclure que la limaille de fer peut constituer une alternative au sable dans la production du béton.

Cela entrainerait une résistance à la compression, mais également la maniabilité du béton due à une teneur élevée en particule de fer.

Bibliographie

- [1] M. Samira, «caractéristique et modification des paramètres physico-hygro-mécanique d'un béton léger à base des granulats composites,» TIZI -OUZOU, 2014.
- [2] K. M.-G. e. i. ., H. H. Noori, «Propriétés mécaniques du béton utilisant des déchets de fer comme solution partielle,» 2018.
- [3] «www.worldsteel.org».
- [4] F. O. ., M. e. O. Olutoge, «Propriétés de résistance du béton produit avec de la limaille de fer comme remplacement du sable,» 2017.
- [5] M. Abdias, «Étude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma inédit,» 2017-2017.
- [6] G. P. Neeja VS, «Comportement mécanique des déchets industriels mélangés à des fibres de polypropylène dans le béton,» 2015.
- [7] C. A. Alinabiwe, «Support physique et technologie du béton,» 2021-2022.
- [8] R. Alain, «Étude du béton drainant,» Antananarivo, 2022.
- [9] B. alain, «Influence des fines particules du sable concassé sur les propriétés du béton . inédit,» Goma , 2020.
- [10] «Caractéristique physico-mécanique des granulats».
- [11] B. Boukhalouf, «liants et bétons PARTIE I,» République algérienne démocratique et populaire , 2022.
- [12] B. Olivier, «Étude de l'impact du super -plastifiant polycarboxylate sur les propriétés physico-mécaniques des bétons confectionnés à Goma,» Goma, 2019.
- [13] M. A. o. e. A. o. Festus Adeyemi olutoge, «Propriétés de résistance du béton produit avec de la limaille de fer comme remplacement du sable,» 2017.
- [14] H. A. -G. Ahmed S, «Effet du remplacement du sable par des scories de fer sur les propriétés physiques , mécaniques et radiologiques du mortier de ciment,» 2015.
- [15] J. S. Nagaraja, «Effet des granulats recyclés et des scories de fer dans le béton Élément,» 2017.

[16] p. a. R. s. Chetan khajuria, «Utilisation des scories de fer comme remplacement partiel du sable par le beton,» 2014.

ANNEXES

ANNEXES 1 : ESSAI SUR LES GRANULATS

1. Composition granulométrique du sable roulé du Rwanda 0/5

ANALYSE GRANULOMETRIQUE				
1. SABLE				
Prise d'essai : 2000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
5	1,5	1,5	0,075	99,925
4	46,7	48,2	2,41	97,59
2,5	145,1	193,3	9,665	90,335
1,25	400,7	594	29,7	70,3
0,63	452,7	1046,7	52,335	47,665
0,5	150,3	1197	59,85	40,15
0,315	364,1	1561,1	78,055	21,945
0,16	302,3	1863,4	93,17	6,83
0,125	59,1	1922,5	96,125	3,875
0,1	30	1952,5	97,625	2,375
MF= (1/100) *SOMME Refus cum % au tamis de (5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,16)				
2.GRAVIER CONCASSE 15/25				
Prise d'essai : 5000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
31,5	0	0	0	100
25	286	286	5,72	94,28
20	1850	2136	42,72	57,28
16	1934	4070	81,4	18,6
12,5	842	4912	98,24	1,76
10	88	5000	100	0

2. Équivalent de sable

EQUIVALENT DE SABLE				
Prise d'essai : 120g				
Éprouvette numéro 01				
LECTURE A LA REGLE (cm)	H1	11,7	ES	95,72649 6
	H2	11,2		
LECTURE AU PISTON (cm)	H1	11,7	ES	90,08547
	H2	10,54		
Éprouvette numéro 02				
LECTURE A LA REGLE (cm)	H1	11,2	ES	91,96428 6
	H2	10,3		
LECTURE AU PISTON (cm)	H1	11,2	ES	93,75
	H2	10,5		
Moyenne lecture à la règle		93,845391		
Moyenne lecture au piston		91,917735		
Moyenne des moyennes		92,881563		

3. Coefficients d'uniformité

COEFFICIENT D'UNIFORMITE

1. GRAVIERS CONCASSES 15/25

D60	20,3	CU	1,4295775
D10	14,2		

3. SABLE

D60	0,755	CU	3,4953704
D10	0,216		

COEFFICIENT DE COURBURE

1. GRAVIERS CONCASSES 15/25

D60	20,3	CZ	1,0227187
D30	17,17		
D10	14,2		

3. SABLE

D60	0,755	CZ	0,9183775
D30	0,387		
D10	0,216		

4. Masse volumique absolue du sable roulé 0/5

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

1. SABLE

ESSAI	Masse sèche(g)	300	ρ₁	2,5	MO
1	V1(ml)	350			

	V2(ml)	470				
ESSAI 2	Masse sèche(g)	300	ρ ₂	2,5423729	2,5211g/Cm ³	
	V1(ml)	200				
	V2(ml)	318				
ESSAI 3	Masse sèche(g)	300	ρ ₃	2,5210084		
	V1(ml)	240				
	V2(ml)	359				
2. GRAVIERS CONCASSES 15/25						
ESSAI 1	Masse sèche(g)	500	ρ ₁	2,6595745		
	V1(ml)	600				
	V2(ml)	788				
ESSAI 2	Masse sèche(g)	500	ρ ₂	2,7173913	2,6932g/Cm ³	
	V1(ml)	500				
	V2(ml)	684				
ESSAI 3	Masse sèche(g)	500	ρ ₃	2,7027027		
	V1(ml)	450				
	V2(ml)	635				
MOYENNE						

5. Masse volumique apparente du gravier concassé 15/25

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE SABLE			
Masse R1(g)	297,1	ρ ₁	1,2967042
Masse R2(g)	302,6	ρ ₂	1,3262287
Masse R3(g)	305,1	ρ ₃	1,3419163
MOYENNE			
1,321616402g/Cm³			

**6. MASSE
VOLUMIQUE
APPARENTE
GRAVIER
15/25**

Masse R1(g)	274,9	ρ_1	1,1874148	MOYENNE	1,192689341g/Cm³
Masse R2(g)	283,9	ρ_2	1,2345788		
Masse R3(g)	267,5	ρ_3	1,1560745		

7. ESSAI SUR LES LIMAILLES DE FER

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE (g/ml)

ESSAI 1	Masse sèche (g)	78	ρ_1	0,975
	V1(ml)	1170		
	V2(ml)	1250		
ESSAI 2	Masse sèche (g)	78	ρ_2	2,6
	V1(ml)	1170		
	V2(ml)	1200		
ESSAI 3	Masse sèche (g)	78	ρ_3	0,975
	V1(ml)	1170		
	V2(ml)	1250		
MOYENNE				1,5166667

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (g/ml)				
ESSAI 1	m tare (g)	32,1	ρ1	0,35899144
	V tare (cm3)	189,141		
	m tare rempli (g)	100		
ESSAI 2	m tare (g)	32,2	ρ2	0,36903686
	V tare (cm3)	189,141		
	m tare rempli (g)	102		
ESSAI 3	m tare (g)	32,4	ρ3	0,37855357
	V tare (cm3)	189,141		
	V tare rempli (cm3)	104		
Moyenne				0,36886062

8. TAUX D'ABSORPTION D'EAU

1. GRAVIERS CONCASSES 15/25

Masse avant immersion (g)	500
Masse après immersion (g)	511,5

Taux d'absorption	2,3
Porosité	2,743185483

ESSAI LOS ANGELES

1. GRAVIERS CONCASSES 15/25

Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	12
Poids des particules inférieures à 1,6 (en gramme)	722,95

Coefficient LA trouvé **14,459**

i. Estimation du coefficient de compacité

Après interpolation des valeurs du tableau (2-6), le coefficient de compacité obtenue est de 0,82217.

ii. Composition théorique du béton

Le volume absolu qu'occupe les granulats (sable, gravier) a été déterminé par la formule (2-13).

$$V_{\text{abs granulats}} = \gamma - \frac{C}{\rho C} = 0,822 - \frac{342}{3.01} = 0,708 \text{ m}^3$$

Cela signifie que les granulats (sable, graviers) occupent $0,708 * 100 = 70,8\%$ dans 1m^3 de béton.

La proportion en sable étant de 47% ; sa masse dans 1m^3 de béton a été déterminée par la formule 2-14 comme suit :

$$m_s = r_s * V_{\text{abs}} * \rho_{\text{abs}} = 0,47 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 838,5552 \text{ Kg/m}^3$$

La proportion en gravier étant de 53% ; sa masse dans 1 m³ de béton a été déterminée par la formule 2-15 comme suite :

$$m_g = r_g * V_{abs} * \rho_g = 0,53 * 0,708 * 2,69 * 1000 = 1009,3956 \text{ Kg}/m^3$$

iii. Substitution partielle du sable par les limailles de fer

En premier lieu nous avons substituer 10% de la proportion du sable et obtenir la nouvelle proportion du sable par la formule 2-18

$$\checkmark \%S = 37\%$$

$$\checkmark \%IF = 10\%$$

D'où :

$$m'_s = 0,37 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 660,1392 \text{ Kg}/m^3$$

$$m_{IF} = 0,1 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 178,416 \text{ Kg}/m^3$$

En deuxième lieu nous avons substitué 20% de la proportion du sable et obtenir la nouvelle proportion du sable par la formule 2-18.

$$\checkmark \%S = 27\%$$

$$\checkmark \%IF = 20\%$$

D'où :

$$m'_s = 0,27 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 481,7232 \text{ Kg}/m^3$$

$$m_{IF} = 0,2 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 356,832 \text{ Kg}/m^3$$

En troisième lieu nous avons substitué 30% de la proportion du sable et obtenir la nouvelle proportion du sable par la formule 2-18.

Par l'étudiant Numbere muhingirwa daniel

✓ %S = 17%

✓ %IF = 30%

$$m's = 0,17 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 303,3072 \text{ Kg}/m^3$$

$$mIF = 0,3 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 535,248 \text{ Kg}/m^3$$

En quatrième lieu nous avons substitué 40% de la proportion du sable et obtenir la nouvelle proportion du sable par la formule 2-18.

✓ %S = 7%

✓ %IF = 40%

D'où :

$$m's = 0,07 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 124,8912 \text{ Kg}/m^3$$

$$mIF = 0,4 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 713,664 \text{ Kg}/m^3$$

En cinquième lieu nous avons substitué 50% de la proportion du sable et obtenir la nouvelle proportion du sable par la formule 2-18.

✓ %S = 3%

✓ %IF = 44%

$$m's = 0,03 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 53,5248 \text{ Kg}/m^3$$

$$mIF = 0,44 * 0,708 * 2,52 * 1000 = 785,0304 \text{ Kg}/m^3$$

Le tableau (3-3) montre le dosage pondéral (en masse) des constituants du béton dans un volume de 1

ANNEXES 2 : ESSAIS SUR LES BETONS

1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

Désignation	Qté d'eau théorique (kg)	Affaissement (cm)	Type de consistance		
BO	5,0	6	Ferme		
BN10	5,8	6,4	Ferme		
BN20	5,8	7,1	Ferme		
BN30	5,6	5,7	Ferme		
BN40	5,6	6,1	Ferme		
BN50	5,6	6,8	Ferme		
Proportion d'eau ajoutée (%) pour atteindre l'affaissement désiré					
BO	BN10	BN20	BN30	BN40	BN50
0	16	16	12	12	12

2. Masses volumiques

Masse volumique du béton durcis à l'état durcis			
Types de béton	Masses sèches	M volumique	Moyenne
BO	14,4	2239,25159	2246,50843
	14,37		
	14,57		
BN10	14,25	2215,92605	2195,19224
	13,82		
	14,28		
BN20	14,054	2185,44735	2132,83531
	13,856		
	13,237		
BN30	13,758	2139,41829	2075,50632
	13,771		
	12,512		
BN40	13,876	2157,76771	2017,71082
	12,779		
	12,271		
BN50	12,306	1913,62709	2042,17672
	13,282		
	13,81		

3. Masse volumique du béton frais			
Types de béton	M béton frais	M volumique	Moyenne
BO	15,7	2441,40625	2448,66308
	15,87	2467,84186	
	15,67	2436,74114	
BN10	15,35	2386,98	2329,96202
	14,72	2289,01274	
	14,88	2313,89331	
BN20	15,2	2363,65446	2318,92126
	14,7	2285,90267	
	14,837	2307,20666	
BN20	14,85	2309,2282	2241,84332
	14,78	2298,34295	
	13,62	2117,9588	
BN30	13,97	2172,38505	2084,26635
	12,87	2001,33111	
	13,37	2079,0829	
BN40	12,8	1990,44586	2100,33506
	13,82	2149,05951	
	13,9	2161,4998	

4. Pouvoir hydrique

Pouvoir hydrique du béton				
Types de béton	M humide (kg)	M sèche (kg)	p hydrique (%)	Moyenne
BO	14,81	14,4	2,84722222	1,17976516
	14,43	14,37	0,41753653	
	14,61	14,57	0,27453672	
BN10	15,35	14,25	7,71929825	4,20624182
	14,41	13,82	4,26917511	
	14,37	14,28	0,6302521	
BN20	14,24	14,054	1,32346663	0,75489132
	13,91	13,856	0,38972286	
	13,31	13,237	0,55148448	
BN30	13,941	13,758	1,33013519	1,6247362
	13,81	13,771	0,28320383	
	12,92	12,512	3,26086957	
BN40	13,94	13,876	0,46122802	0,58178463
	12,84	12,779	0,47734565	
	12,37	12,271	0,80678021	
BN50	12,801	12,306	4,02242808	2,52315647
	13,58	13,282	2,24363801	
	13,99	13,81	1,30340333	

5. Résistance à la compression

Types de béton	Force max	Resistance	R Moyenne
BO	340,57	16,94	17,9466667
	244,39	17,1	
	229,243	19,8	
BN10	336,42	19,88	21,06
	369,93	22,65	
	398,23	20,65	
BN20	348,12	17,49	17,85333333
	350,69	17,98	
	368,19	18,09	
BN30	233,51	12,64	12,77333333
	221,57	12,05	
	232,92	13,63	
BN40	198,466	8,897	9,06466667
	194,525	8,707	
	132,502	9,59	
BN50	104,698	5,207	3,65366667
	76,174	3,789	
	39,501	1,965	

6. Formulation

I. FORMULATION A 20Mpa				
1. POUR GRAVIERS CONCASSES 15/25				
	Valeur	Unité		
Résistance visée	20	Mpa		
Classe vraie	38	Mpa		
Affaissement	7	Cm	Valeur	Unité
Diamètre max	25	mm	342	Kg/m ³
Résistance en compression désirée à 28jours	23	Mpa	199,9384615	Litres
Coefficient granulaire G	0,5			
Rapport C/E	1,710526316		Dosage en ciment	
			Dosage en eau	
COURBE OAB				
	Valeur	Unité		
XA	11,25	mm	Coefficients correcteurs	
YA	46,41	mm	Mf	2,63
			K	2
Pourcentage en sable	47	%	K'	0,78
Pourcentage en graviers	53	%		
VOLUME ABSOLU DES GRANULATS				
	Valeur	Unité		
Coefficient de compacité	0,82217			
Dosage en ciment	342	Kg/m ³		
Masse volumique du ciment	3010	Kg/m ³		
Volume total granulats	0,7085487	m ³		
Volume absolu graviers	0,3755308	m ³		

Volume absolu sable	0,3330179	m ³
MASSE DES GRANULATS		
	Valeur	Unité
Masse volumique absolue du sable	2520	Kg/m ³
Masse volumique absolue du gravier	2690	Kg/m ³
Masse de sable nécessaire pour 1m ³ de béton	839,20512	Kg
Masse de gravier nécessaire pour 1m ³ de béton	1010,1779	Kg