UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Contribution à l'étude des propriétés mécaniques du béton contenant des fibres plastiques : cas des déchets des bouteilles plastiques servant à la conservation de l'eau de boisson

MALIBITA, Billy

2023-07
UB
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/362

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Master en Génie Civil

Option: Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année Académique: 2021-2022

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES MECANIQUES DU BETON CONTENANT DES FIBRES PLASTIQUES : CAS DES DECHETS DES BOUTEILLES PLASTIQUES SERVANT A LA CONSERVATION DE L'EAU DE BOISSON.

Mémoire

Présenté publiquement par :

MALIBITA Billy

En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences de l'Ingénieur Option:

Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets.

Soutenu le……/…../2023 devant le jury composé de:

Dr. Ir. MASEKANYA Jean Pierre : Président

Prof. MIKEREGO Emmanuel : Lecteur principal

Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel : Directeur

Dr. Ir. MINANI Jérémie : Membre

Bujumbura, Juillet 2023

Identification des membres du jury

Dr. Ir. MASEKANYA Jean Pierre : Président

Prof. MIKEREGO Emmanuel : Secrétaire

Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel : Directeur

Dr. Ir. MINANI Jérémie : Membre

Dédicace

Je rends grâce à Dieu et dédie particulièrement ce modeste travail **:**

A mes chers parents NZABI KASURUSURU EMILE et NAKABUYA AGATHE pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de mon cursus académique,

A mes frères et sœurs qui m'ont épaulé en tout temps,

A mes tantes BALUMISA CHRISTINE et TANGAZO NAMUTABESHA,

A mon cher oncle DESIRE SHAMAVU,

A toute la famille KASURUSURU,

A tous les professeurs qui ont contribué à ma formation,

A toute ma promotion de master en Génie civil,

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Remerciements

L'accomplissement de ce mémoire de fin du cycle de master est le fruit des efforts conjugués de plusieurs personnes à qui j'adresse mes vifs remerciements.

Je tiens dans un premier temps à remercier DIEU le Tout-Puissant, Maitre des temps et des circonstances de m'avoir donné la volonté et le courage pour achever ce parcours académique.

Mes vifs remerciements vont à l'égard de mon Directeur de mémoire, Dr Ir Daniel HATUNGIMANA pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'être le directeur de ce travail. J'ai beaucoup apprécié ses compétences scientifiques et il a su me faire profiter de son expérience et de ses directives fructueuses.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membres du jury et de bien vouloir examiner ce travail.

Ma profonde gratitude s'adresse à tout le personnel de l'université du Burundi, spécialement à tous les professeurs de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur (FSI) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin un grand merci à tous mes collègues de classe du cycle de master pour la meilleure collaboration et entraide mutuelle durant ce parcours.

Résumé

L'ajout des déchets (les fibres) dans les matériaux de construction, particulièrement les bétons, est une technique de plus en plus utilisée, pour plusieurs raisons, soit écologique, soit économique, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci. Les propriétés mécaniques du béton de fibres dépendent de plusieurs facteurs qui sont les conditions de mise en œuvre, le dosage, la nature, l'élancement et la distribution des fibres dans le béton.

Dans ce travail nous avons étudié le comportement du béton à base des fibres des déchets plastiques obtenues mécaniquement par découpage des bouteilles plastiques.

Notre travail consiste à l'étude de l'influence de l'ajout des fibres plastiques à différents pourcentages (0.5%, 1.5%, 2%) sur le comportement mécanique du béton (traction par flexion et compression) en le comparant avec un béton ordinaire qui ne contient pas de fibres (0% de fibre).

Les résultats obtenus montrent que la résistance mécanique en traction par flexion du béton renforcé par les déchets de fibres plastiques donne une résistance meilleure à celle du béton ordinaire sans fibre. Pour un dosage de 2% de fibres, on obtient une augmentation de résistance en traction par flexion allant jusqu'à 47.36%. Par ailleurs l'ajout de ces fibres dans le béton a un effet non significatif sur sa résistance en compression.

Mots clés : Résistance, déchets plastiques, écologie.

Abstract

Adding waste materials (fibers) to construction materials, particularly in concrete, is an increasingly used technique for several reasons, whether ecological, economical, or to improve certain properties in the fresh or hardened state of concrete. The mechanical properties of fiber-reinforced concrete depend on several factors, including the conditions of implementation, dosage, nature, slenderness, and distribution of fibers in the concrete.

In this study, we investigated the behavior of concrete based on plastic fibers from plastic waste mechanically obtained by cutting plastic bottles. Our work consists of studying the influence of adding plastic fibers at different percentages (0.5%, 1.5%, 2%) on the mechanical behavior of concrete (flexural and compression strength) by comparing it with ordinary concrete that does not contain fiber (0% fiber).

The results obtained show that the flexural strength of plastic fiber-reinforced concrete gives better strength compared to ordinary concrete without fiber. For 2% fiber dosage, there is an increase in tensile strength by flexural up to 47.36%. Additionally, the addition of these fibers has a non-significant effect on its compressive strength.

Keywords: Strength, plastic waste, ecology.

Table des matières

Identification des membres du jury..……..…….....i
Dédicace iii
Remerciements iv
Résumé v
Abstract vi
Liste des tableaux xi
Liste des figures xii
Sigles et abréviations xiv
Avant-propos xv
0. INTRODUCTION GENERALE 1
0.1. Problématique 2
0.2. Objectifs 3
0.2.1. Objectif global 3
0.2.2. Objectifs spécifiques : 3
0.3. Méthodologie 3
CHAPITRE I. IMPACT DES DECHETS PLASTIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT ET LEUR VALORISATION DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL 4
I.1. Introduction 4
I.2. Définition d'un déchet 4
I.3. La Valorisation 4
I.3.1. La valorisation énergétique 5
I.3.2. La valorisation mécanique 5
I.3.3. La valorisation chimique 5
I.4. Le matériau plastique 5
I.4.1. Types de matière plastique 7
I.4.2. Le polyéthylène téréphtalate (PET) 7
I.5. L'intérêt de l'utilisation des déchets plastiques dans le béton 8
I.6. Différents déchets valorisables en génie civil 9
I.6.1. Les pneus usagés 9
I.6.2. Les déchets des chantiers de BTP (Bâtiment et Travaux publics) 10

I.6.3. Verre de récupération 11
I.6.4. Les bouteilles plastiques PET (polyéthylène téréphtalate) 11
I.7. La gestion des déchets 12
I.7.1. Définition 12
I.7.2. Principe de gestion des déchets 12
I.7.3. Définition de recyclage 13
I.7.4. La chaîne du recyclage 13
I.7.5. Importance du recyclage pour l'environnement 13
CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES FIBRES DANS LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION 15
II.1. Introduction 15
II.2. Définition des fibres 15
II.3. Différents types de fibres 16
II.3.1. Fibres métalliques 16
II.3.2. Les fibres de verre 18
II.3.3. Les fibres naturelles : 19
II.3.4. Les Fibres synthétiques : 20
II.4. Critère de choix du type de fibres 21
II.5. Rôles des fibres dans le béton 22
II.6. Mécanisme de fonctionnement des fibres 23
II.7. Comportement des fibres soumises aux efforts de traction 24
II.8. Action des fibres dans les bétons ordinaires à l'état frais 25
II.9. Orientation des fibres 25
CHAPITRE III. LE BETON FIBRE 26
III.1. Introduction 26
III.2. Définition des bétons des fibres 26
III.3. Fabrication des bétons des fibres 26
III.4. Constituants d'un matériau composite 27
III.5. Composition d'un béton renforcé de fibres 28
III.6. Dosage en fibre 30
III.7. Maniabilité de béton de fibres 30

III.8. Apparition des fissures et mécanismes de rupture 30
III.9. Avantages et inconvénients des bétons de fibres 31
III.9.1. Avantages du Béton fibré 31
III.9.2. Les inconvénients du béton de fibres 32
III.10. Les propriétés des bétons fibrés 32
III.10.1. Propriétés mécaniques des bétons fibrés : 32
III.10.2. Le retrait 34
III.11. Instabilité thermique du béton 34
III.11.1. Différentes formes d'instabilité thermique 34
III.11.2. Paramètres influençant sur l'instabilité thermique 35
III.11.3. Influence des fibres plastiques sur la tenue au feu des bétons 36
III.12. Applications actuelles du béton de fibres plastiques 36
CHAPITRE IV. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BETON 38
IV.1. Introduction: 38
IV.2. Caractérisation des matériaux 39
IV.2.1. Ciment (liant hydraulique) 39
IV.2.2. Le sable 39
IV.2.3. Le gravier 46
IV.2.4. Eau de gâchage : 49
IV.2.5. Les fibres plastiques (déchets plastiques) : 49
IV.3. Formulation du béton ordinaire 51
IV.3.1. La méthode de Dreux-Gorisse 51
IV.3.2. Principe de la méthode 51
IV.3.3. Application de la méthode : 58
IV.4. Présentation du travail expérimental 63
IV.4.1. Essais sur le béton frais 65
IV.4.2. Essais sur le béton durci 68
CHAPITRE V. RESULTATS ET DISCUSSION 73
V.1. Introduction 73
V.2. État frais 73

V.2.1. Affaissement au cône d'Abrams 73
V.2.2. Evaluation de la masse volumique à l'état frais 74
V.3. État durci 75
V.3.1. Evaluation de la masse volumique : 75
V.3.2. Résistance à la compression 77
V.3.3. Résistance du béton à la traction par flexion 78
V.3.4. Essai d'absorption d'eau par immersion 80
CONCLUSION 81
RECOMMANDATIONS 82
BIBLIOGRAPHIE 83

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Diverses utilisations des matières plastiques 6
Tableau III.1 : Domaine d'application du béton des fibres plastiques 37
Tableau IV.1 : La masse volumique absolue du sable 41
Tableau IV.2 : La masse volumique apparente du sable à l'état lâche 41
Tableau IV.3: Teneur en eau du sable 42
Tableau IV.4 **:** Résultats de l'analyse granulométrique du sable et module de finesse. 45
Tableau IV.5 : La masse volumique apparente du gravier 47
Tableau IV.6 **:** La masse volumique absolue du gravier 47
Tableau IV.7 : Teneur en eau du gravier 48
Tableau IV.8 : Résultat d'essai d'analyse granulométrique du gravier 48
Tableau IV.9: Propriétés des fibres plastiques 49
Tableau IV.10 **:** La masse volumique apparente des fibres à l'état compact 50
Tableau IV.11 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G 52
Tableau IV.12: Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats 53
Tableau IV.13 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats 55
Tableau IV.14 : Valeur du coefficient de compacité γ 57
Tableau IV.15 : Composition des bétons pour 1 m^3 62
Tableau IV.16 : Les essais de caractérisation sur le béton durci 68
Tableau V.1 : Valeurs de l'affaissement au cône d'Abrams trouvées 73
Tableau V.2 : Les masses volumiques frais des différents bétons étudiés 74
Tableau V.3 : Valeurs des masses volumiques trouvées à l'état durci 75
Tableau V.4 : Résultats de la résistance à la compression 77
Tableau V.5: Résultats de la résistance à la traction par flexion 78
Tableau V.6 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion 80

Liste des figures

Figure 0.1 : Déchets des bouteilles plastiques jetés aux bords du lac Tanganyika et dans les caniveaux en face du marché Sion à Bujumbura 2
Figure 0.2 : Les déchets plastiques brulés 3
Figure I.1 : Composition de plastique (origine naturelle) 5
Figure I.2 : Bouteille PET 7
Figure I.3 : Déchets des pneus 10
Figure I.4 : Déchets de démolition 10
Figure I.5 : Déchets des verres 11
Figure I.6 : Déchets plastiques (bouteilles kinju) 12
Figure II.1 : Les fibres métalliques 17
Figure II.2 : Les fibres de verre 18
Figure II.3: Les fibres naturelles de coco 19
Figure II.4 : Les fibres de polypropylène 21
Figure II.5 : Rôle de fibre dans le béton 23
Figure II.6 : Béton sans fibre sollicité en traction et béton avec fibre sollicité en traction 25
Figure III.1 : Matériau composite 27
Figure III.2 : Composite considéré comme un système à deux composants 29
Figure III.3 : Les différents facteurs influents sur la résistance des bétons de fibres 33
Figure III.4 : Ecaillage lors de l'incendie 35
Figure IV.1 : Ciment 39
Figure IV.2 : Sable 39
Figure IV.3 : Détermination des masses volumiques absolue du sable. 40
Figure IV.4 : Matériels utilisés pour l'analyse granulométrique 43
Figure IV.5 : Courbe granulométrique du sable 45
Figure IV.6 : Gravier 46
Figure IV.7 : Courbe granulométrique du gravier 49
Figure IV.8 : Les fibres (déchet plastique des bouteilles kinju) 50
Figure IV.9 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) 53

Figure IV.10 : Schéma de principe de la courbe granulaire de référence pour un béton dont les granulats ont un diamètre maximum D_{max} inférieur ou égal à 20 mm. 54
Figure IV.11 : Courbe granulaire de référence 56
Figure IV.12 : Courbe granulaire de Dreux- Gorisse 60
Figure IV.13 : Malaxage du béton 64
Figure IV.14 : Mesure de d'Affaissement au cône d'Abrams 65
Figure IV.15 : Mesure de la masse volumique à l'état frais 66
Figure IV. 16 : Vibration et remplissage des moules 66
Figure IV.17 : Conservation des éprouvettes dans l'eau 67
Figure IV.18 : Mesure de la masse volumique à l'état durci 69
Figure IV.19 : Essai de résistance à la compression 70
Figure IV.20 : Essai de résistance à la traction par flexion 71
Figure IV.21 : Essai d'absorption d'eau par immersion 72
Figure V.1: Effet des déchets (fibres) plastiques sur l'affaissement 74
Figure V.2 : Variation de la masse volumique du béton frais en fonction du dosage en fibre plastique 75
Figure V.3 : Variation de la masse volumique des bétons à l'état durci en fonction du dosage en fibre des déchets plastiques 76
Figure V.4 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des fibres des déchets plastiques 77
Figure V.5 : Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du dosage des fibres des déchets plastiques 79
Figure V.6 : Béton fibré après écrasement et béton sans fibre après écrasement 79
Figure V.7 : Variation de l'absorption de l'eau par immersion en fonction du dosage des fibres des déchets plastiques. 80

Sigles et abréviations

PET : Polyéthylène Téréphtalate

E/C : Rapport pondéral Eau/Ciment

f_{c28} : Résistance à la compression à 28 jours

G/S : rapport pondéral Gravier/Sable

MF : Module de Finesse

BO : Béton Ordinaire

BF : Béton Fibré

Avant-propos

Les plastiques sont devenus une partie inséparable et intégrale de notre vie, la quantité des plastiques consommés annuellement s'est développée considérablement. L'accroissement démographique galopant, l'évolution industrielle et le besoin de consommation des produits emballés induisent à la propagation des divers types des déchets notamment les déchets plastiques se trouvant rependus un peu partout.

La prolifération de ces déchets plastiques (sachet, bouteilles, pneus…) rejetés dans la nature est l'une des causes de dégradation de l'environnement dans nos pays. La valorisation des déchets dans le domaine du génie civil est donc très importante du fait qu'elle a plusieurs impacts positifs du point de vue environnemental et économique. Dans plusieurs pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le domaine de la construction et spécialement dans le béton comme poudre, fibres ou agrégats dans le but de valoriser ces déchets qui sont nuisibles à l'environnement.

Le présent travail de fin d'étude intitulé « **Contribution à l'étude des propriétés mécaniques du béton contenant des fibres plastiques : cas des déchets des bouteilles plastiques servant à la conservation de l'eau de boisson** » va surtout s'intéresser à l'amélioration du comportement mécanique du béton dans sa zone de faiblesse (traction par flexion) suite à l'incorporation de ces déchets dans le béton afin de les valoriser et réduire la pollution environnementale qu'ils causent. Les effets de ces fibres sur le comportement mécanique du béton seront donc analysés dans ce travail.

Les propriétés à l'état frais (maniabilité) et à l'état durci (résistance à la traction par flexion, résistance à la compression), des différents bétons réalisés sont analysés et comparés avec leurs bétons ordinaires respectifs.

0. INTRODUCTION GENERALE

Le plastique est une matière organique qui est à la base de nombreux enjeux environnementaux liés d'une part à la consommation des ressources naturelles qu'il requiert pour sa fabrication et d'autres part à la production des déchets qu'il entraine du fait de sa longue durée de vie.
En raison de ses avantages liés à son coût, sa légèreté, la facilité de son utilisation et sa longue durée de vie, tels sont des facteurs qui font qu'une croissance exponentielle de l'utilisation des plastiques est observée partout dans le monde, ce qui augmente également la production de ses déchets.

Alors que l'utilisation et la production des substances en plastique continuent d'augmenter, l'élimination des déchets plastique devient un problème critique. De nos jours, les déchets plastiques sont soit enterrer dans les décharges ou brulés causant l'émission des gaz nocifs pour l'environnement ainsi que la destruction de la couche d'Ozone.

C'est ainsi que dans ce mémoire, pour notre bien-être et celui des générations à venir, nous apportons une contribution visant à réduire la pollution environnementale en utilisant les déchets plastiques dans le béton sous formes des fibres d'une part, et à l'étude de l'impact de ces déchets (fibres) sur le comportement mécanique du béton d'autres part.

Ce mémoire est subdivisé en cinq chapitres :

- Dans le premier chapitre nous parlons de l'impact des déchets plastiques sur l'environnement et leur valorisation dans le domaine de génie civil ;
- Dans le second chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les différents types des fibres utilisables dans le béton ;
- Le troisième chapitre présente la composition d'un matériau composite (le béton fibré) ;
- Le quatrième chapitre concerne la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation du béton, la présentation du travail expérimental et le processus des essais ;
- Le dernier chapitre est focalisé sur l'expression des résultats et leurs interprétations ;
- Enfin, nous présentons une conclusion générale et les recommandations.

0.1. Problématique

La gestion des déchets plastique est l'un des problèmes environnementaux dans le monde en générale et particulièrement ici au Burundi. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie importante induisant par la suite à une pollution très remarquable.

L'économie burundaise est en grande partie basée sur l'agriculture, malheureusement ce secteur est beaucoup affecté par le réchauffement climatique qui se matérialise par la chute du rendement de la production agricole, les inondations, l'augmentation des risques de maladies, et la hausse de l'insécurité alimentaire. Or les déchets plastiques sont l'un des produits qui sont à la base de réchauffement climatique suite au gaz à effet des serres qu'ils émettent dans la nature quand ils sont brulés. Dans plusieurs quartiers de la ville de Bujumbura, on retrouve des bouteilles plastiques qui sont éparpillés et leur taux de recyclage est très faible. Certains de ces déchets plastiques sont rejetés vers le lac Tanganyika ce qui augmente le taux de mortalité et la disparition de la biodiversité aquatique après l'ingestion de ces déchets, ce qui nécessite des solutions accélérées pour limiter ces nuisances.

La gestion des déchets plastiques est donc nécessaire que ce soit du point de vue économique ou environnemental.



Figure 0.1 : Déchets des bouteilles plastiques jetés aux bords du lac Tanganyika et dans les caniveaux en face du marché Sion à Bujumbura



Figure 0.2 : Les déchets plastiques brulés

0.2. Objectifs

0.2.1. Objectif global

Etudier l'effet des fibres des déchets plastiques sur le comportement mécanique du béton (compression, la traction par flexion et l'ouvrabilité).

0.2.2. Objectifs spécifiques :

- Faire une revue de la littérature sur les différents types des fibres et les bétons fibrés ainsi que les différentes méthodes de valorisation des déchets plastiques dans le domaine du génie civil.
- Faire la caractérisation de tous les matériaux utilisés et passer à la formulation du béton à base des fibres (déchets) plastiques.
- Faire les essais de compression et de traction par flexion sur les différents bétons étudiés.
- Comparer les résultats obtenus pour le béton ordinaire sans fibre et les bétons fibrés.

0.3. Méthodologie

La caractérisation des matériaux utilisés pour la confection du béton et les essais ont été fait en utilisant les normes européennes, normes françaises et les modes opératoires en vigueur.

La formulation du béton a été faite suivant la méthode de Dreux Gorisse. Cette méthode est une synthèse des diverses théories existantes sur la composition des bétons, appuyée sur un examen statique de nombreux chantiers sérieusement contrôlés. Son but est de définir d'une manière simple et rapide la formulation du béton en fonction des trois paramètres principaux : les courbes granulaires, l'ouvrabilité et la résistance souhaitée.

CHAPITRE I. IMPACT DES DECHETS PLASTIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT ET LEUR VALORISATION DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

I.1. Introduction

Durant ces dernières années, les déchets de différentes sources sont à l'origine de divers problèmes environnementaux liés à leur stockage et leurs taux de croissance élevé. Par ailleurs, les matériaux de construction d'origine naturelle sont confrontés, à terme, à l'épuisement ; d'où la nécessité de valoriser ces déchets. Plusieurs techniques ont été développées dans le but de réduire l'épuisement des ressources naturelles, ces déchets peuvent être réutilisés dans le domaine d'où ils ont été extraits ou dans un autre domaine. Plusieurs études ont montré qu'il est possible d'utiliser les déchets des bouteilles plastiques dans le béton sous forme des fibres ou granulats afin de réduire la propagation des fissures et augmenter sa ductilité [1].

I.2. Définition d'un déchet

Un déchet est défini comme «tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau que son détenteur destine à l'abandon » ; et qui est de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore, et la faune, à dégrader les sites ou les paysage, à polluer l'air ou les eaux ou à engendrer des bruits ou des odeurs. D'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et de l'environnement. [1]

Approche économique : un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné.

Approche environnementale : du point de vue environnemental, un déchet est tout objet qui constitue une menace à partir du moment où il entre en contact avec l'environnement. Ce contact peut être direct ou le résultat d'un traitement.

I.3. La Valorisation

La valorisation est un terme recouvrant l'ensemble des techniques qui permettent la réutilisation, le recyclage ou la régénération des déchets. Dans le monde entier, la notion de déchets a beaucoup évolué durant les deux dernières décennies, les déchets sont considérés désormais comme un gisement de récupération de diverses matières. A ce titre, ils ont une valeur ajoutée potentielle qu'il faut utiliser au mieux des possibilités technologiques et des conditions économiques du marché. Ainsi, le recyclage et la valorisation sont considérés aujourd'hui comme des composantes fondamentales de tout système de gestion rationnelle des déchets [2].

Il existe trois grandes méthodes de valorisation du plastique :

I.3.1. La valorisation énergétique

Consiste à incinérer les déchets plastiques pour récupérer l'énergie qu'ils contiennent sous forme de chaleur. Les plastiques, composés de pétrole raffiné, ont une capacité calorifique proche de celui-ci. Cette méthode de valorisation permet de recycler une grande partie des déchets plastiques. En revanche si elle est mal maîtrisée, elle peut présenter des risques majeurs pour l'environnement et la santé des êtres vivants par l'émission des gaz cancérigènes présents dans les fumées.

I.3.2. La valorisation mécanique

Consiste à réutiliser les déchets plastiques avec un minimum de transformation de la matière. Cette technique est utilisée pour le traitement des déchets thermoplastiques. Elle repose avant tout sur une collecte sélective ou un tri des déchets plastiques à partir des ordures ménagères. Il est souvent nécessaire d'avoir des déchets plastiques triés par type de résine plastique. Plus le tri est efficace, plus le produit en sortie est de bonne qualité.

I.3.3. La valorisation chimique

Consiste à transformer la matière plastique en molécule de base (polymère, ester...), pouvant servir à la synthèse d'une nouvelle matière plastique, ou pour la pétrochimie. Ces technologies sont encore peu développées ou limitées à certaines natures de résines plastiques. On ne les utilise que dans les pays du Nord et les pays émergents [3].

I.4. Le matériau plastique

Le plastique est un matériau qui contient un ou plusieurs nombres de polymères, qui peut être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de produire un objet [4]. Il est donc avant tout une matière organique, c'est-à-dire composé de carbone et d'autres atomes tels que le chlore ou l'oxygène. Enfin comme toute matière organique, il noircit au contact avec le feu. Majoritairement les plastiques sont produits à partir du pétrole brut [5].



Figure I.1 : Composition de plastique (origine naturelle)

Ainsi, le pétrole (55%), le charbon (35%), et le gaz naturel (10%) sont les trois origines essentielles des matières plastiques [5].

Tableau I.1 : Diverses utilisations des matières plastiques

Nom du plastique	Déscription	Certaines utilisations du plastique	
Polytéréphtalate d'éthylène (PET)	Plastique claire et dure, peut être réutilisé pour faire des fibres	Bouteilles pour boissons gazeuses et eaux minérales, fibres textiles, bouteille de détergent	
Polyéthylène Haute Densité (PEHD)	Plastique très fréquent, habituellement blanc ou coloré	Sacs à provisions, bouteilles de lait et de crème, bouteilles de shampooing et produits de nettoyage	
Polychlorure de Vinyle (PVC)	Plastique dure et rigide	tuiles, tuyaux et raccords de plomberie, semelles de chaussures, tubes pour prélèvement de sang	
Polyéthylène à Basse densité (PEBD)	Plastique mou et flexible	Couvercles des pots de crème glacée, sacs à ordures, poubelles	
Polypropylène (PP)	Plastique dur mais souple de nombreuses utilisations	Pots pour crème glacées, Sacs de chips, paillettes pour boissons, boîtes et emballage alimentaire	
Polystyrène (PS)	Plastique rigide et fragile, peut être clair et transparent	Pots de Yaourt, couvercles en plastique, gobelets pour les boissons chaudes	

I.4.1. Types de matière plastique

Les plastiques peuvent être subdivisés en 3 grandes familles :

- **Les thermoplastiques**

Ce sont des polymères linéaires ou ramifiés qui se ramollissent par chauffage et durcissent par refroidissement dans un intervalle de température spécifique [10].

- **Les thermodurcissables**

Ces sont des matières plastiques qui sous l'action de la chaleur, durcissent progressivement pour atteindre un état solide irréversible.

- **Les élastomères**

Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action des contraintes mécaniques. Elles sont caractérisées par une grande déformabilité [6].

I.4.2. Le polyéthylène téréphtalate (PET)

C'est un polymère thermoplastique obtenu par polycondensation de deux composants : diméthyle téréphtalate et l'éthylène glycol. Les chaines vont s'arranger et former des fibres résistantes. Ses molécules sont composées de carbone, l'hydrogène et l'oxygène.

Le PET est surtout employé pour la fabrication des fils textiles, de films et des bouteilles, l'inventeur des bouteilles PET, Nathaniel Wyeth voulait faire une bouteille incassable. Cependant, ce plastique devient mou à moyenne température, pour cette même raison, on ne peut pas l'utiliser pour les confitures qui sont coulées chaudes dans les pots [6].

Les bouteilles en PET sont généralement transparentes et légères, elles sont disponibles dans différentes tailles et formes, et sont souvent recyclables. Elles peuvent être identifiées par le symbole de recyclage de trois flèches sur l'étiquette de la bouteille.



Figure I.2 : Bouteille PET

I.5. L'intérêt de l'utilisation des déchets plastiques dans le béton

La sensibilisation croissante à l'environnement a considérablement contribué aux préoccupations liées à l'élimination des déchets générés. La gestion des déchets solides est l'une des principales préoccupations environnementales au monde. Des recherches ont été menées sur l'utilisation des déchets dans le béton. De tels produits comprennent des pneus, des bouteilles plastiques, du verre, de l'acier etc. Chacun de ces déchets a donné un effet spécifique sur les propriétés du béton frais et durci. L'utilisation des déchets dans le béton non seulement le rend économique, mais aussi contribue à réduire les problèmes d'élimination. La réutilisation des déchets volumineux est considérée comme la meilleure alternative environnementale pour résoudre le problème de l'élimination. Un de ces déchets est le plastique, qui pourrait être utilisé dans diverses applications. Cependant, des efforts ont également été déployés pour explorer son utilisation dans le béton.

Le développement de nouveaux matériaux de construction à l'aide de plastiques recyclés est important pour les industries de la construction et du recyclage en plastique [7].

Plusieurs travaux ont été effectués pour évaluer les propriétés des matériaux de ciment contenant divers types de déchets plastiques en tant qu'agrégats ou fibres [8].

Plusieurs chercheurs enquêtaient sur l'efficacité des déchets issus des bouteilles plastiques dans le béton :

GUENDOUZ Mohamed, DEBIEB Farid et KADRI El hadj ont montré que l'utilisation des déchets plastiques sous forme des fibres dans le béton influent négativement sur la maniabilité du béton et la densité, ils indiquent que l'ajout de fibres plastiques peut entrainer une augmentation de la viscosité du béton, ce qui réduit son ouvrabilité et que les fibres plastiques contribuent à l'amélioration de la résistance à la traction du béton [7].

Sheelan M. Hama et Nahla N. Hilal (2017) ont montré que l'utilisation des déchets plastiques grossiers dans la fabrication de béton diminue la résistance à la compression par rapport aux déchets plastiques fins [8].

Al-Hadithi a étudié l'utilisation de déchets de bouteilles en plastique sous formes de fibres et les résultats des tests ont montré une amélioration à la fois de la compression et de la traction, l'amélioration de la résistance à la rupture a augmenté clairement [9].

R. Siddique et Al ont mené une étude sur l'utilisation de déchets de bouteilles plastiques en PET dans le béton et ont constaté que cela améliorait la résistance à la compression et à la traction du béton, ainsi que la résistance à la fissuration en flexion [10].

Dans une étude menée par V. Coronaldesi et Al, les auteurs ont évalué l'effet de l'ajout de fibres plastiques sur les propriétés de résistance à la compression et de masse volumique des bétons. Les résultats ont montré que la masse volumique du béton était faible lorsque des fibres plastiques étaient ajoutées, tant à l'état frais qu'à l'état durci. La diminution de la masse volumique était de l'ordre de 5% en comparaisons avec le béton témoin [11].

Nazari et Riahi ont montré dans leur étude que l'ajout de fibres des bouteilles plastique en PET dans le béton peut améliorer significativement la résistance à la traction par flexion. Par exemple, les résultats montrent que pour une teneur en fibre de 0.5 à 1.5% en poids du ciment a conduit à une augmentation de la résistance à la traction par flexion de 36 à 45 % par rapport au béton ordinaire [12].

I.6. Différents déchets valorisables en génie civil

La valorisation des déchets dans le domaine du génie civil peut couvrir plusieurs types de déchets de sources et de qualités différentes :

I.6.1. Les pneus usagés

Un pneu est constitué généralement de caoutchouc et contient également de l'acier, le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer de nuisances (esthétique, développement des moustiques, des rongeurs…) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et l'insécurité pour les personnes.

La fabrication des pneus nécessite un gisement de matières premières, la récupération et la valorisation des pneus usagés constituent un impératif économique. L'incorporation des granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation et limite l'apparition des macros fissures. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [13].



Figure I.3 : Déchets des pneus

I.6.2. Les déchets des chantiers de BTP (Bâtiment et Travaux publics)

Les déchets de chantiers proviennent de trois sources principales : la démolition, la construction et la réhabilitation.

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnés par des produits secondaires ou des déchets, le stockage de tels déchets solides dans les dépôts pollue l'environnement et comme les réserves en granulats sont en cours d'épuisement, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits el les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers. Les granulats recyclés sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires [5].



Figure I.4 : Déchets de démolition

I.6.3. Verre de récupération

Le verre est un solide fragile et généralement transparent, préparé par fusion d'un mélange complète contenant de la silice. Le verre est utilisé dans le béton comme granulats ou broyé comme substitution au ciment et aux granulats fins.

En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque le ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre [14].



Figure I.5 : Déchets des verres

I.6.4. Les bouteilles plastiques PET (polyéthylène téréphtalate)

L'incorporation du sable dans les bouteilles plastiques fondues sert à la fabrication des pavés. Après la fusion totale des plastiques, le sable préchauffé est ajouté légèrement sous un tournement progressif du mélange (sable-plastique) à l'aide d'une pelle bèche jusqu'à ce que le mélange soit bien homogène et puis il s'en suit le moulage et démoulage, mais cette pratique cause des impacts négatifs sur l'environnement car le chauffage de ces déchets plastiques émet des gaz qui sont nuisibles pour l'environnement et sont à la base de certaines maladies respiratoires pour des personnes œuvrant dans la fabrication des pavés.

Ces bouteilles peuvent aussi être utilisées dans le béton sous forme de fibres qui fait d'ailleurs l'objet de notre étude et cette pratique est écologique par rapport à la première.



Figure I.6 : Déchets plastiques (bouteilles kinju)

I.7. La gestion des déchets

I.7.1. Définition

La gestion de déchets est une opération qui consiste à collecter, à transporter, à traiter, à réutiliser ou à éliminer des déchets afin de réduire leurs effets sur la santé humaine et l'environnement en général. La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possède sa filière spécifique. La façon de gérer les déchets diffère selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans la ville ou en milieu rural, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant, et dépend également du type de déchet [3].

I.7.2. Principe de gestion des déchets

Il y a plusieurs principes de gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

1. Réduire : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.

2. Réutiliser : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.

3. Recycler : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet [15].

I.7.3. Définition de recyclage

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.

I.7.4. La chaîne du recyclage

I.7.4.1. Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

I.7.4.2. Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

I.7.4.3. Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issus du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés.

Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés [16].

I.7.5. Importance du recyclage pour l'environnement

Protéger l'environnement est une question de survie pour l'humanité. L'environnement est la source de nos besoins alimentaires. C'est aussi une source de l'oxygène pour notre survie.

Donc la protection environnementale est une affaire de tous. D'où la prise de conscience planétaire de l'importance de la préservation de notre milieu naturel.

Par ailleurs la récupération des déchets réduit les impacts négatifs qu'ils causent pour l'environnement par la collecte et la valorisation de ces déchets dans les industries ou dans le domaine de construction.

Le recyclage permet non seulement de mieux protéger l'environnement mais aussi de résoudre le problème d'épuisement de ressources naturelles et surtout de créer des emplois et des revenus.

Le recyclage permet de réduire l'extraction des matières premières :

- L'acier recyclé permet d'économiser le minerai de fer.
- Chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut.
- Le recyclage d'1 kg d'aluminium permet d'économiser environ 8kg de bauxite, 4kg de produits chimiques et 14kWh d'électricité.
- Chaque tonne de bois recyclé fait économiser 2.5 tonne de bois.
- Chaque feuille de papier recyclé permet d'économiser 1l d'eau et 2.5 W d'électricité en plus de 15g de bois [17].

CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES FIBRES DANS LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

II.1. Introduction

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton. Les fibres sont ajoutées dans la matrice, non seulement pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement fragile du béton en un comportement ductile en cousant les fissures.

Fabriquées à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels (cellulose), les fibres sont disponibles en diverses formes (lisses, ondulées, à crochet…), elles sont ajoutées au béton durant le malaxage**.**

Les fibres présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques intéressantes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques. Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle de "couture" des fissures. En effet, la longueur maximale d'une microfissure et de l'ordre de la dimension de plus gros granulat. La longueur moyenne des fibres utilisées est nettement supérieure à la dimension de plus gros granulat. Chaque microfissure se propageant dans la pâte, peut être «pontée » par une ou plusieurs fibres [18].

II.2. Définition des fibres

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible, c'est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur allant de 5 à 60 mm et dont l'épaisseur est comprise entre 0,05 à 0,75mm. Les fibres sont disponibles sous différentes formes et peuvent être d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont courtes et dispersées uniformément dans toute la masse de béton.

En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier. Les différentes propriétés de ces fibres rendent possible la construction d'ouvrages confrontés à des contraintes plus élevées. Les fibres permettent d'améliorer le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration.

Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. La distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectants très fortement le comportement global du matériau durci [19].

II.3. Différents types de fibres

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme, leur dimension (macro ou micro- fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques: dimensions, formes, et l'adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres Le choix des types de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

Les principales fibres utilisées sont :

II.3.1. Fibres métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, reste encore l'objet de recherche très importante dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont les plus utilisées dans le domaine de génie civil.

Les fibres d'acier sont des filaments d'acier courts et indépendants dont le rapport de forme (longueur par rapport au diamètre) varie entre 20 à 100 ; et ayant une section de forme et de dimensions variables. Certaines fibres d'acier ont des crochets à leurs extrémités de façon à améliorer l'ancrage dans la matrice cimentaire.

Le volume des fibres d'acier dans le béton varie généralement entre 0,25 % et 2 %. En général, un contenu de plus de 2 % réduit la maniabilité du béton et la dispersion des fibres, et exige des formulations spéciales ou l'utilisation de techniques de mise en place spécifiques. La résistance en compression du béton est peu influencée par la présence de fibres. L'ajout de 1,5 % de fibres d'acier par volume peut augmenter la résistance à la traction directe de 40 % et la résistance à la flexion de 150%.

La corrosion des fibres peut être très faible, ou même complètement évitée lorsque le béton est bien conçu et bien mis en place.

Les fibres d'acier peuvent avoir des formes variées. Il est possible d'améliorer leur adhérence à la matrice cimentaire en prévoyant un ancrage mécanique ou en augmentant la rugosité de la surface. De plus, elles sont protégées de la corrosion par l'environnement alcalin de la matrice cimentaire.

Les fibres d'acier sont couramment utilisées dans les chaussées d'aéroport et les recouvrements de pistes d'atterrissage ou de voie d'accès. Elles sont également utilisées dans les tabliers de ponts, les planchers industriels et les chaussées d'autoroutes. Il a été démontré que les structures en béton fibré exposées à un débit d'eau de grande vélocité ont une durée de vie trois fois plus grande que celle des structures en béton usuel. Le béton renforcé de fibres d'acier est aussi utilisé dans plusieurs types d'éléments nécessitant une grande ténacité et une meilleure résistance à l'impact. Les fibres d'acier peuvent remplacer les armatures conventionnelles dans les fosses septiques et dans les chambres de services souterrains.

Les fibres d'acier sont également fréquemment utilisées dans le béton lorsqu'il est appliqué en couches minces, notamment pour la stabilisation des parois rocheuses inclinées et pour les recouvrements intérieurs de tunnels.



Figure II.1 : Les fibres métalliques

II.3.2. Les fibres de verre

Les premières recherches sur les fibres de verre, menées au début des années 60, ont porté sur le verre borosilicaté conventionnel (verre E) et sur le verre silicosodocalcique (verre A). Les résultats ont démontré que la réactivité alcaline entre les fibres de verre E conventionnel et la matrice de la pâte de ciment réduisait la résistance du béton. Des recherches plus poussées ont mené à la découverte de fibres résistantes aux alcalis (fibres de verre RA) qui amélioraient la durabilité à long terme, bien que d'autres phénomènes responsables des pertes de résistance aient été observés. Parmi ces phénomènes, on a pu identifier, la fragilisation des fibres due à l'infiltration de particules d'hydroxyde de calcium, coproduit de l'hydratation du ciment, au travers des filaments de la fibre. La réactivité et l'hydratation sont à la base de deux théories largement acceptées expliquant les pertes de résistance et de ductilité, surtout dans les bétons renforcés de fibres de verre :

- L'attaque par les alcalis à la surface de la fibre de verre réduit la résistance à la traction de la fibre, et par conséquent, réduit la résistance à la compression.
- La progression de l'hydratation du ciment mène à la pénétration des particules dans les filaments de fibres, augmentant ainsi l'adhérence de la fibre à la matrice ainsi que sa fragilisation, ce dernier phénomène menant à une réduction de la résistance à la traction en s'opposant à l'arrachement des fibres.

La modification des fibres afin d'en améliorer la durabilité passe par l'utilisation d'enrobages chimiques à formulations spéciales qui aident à combattre la fragilisation induite par l'hydratation et par l'utilisation d'un coulis de micro silice pour combler la porosité des fibres, pour ainsi réduire le potentiel d'infiltration de l'hydroxyde de calcium.

Un ciment à basse teneur en alcalis ne produisant aucun hydroxyde de calcium durant son hydratation a été développé au Japon. Des essais accélérés avec ce ciment sur des échantillons de béton renforcé de fibres de verre résistant aux alcalis ont permis d'atteindre une meilleure durabilité à long terme qu'auparavant.



Figure II.2 : Les fibres de verre

II.3.3. Les fibres naturelles :

Les fibres naturelles ont été utilisées comme renforcement bien avant l'arrivée du béton armé conventionnel. Des briques de boue renforcées avec de la paille et des mortiers renforcés avec du crin de cheval ne sont que quelques exemples de l'utilisation des fibres naturelles dans le passé.

Plusieurs matériaux de renforcement naturels sont disponibles à faible coût et à faible consommation d'énergie en utilisant une main-d'œuvre et un savoir-faire technique disponibles localement. Certaines fibres naturelles présentent une instabilité dimensionnelle due aux cycles "séchage-mouillage".

Fibres naturelles brutes :

À la fin des années 60, des recherches entreprises sur les propriétés mécaniques des fibres naturelles et des bétons fabriqués à partir de ces fibres ont démontré qu'elles peuvent être utilisées dans la fabrication de panneaux minces pour les recouvrements de murs et de toits. Ces produits sont fabriqués avec du ciment portland et des fibres naturelles brutes telles que la fibre de coco, le sisal, le bambou, le jute, le bois et les fibres végétales. Bien que les bétons fabriqués avec des fibres naturelles brutes présentent de bonnes propriétés mécaniques, ils ont certaines faiblesses du point de vue durabilité. Plusieurs fibres naturelles sont très susceptibles aux changements de volume dus aux variations de leur taux d'humidité. Les changements volumiques qui accompagnent les variations de l'humidité des fibres affectent sévèrement l'adhérence entre la fibre et la matrice cimentaire [26].



Figure II.3: Les fibres naturelles de coco

II.3.4. Les Fibres synthétiques :

Les fibres synthétiques sont des fibres artificielles développées par l'industrie pétrochimique et l'industrie des textiles. Les principaux types de fibres utilisées dans le béton de ciment portland sont : les fibres acryliques, les fibres aramides, les fibres de carbone, de nylon, de polyester, de polyéthylène et de polypropylène.

Les fibres synthétiques peuvent réduire le retrait plastique et la propagation des fissures. Elles peuvent aussi améliorer le comportement du béton après rupture. Dans les chapes ultraminces, on utilise fréquemment des fibres pour contrôler la fissuration.

- **Les fibres polypropylènes**

Les fibres de polypropylène, les plus populaires des fibres synthétiques, sont chimiquement inertes, hydrophobes et légères. Elles sont fabriquées sous forme de monofilaments cylindriques continus, que l'on peut couper à des longueurs spécifiées ou tailler.

Utilisées à un dosage d'au moins 0,1 %, les fibres de polypropylène réduisent la fissuration due au retrait plastique, elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement. La fabrication du béton avec des fibres de polypropylène ne soulève pas de difficulté particulière. La répartition des fibres est facile et ne nécessite pas de précautions spécifiques lors du malaxage à part la vérification de leur homogénéité dans le béton. L'optimisation des adjuvants permet de réaliser des bétons dont l'ouvrabilité est conservée. Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs.

Toute fibre qui traverse une fissure crée en quelque sorte un « pont » entre les deux bords de la fissure. Ce pont permet le transfert d'une partie de la contrainte ayant entraîné l'ouverture de la fissure. C'est ainsi qu'une fibre s'oppose à l'élargissement de la fissure, jouant véritablement le rôle de couture et augmente la résistance du béton après fissuration. Les fibres plastiques permettent donc de "coudre" les microfissures et évitent leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macro fissures.

Les propriétés des fibres polypropylène sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (meilleur comportement du béton frais) et les éléments préfabriqués (meilleure résistance mécanique au jeune âge). Elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou des arêtes des pièces moulées. Elles permettent de réaliser des parements esthétiques et sont souvent utilisées pour la construction des barrages ou des mortiers de réparation.



Figure II.4 : Les fibres de polypropylène

- **Spécificités des fibres**

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent **:**

- être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage ;
- se repartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération des fibres) et lors du bétonnage.

L'influence des fibres sur la maniabilité du béton dépend de leur dimension et de leur dosage. Pour améliorer les performances mécaniques du béton (ductilité, résistance à la traction par flexion, résistance aux chocs) elles doivent :

- être flexibles sans être fragile ;
- être relativement longues et fines ;
- assurer un bon encrage dans le béton.

II.4. Critère de choix du type de fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie. Les qualités indispensables qu'elles doivent présenter sont les suivantes :

- Une bonne adhérence de la fibre dans la matrice cimentaire, directement liée à sa forme ;
- Conservation de leurs propriétés dans le temps(ne pas se dégrader dans le temps) ;
- la non-interaction avec le milieu alcalin du ciment ;
- ne présenter aucun danger lors de la mise en œuvre ;
- Enfin le rapport entre la longueur et le diamètre.

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients.

Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) [21].

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ces types des fibres peuvent engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entrainant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais elles réduisent l'adhérence avec la matrice cimentaire.

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue [21].

II.5. Rôles des fibres dans le béton

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais les résultats obtenus étaient limités. Ils n'ont constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets [22] :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure II.5
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

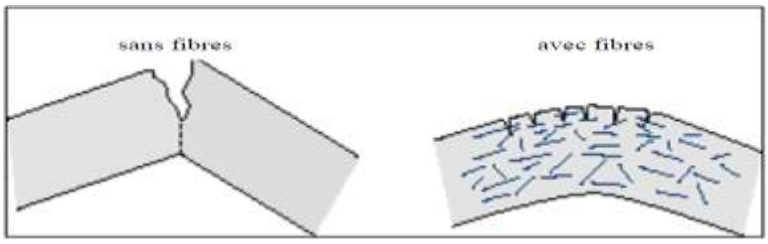


Figure II.5 : Rôle de fibre dans le béton

Les fibres peuvent également, dans certaines applications, remplacer un certain taux des armatures passives. Elles ont généralement pour rôle principales de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont incorporées, les fibres permettent :

- L'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire ;
- L'augmentation de la ductilité et la résistance post-fissuration ;
- La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge ;
- La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur) ;
- L'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;
- L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.

Bien que toutes les fibres ne confèrent pas aux bétons l'ensemble de toutes ces améliorations**.**

II.6. Mécanisme de fonctionnement des fibres

Rossi a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres noyées dans la matrice, qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Les fibres peuvent donc coudre les microfissures, et retarder la formation des macro fissures, conférant ainsi une meilleure ductilité au béton [23].

De plus, l'action des fibres est fortement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Dans le cas de fissures provoquées par les efforts en traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leur lèvre et les fibres travaillent en traction.

Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables. C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression. Les propriétés du béton renforcé de fibres sont le résultat de plusieurs facteurs, comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton [24].

II.7. Comportement des fibres soumises aux efforts de traction

Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes telles que le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge etc. Lorsqu'un béton fissuré est soumis à une traction, les lignes de tension s'infléchissent et les tensions aux extrémités de la fissure augmentent. Cette inflexion est due au fait que la charge ne peut pas être transmise par la fissure. Pour un béton sans fibres sollicité en traction, sa faible résistance à la traction est vite atteinte, voire dépassée. Une fissure apparait alors et se propage librement conduisant ainsi à une rupture fragile. Dans le cas d'un béton avec fibres, sollicité en traction, une partie de l'effort est reprise par les fibres pontant les fissures; cela empêche la rupture fragile du matériau car la propagation des fissures nécessiterait une plus grande énergie. En effet, comme la longueur maximale d'une microfissure est de l'ordre de la dimension du plus gros granulat et la longueur moyenne d'une fibre est plus grande que la dimension du granulat, chaque microfissure se propageant dans la matrice peut être pontée par une ou plusieurs fibres. Ainsi, les microfissures ne peuvent s'agrandir que par l'allongement élastique ou plastique des fibres, l'effritement de la matrice au voisinage de la fibre, le glissement des fibres ou la rupture des fibres. Ces fibres sollicitées à la traction absorbent une partie de l'énergie nécessaire à la propagation des fissures et évitent une propagation incontrôlée de la fissuration du béton. Il faudrait alors davantage d'énergie donc d'effort pour propager cette fissuration. L'efficacité des fibres est d'autant plus grande que la quantité de fibre est importante et leur longueur d'ancrage est grande.

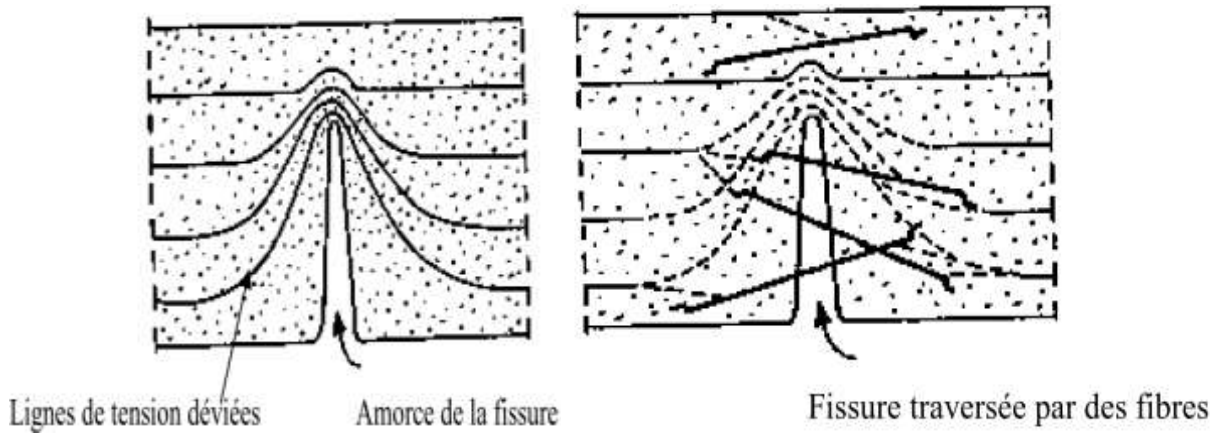


Figure II.6 : Béton sans fibre sollicité en traction et béton avec fibre sollicité en traction

II.8. Action des fibres dans les bétons ordinaires à l'état frais

La maniabilité des bétons est affectée de manière significative par l'addition de fibres : la porosité du squelette granulaire est d'autant plus grande que le volume de fibres est important. Pour que les fibres soient efficaces à l'état durci, il est recommandé de choisir des fibres plus longues que la taille du plus gros granulat [30].

II.9. Orientation des fibres

L'orientation préférentielle des fibres est essentiellement causée par la mise en place du béton dans les moules ou les coffrages. Lors de coulage, les fibres s'orientent suivant l'axe de l'écoulement puis parallèlement aux parois au fur et à mesure que le béton remplit le coffrage. Cette orientation préférentielle est donc inévitable au voisinage des parois (effet de paroi). La mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons ordinaires sans fibres [26].

CHAPITRE III. LE BETON FIBRE

III.1. Introduction

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction le plus utilisé à travers le mode. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer sa facilité de moulage le permettant d'être utilisé dans diverses conceptions, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique et sa durabilité. Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton soit renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction (des fibres qui peuvent être naturelles ou synthétiques etc.). Cela conduit à un matériau composite.

L'incorporation de celles-ci dans le béton rend ce dernier davantage ductile (moins fragile), capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue. Différents types de fibres peuvent être utilisés avec des propriétés spécifiques. Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. Pour le renforcement, les fibres sont de types variés. Elles sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement (le rapport de la longueur de la fibre sur le diamètre équivalent à la fibre), et la teneur en volume de fibres.

III.2. Définition des bétons des fibres

On appelle béton de fibres, le mélange homogène d'une matrice minérale (béton) et d'éléments de renfort discontinus présentent sous forme des fibres. L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibres isolées au moment de gâchage.

III.3. Fabrication des bétons des fibres

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur qualité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation des boules de fibres, il convient donc d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance. Les fibres sont ajoutées directement dans le mélange du béton, l'effet de cette addition est la maniabilité décroissante.

Pour l'améliorer, il convient d'utiliser des granulats de petite taille, en général les bétons renforcés des fibres ne contiennent pas des granulats grossiers. Les fibres doivent avoir une faible longueur et un élancement moyen afin d'éviter le risque de formation des agglomérations des fibres qui rendent difficile la mise en œuvre et nuisent au comportement mécanique. On peut utiliser aussi des plastifiants pour obtenir une maniabilité acceptable tout en gardant le rapport eau/ciment raisonnable.

III.4. Constituants d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes (Fig.III.1), se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs parties discontinues réparties dans une partie continue. La partie discontinue, appelée renfort, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la partie continue, appelée matrice. Le rôle du renfort est d ' assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure [26].

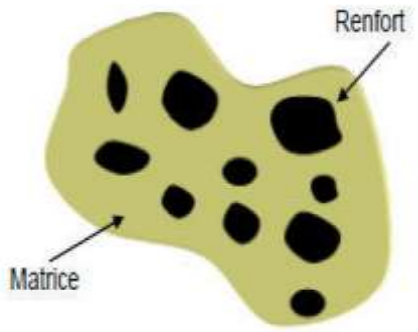


Figure III.1 : Matériau composite

Les principaux facteurs qui contrôlent la performance d'un matériau composite sont :

- Les propriétés physiques des fibres et de la matrice ;
- L'adhérence entre les fibres et la matrice.

Bien que les principes de base soient les mêmes, il existe plusieurs différences caractéristiques entre les armatures conventionnelles et les systèmes à base de fibres :

- Les fibres sont généralement distribuées à travers toute une section donnée tandis que les barres d'armature ou les treillis d'armature sont disposés seulement là où ils sont requis ;
- La plupart des fibres sont plutôt courtes et peu espacées, contrairement aux barres ou aux treillis d'armature en continu ;
- La plupart du temps, un faible volume de fibres est ajouté au béton, ce qui s'avère efficace pour réduire la fissuration due au retrait plastique.

III.5. Composition d'un béton renforcé de fibres

La composition du béton de fibres est différente de celle du béton armé. L'ouvrabilité et l'homogénéité du béton de fibres dépendent de trois facteurs principaux qui sont la géométrie des fibres, la granulométrie de la matrice et le volume de fibres dans le composite.

Pour avoir un renforcement efficace de la matrice, les fibres doivent être suffisamment longues pour s'opposer à l'ouverture des fissures inter granulaires, cette longueur doit être supérieur au dimension du plus gros granulat. Aussi, pour coudre efficacement les deux lèvres des fissures, il faut que les fibres soient munies d'un système d'accrochage qui leur assure un ancrage solide dans la matrice. Cependant, il faut noter que l'augmentation de la longueur des fibres et la présence de systèmes d'ancrage spécifiques diminuent l'ouvrabilité du béton. La granulométrie du béton est étroitement liée à la dimension des fibres. Les dimensions des granulats doivent être telles qu'un nombre réduit de fibres suffise à les encadrer. Pour que les granulats soient bien encadrés par les fibres il est nécessaire d'avoir une matrice riche en éléments fins. Une composition granulaire appropriée s'avère donc nécessaire pour le béton contenant des fibres afin d'obtenir une distribution uniforme des fibres dans le béton et parer à la formation des pelotes de fibres.

La granulométrie influe beaucoup sur la maniabilité du béton, la présence de gros granulats crée des frictions entre les particules ce qui a tendance à réduire l'ouvrabilité. De plus, les fibres incorporées au mélange interfèrent avec les gros granulats et se trouvent de ce fait limitées dans leurs possibilités de mouvement ce qui affecte aussi la maniabilité.

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporé des fibres, Une technique récente, consiste à ajouter au béton, des fibres afin d'améliorer ses propriétés mécaniques (compression, ductilité, flexion). A la déférence des armatures, les fibres sont reparties dans la masse du béton ; elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres métalliques, les fibres organiques, et les fibres synthétiques.

Les bétons renforcés de fibres sont généralement définis comme des composites avec deux composantes principales : les fibres et la matrice. Les fibres sont réparties de manière homogène dans la matrice en béton. Les fibres servent alors à renforcer la matrice qui présente un caractère plutôt fragile. La liaison est alors suppose parfaite. Le matériau obtenu présente une meilleure résistance à la traction, devient ductile et capable de limiter la propagation des fissures [26].

L'amélioration de la résistance à la première fissuration est due au transfert de l'effort à partir de la matrice aux fibres et par l'adhérence la surface des fibres et la matrice. L'effort est ainsi partagé par les fibres et la matrice.

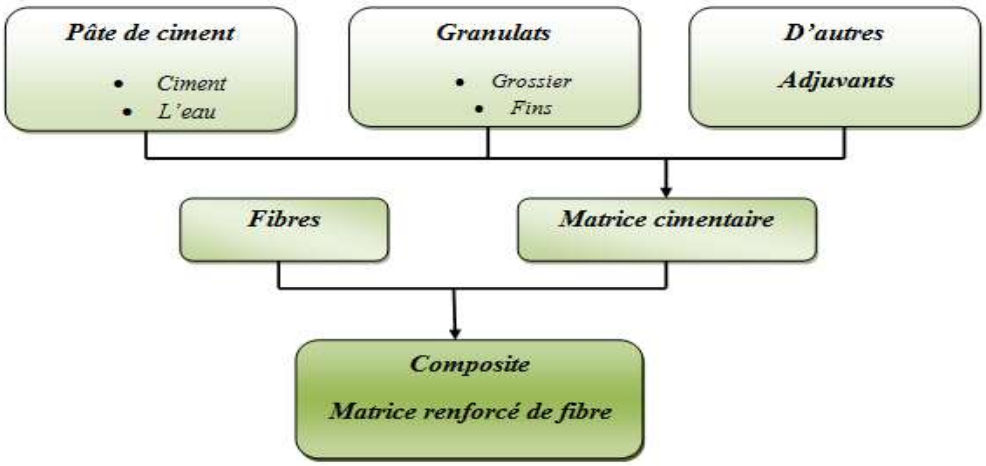


Figure III.2 : Composite considéré comme un système à deux composants

Il faut souligner qu'un renforcement sous forme de fibres distinctes ne peut pas être utilisé en remplacement direct d'une armature d'acier conventionnelle dans les pièces en béton armé et précontraint. Les fibres, en effet, sont moins efficaces que les armatures conventionnelles à taux d'acier équivalant face à des contraintes structurelles bien définies pour lesquelles les approches de conception des structures permettent de concentrer la section d'acier aux endroits critiques [26].

III.6. Dosage en fibre

Concernant la teneur en fibres, il a été montré que la teneur maximale dans la matrice est limitée par le pourcentage de gros granulats car les fibres doivent être bien enrobées [27]. Une forte teneur en fibre entraine une diminution rapide de l'ouvrabilité du béton du fait que l'incorporation des fibres se traduit par une augmentation de la surface spécifique dans le mélange. Cette augmentation de surface tend, par absorption d'eau, à sécher le mélange, ce qui engendre une perte d'ouvrabilité. Pour augmenter l'ouvrabilité du béton de fibres on ajoute en général des plastifiants dans le mélange. La quantité de plastifiant à ajouter dépend de son efficacité. Il faut, dans ce cas-là, un ajustement de la composition des granulats pour que l'adjuvant atteigne son maximum d'efficacité. La teneur en fibre est fixée par une relation empirique dite «limite de faisabilité»:

$$V_f * L/D < 3$$

Avec :

- V_f = fraction volumique des fibres (en %)
- L/D : élancement des fibres

Le dosage limite couramment utilisé pour les bétons de fibres plastique est de l'ordre de 2% [27].

III.7. Maniabilité de béton de fibres

La maniabilité d'un béton de fibre plastique est capitale, selon la destination, pour en faciliter la mise en œuvre. Ainsi pour avoir une étreinte sur le contrôle de l'ouvrabilité, il faut parvenir à gérer plusieurs paramètres et dont la maniabilité est étroitement liée.

1. Le dosage en fibres et l'élancement qui sont inversement liés à la maniabilité ;
2. Le même phénomène est constaté avec une quantité abusive des gros granulats ;
3. La rugosité de la surface des fibres et leur géométrie amplifient le risque de formation d'oursins de fibres au sein d'une matrice cimentaire.

III.8. Apparition des fissures et mécanismes de rupture

La fissuration des matériaux à base cimentaires est inévitable, et est un phénomène très récurrent dans leur pathologie. Au fait, les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements. Avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction. Une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure.

Les fissures peuvent apparaître de différentes manières :

1. Les fissures précoces : elles apparaissent sur le béton frais immédiatement ou quelques heures seulement après le bétonnage. Elles sont dues au tassement du béton frais partiellement empêché par la présence des fibres, et au retrait plastique qui correspond à une déshydratation du béton frais, sous les effets combinés de la température extérieure et du climat.

2. Les fissures d'origine mécanique : elles apparaissent sur le béton en voie de durcissement (quelques jours ou semaines après le bétonnage) ou déjà durci (quelques mois ou années après la construction), ces fissures sont la conséquence de l'apparition de sollicitations, excédant la capacité de déformation du béton ou sa résistance à la traction, et sont dues à des déformations ou des charges imposées à l'ouvrage.

3. Les fissures d'origine physico-chimiques : apparaissent quelques années après la construction, elles sont la conséquence des phénomènes de gonflement ou de réactions chimiques (corrosion des fibres, réactions alcali – granulats), ou à des efforts physiques qui peuvent entraîner une fissuration et un éclatement du béton.

III.9. Avantages et inconvénients des bétons de fibres

III.9.1. Avantages du Béton fibré

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé. Les principaux avantages techniques sont:

- ✓ une augmentation de la ténacité (résistance résiduelle) ;
- ✓ une énergie d'absorption élevée ;
- ✓ une résistance aux impacts, à la fatigue élevée.

III.9.2. Les inconvénients du béton de fibres

- Réduction de la maniabilité (quand le pourcentage est élevé) ;
- Difficulté de faire un malaxage manuel.

III.10. Les propriétés des bétons fibrés

III.10.1. Propriétés mécaniques des bétons fibrés : [28]

III.10.1.1. Introduction

Le principe de renforcement du béton par des fibres est nettement diffèrent d'un renforcement par des armatures classiques. Dans le béton armé, l'acier travaille fréquemment à sa contrainte maximale admissible ; cela est possible lorsque les armatures sont suffisamment ancrées. Mais dans le béton de fibres lisses et droites (dans la plupart des cas) seul une petite longueur d'ancrage est souvent disponible. Cela veut dire que les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres dépendent de façon générale de la qualité des fibres; de celle de la matrice et de l'adhésion entre-elle. Donc ; on peut conclure que la résistance des bétons faits de matrice contenant des fibres courtes discontinues est contrôlée essentiellement par la liaison inter faciale et par la qualité de fibres renforçant et en général aux différents paramètres schématisés :

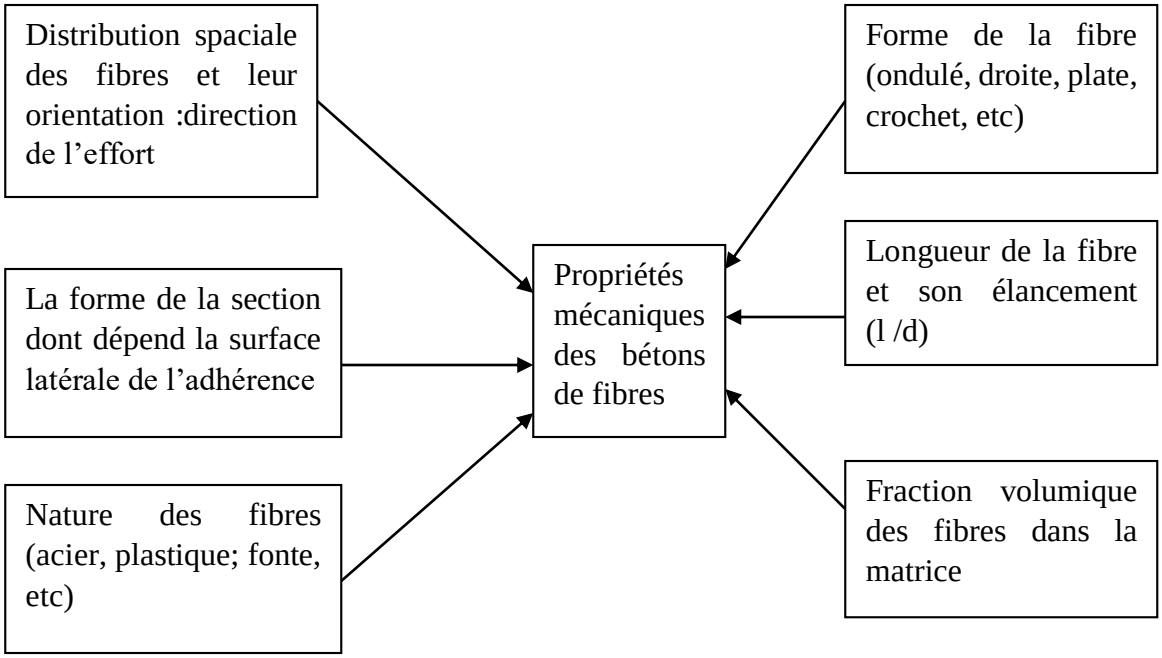


Figure III.3 : Les différents facteurs influents sur la résistance des bétons de fibres

II.10.1.2. Résistance à la compression

La bibliographie montre que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression, et que la résistance à la compression n'est pas affectée que d'une façon insignifiante par la présence de fibres.

Cette influence non remarquable de fibres sur la résistance du béton à la compression peut être justifiée par le fait que la matrice est relativement forte à la compression et les fibres ne contribuent qu'après la rupture de la matrice, ce qui veut dire qu'ils ont un faible effet sur la résistance de béton à la compression.

III.10.1.3. Résistance à la traction par flexion

C'est l'essai le plus couramment utilisé pour le béton de fibre, car contrairement aux essais de compression simple et de traction directe, il révèle une différence de comportement significative entre le béton de fibres et le béton courant. Toutes les études sur le comportement des bétons de fibres des déchets des bouteilles plastiques à la flexion, s'accordent pour constater que l'introduction de ces fibres dans le béton, apporte un comportement ductile à la structure.

III.10.2. Le retrait

Le durcissement du béton dans l'air s'accompagne d'une variation de son volume apparent : le retrait dont les causes ont fait l'objet de nombreuses hypothèses et théories et dont les conséquences sont importantes pour la fissuration. Le retrait est un phénomène complexe d'équilibre hygrométrique qui se produit lorsque le béton est entrain de durcir, il se réfère à la contraction du béton lorsqu'il passe de l'état liquide à l'état solide et il dépend, non seulement des facteurs internes tels que la nature et le dosage du ciment, la compacité et la granulométrie du mortier ou du béton, mais aussi de facteurs extérieurs, tel que la température ambiante. Si l'atmosphère est sèche, il y a évaporation en surface : le retrait augmente. Si l'atmosphère devient humide, de la vapeur se condense dans les capillaires, le retrait diminue. En règle générale, le retrait du béton, avec ajout de fibre, est plus faible que celui du béton témoin sans fibres [29].

Des essais sur des bétons de fibres synthétiques par exemple montrent que, le premier retrait d'hydratation, dû à la prise et au début du durcissement du béton pendant les premières heures qui suivent le gâchage, ainsi que le retrait de dessiccation après durcissement du béton, sont inférieurs à ceux du béton témoin, sans fibres, de même composition [29].

Les fibres synthétiques réduisent donc le retrait plastique en aidant à maintenir l'hydratation du béton, ils agissent comme des barrières pour l'eau empêchant ainsi l'eau d'échapper du béton et de ce fait ils réduisent le taux de perte d'eau, ce qui réduit le retrait plastique.

III.11. Instabilité thermique du béton

Quand un béton est exposé à des hautes températures, deux phénomènes peuvent apparaître et entraînent la perte de matière: l'écaillage et l'éclatement. Ces deux termes peuvent être définis comme suit:

III.11.1. Différentes formes d'instabilité thermique

III.11.1.1 L'écaillage

Dans la communauté anglo-saxonne, ce phénomène est appelé "Thermal Spalling", en français on l'appelle «Écaillage». Ce phénomène désigne le mécanisme par lequel les parements de béton perdent une partie de leur béton de surface quand celui-ci est exposé à des hautes températures. Ce détachement progressif sous forme d'écailles de quelques centimètres carrés et de quelques millimètres d'épaisseur, se produit souvent au début de l'incendie.

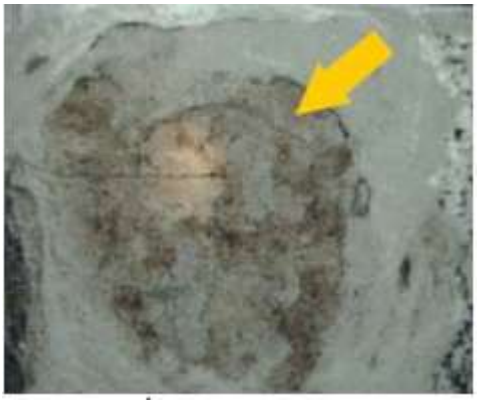


Figure III.4 : Ecaillage lors de l'incendie

III.11.1.2. L'éclatement

Lors d'incendie ou d'essais testant la résistance au feu des matériaux, il a été fréquemment observé des désordres importants appelés «Éclatement » ou « Spalling » (en anglais). En effet, les échantillons de bétons ou de structures en béton ont présenté des éclats et ont été détruits suite à un bruit sourd comme une explosion [30].Il s'agit de morceaux de béton volumineux qui se détachent au cours de l'agression par le feu et peuvent engendrer la perte de capacité portante de la structure.

III.11.2. Paramètres influençant sur l'instabilité thermique

Il y a des paramètres qui peuvent influer sur l'éclatement du béton, les chercheurs dans ce domaine ont permis de spécifier plusieurs paramètres [31], [32]. Ces paramètres sont :

- La présence de l'eau dans le béton qui joue un rôle principal pour l'apparition des pressions internes qui causent l'éclatement.
- La vitesse de montée en température : Le risque d'éclatement augmente lorsque la vitesse de montée en température augmente.
- Nature des granulats : le comportement des granulats est fortement lié à leur nature chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires [32].
- La présence des charges mécaniques favorise parfois l'éclatement du béton Diederichs et al, le démontre notamment par des essais avec pré-charges ou sur des structures précontraintes [33].

III.11.3. Influence des fibres plastiques sur la tenue au feu des bétons

Le béton est un matériau poreux qui renferme de l'eau dont une partie correspond à l'eau excédentaire nécessaire à l'ouvrabilité à l'état frais. En cas d'élévation importante de la température, l'eau, restée prisonnière, se transforme en vapeur. Dans le cas des bétons particulièrement compacts, l'élévation de la température est susceptible de créer des contraintes internes pouvant entraîner un écaillage du béton en surface. L'incorporation de fibres plastiques dans le béton dont la compacité est particulièrement élevée permet d'améliorer leur tenue au feu. Les observations montrent que les fibres des bouteilles en PET fondent lorsque les températures atteignent 220 à 260 °C. Elles créent ainsi en fondant un réseau tridimensionnel constitué d'une multitude de petits capillaires connectés (réseaux de drains) susceptibles de permettre à la vapeur d'eau de s'échapper évitant ainsi les surpressions.

Ce phénomène constitue un moyen efficace pour limiter l'écaillage de surface d'un béton soumis à une élévation de température excessive [34].

III.12. Applications actuelles du béton de fibres plastiques

Depuis que le béton de fibres a été conçu, de nombreux travaux ont montré que l'insertion de fibres pastiques dans une matrice de béton permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques, comme la résistance à la flexion du composite résultant.

Dans le tableau ci-dessous, on indique quelques domaines d'utilisation du béton des fibres plastiques:

Tableau III.1 : Domaine d'application du béton des fibres plastiques

Applications	**Intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton**
Canalisation, coque minces faiblement sollicitées. et constructions des ouvrages hydrauliques (barrages)	-Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge. -Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.
Dallage, chaussées en béton et tous les éléments structuraux soumis à la flexion.	-Diminution de l'ouverture des fissures, -Augmentation de la rigidité après fissuration, -Augmentation de la résistance à l'usure.
Les pistes d'atterrissage.	- augmentation de résistance de choc, - amélioration de la résistance à l'abrasion.
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts.	- Amélioration de la résistance aux chocs, - - diminution de la déformation.
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, les tunnels,	-Evite le travail de fixation des grillages ordinairement employés, -Diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Fondation, Panneaux de revêtement de façade, etc.	-Augmentation de la résistance aux chocs, - Augmentation de la résistance à l'usure, -Augmentation de la durabilité de revêtement.

La réparation des chaussées est un des exemples ou le béton de fibres peut être utilisé pour assurer la durabilité de la structure. La technique consiste à couvrir les chaussées par une couche en béton de fibres. Une expérience effectuée sur une autoroute au Canada montre que la couche de réparation en béton de fibres est restée en bon état de service 8 ans après la réfection, tandis qu'il a fallu refaire la réparation sur les couches en béton non fibré 8 mois après. La présence de fibres dans les couches de surfaçage permet de lutter contre les forces de traction et les contraintes de cisaillement dans les zones fissurées qui causent le décollement des couches du support [35].

CHAPITRE IV.CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BETON

IV.1. Introduction:

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition du béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de son volume, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils peuvent affecter la durabilité et les performances structurales du béton. Les granulats sont donc, un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût.

En fait, on ne peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres. Avant la détermination des dosages des constituants qui rentrent dans la formulation du béton, il est impératif d'examiner certaines caractéristiques des matériaux composants le béton (granulats, ciment, eau), en les mesurant, par des méthodes et essais normalisés.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux de construction utilisés dans la confection du béton à étudier ainsi que les essais effectués selon les normes européennes, normes françaises et les modes opératoires en vigueur.

Les essais sur les matériaux utilisés pour la confection du béton ont été exécutés au laboratoire de matériaux de construction sis à Kiriri.

Les matériaux utilisés sont :

- le ciment ;
- les graviers concassés ;
- le sable de rivière ;
- les fibres plastiques (déchets plastiques) ;
- l'eau de gâchage.

IV.2. Caractérisation des matériaux

IV.2.1. Ciment (liant hydraulique)



Figure IV.1 : Ciment

Le ciment utilisé lors de notre étude est un ciment portland composé (CEMII/A-L) fabriqué par la société des ciments DANGOTE, sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42.5 MPa.

IV.2.2. Le sable



Figure IV.2 : Sable

Dans tous les mélanges de notre étude, nous avons utilisé un sable naturel de classe 0/4 provenant de la rivière KANYOSHA dans la commune MUHA de la mairie de BUJUMBURA.

IV.2.2.1. Caractéristiques physiques du sable

- **la masse volumique absolue**

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Sa détermination est nécessaire pour le dosage pondéral. La masse volumique varie en moyenne de 2450 à 2650 kg/m^3 pour la plupart des granulats naturels [43]. Elle est déterminée convenablement selon la norme NF P 18-555 pour le sable [45] et NF P 18-554 pour les graviers [46]. Elle est exprimée en g/cm^3, kg/m^3 ou T/m^3.

- **Principe de l'essai**

Il s'agit de verser une quantité connue de granulat sec dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue.

Pour cet essai nous avons utilisé la méthode d'éprouvette graduée, alors on a besoin de :

- une balance
- une éprouvette graduée

- **Conduite de l'essaie**

-Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau V_1 (pour notre cas V_1= 300 ml) ;

-Peser un échantillon sec des granulats de masse M (pour notre cas on a pris M = 300 g) ;

-Introduire les granulats dans l'éprouvette graduée en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air

- le niveau monte dans l'éprouvette ;

-Lire le nouveau volume V_2 ;

-Calculer la masse volumique absolue $\rho_{abs} = \frac{M}{V2-V1}$;

Afin d'obtenir des résultats précis nous avons répété toutes ces opérations trois fois.



Figure IV.3 : Détermination des masses volumiques absolue du sable.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : La masse volumique absolue du sable

Désignation	M(g)	V_2 (cm^3)	V_1	ρ_{abs} (g/cm3)	Moyenne (g/cm^3)
Essai 1	300	420	300	2.5	2.56
Essai 2	300	415	300	2.6	
Essai 3	300	415	300	2.6	

- **La masse volumique apparente** *:*

La masse volumique apparente est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides inclus. On a déterminé la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir ayant une capacité de1.57 l soit 1570 cm^3.

- On remplit l'entonnoir avec du sable sec ;
- On pèse le récipient vide, soit M_1 son poids ;
- on le remplie avec du sable ;
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

D'où : $\rho_{app} = \frac{M2-M1}{VR}$

VR = Volume du récipient

Tableau IV.2 : La masse volumique apparente du sable à l'état lâche

Désignation	M_1(g)	M_2(g)	VR (cm^3)	ρ_{app} (g/cm^3)	Moyenne (g/cm^3)
Essai 1	7720	9930	1570	1.40	1.41
Essai 2	7720	9940	1570	1.41	
Essai 3	7720	9950	1570	1.42	

IV.2.2.2. La teneur en eau de sable :

La teneur en eau d'un matériau est le rapport entre la masse d'eau contenu dans ce matériau à la masse du même matériau sec. Elle est déterminée selon la norme NF P 18-554 [46].

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. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats [22].

Mode opératoire :

- Peser un échantillon de sable humide M_h ;
- Mettre le sable dans l'étuve a une température de 105°C environ pendant 24h ;
- Peser l'échantillon de la masse séchée M_s.

La teneur en eau du sable est donnée par la formule suivante :

$$W=\frac{[(M_h-M_s).100]}{M_s}(\%)$$

D'où : M_s : Masse du sable sec en (g)

M_h : Masse du sable humide en (g)

Tableau IV.3: Teneur en eau du sable

M_h (g)	M_s (g)	W (%)
3740	3690	1.35

IV.2.2.3. Analyse granulométrique (NF EN 933-1)

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF EN 993-1 [47].

But de l'analyse granulométrique :

- ❖ Déterminer la grosseur et le pourcentage en poids de différentes formes de granulats constituants les échantillons
- ❖ Tracer la courbe granulométrique

Principe de l'essai:

L'essai consiste à classer les différents grains constituants l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par secousse des tamis manuellement.

La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carré, ces dimensions se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,08mm, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée un échantillon de diamètre <0,08 mm donc on procède par sédimentométrie.



Figure IV.4 : Matériels utilisés pour l'analyse granulométrique

IV.2.2.4. Le module de finesse (NF P 18-540) [48]

Le module de finesse (MF) du sable est défini dans la norme comme la somme des pourcentages cumulatifs retenus sur une série de tamis normalisés donnée, divisée par 100. Il indique la finesse d'un sable: plus le module de finesse est élevé, plus le sable est grossier. Ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de composition des bétons.

Il est déterminé selon la norme NF P 18-540 et calculé selon la formule suivante :

$$\mathrm{MF} = \frac{1}{100}\sum \text{Refus cumulé en \% des tamis}$$

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

Lorsque MF est comprise entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins, il est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance ;
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel, il convient pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités ;
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier et correspond à des sables à utilisés pour la recherche des résistances élevées, mais on aura en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation [31].

Tableau IV.4 **:** Résultats de l'analyse granulométrique du sable et module de finesse.

module	Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)	Mf
37	4	0	0	0	100.0	2.84
34	2	190	190	5.3	94.7	
31	1	560	750	20.8	79.2	
28	0.5	1580	2330	64.5	35.5	
25	0.25	107	3400	94.2	5.8	
22	0.125	21	3610	100	0	

$$MF=\frac{5.3+20.8+64.5+94.2+100}{100}=2.84$$

Le module de finesse obtenu étant de 2.84 ceci nous permet de conclure qu'on est en présence d'un sable grossier qui sera utilisé pour la réalisation du béton.

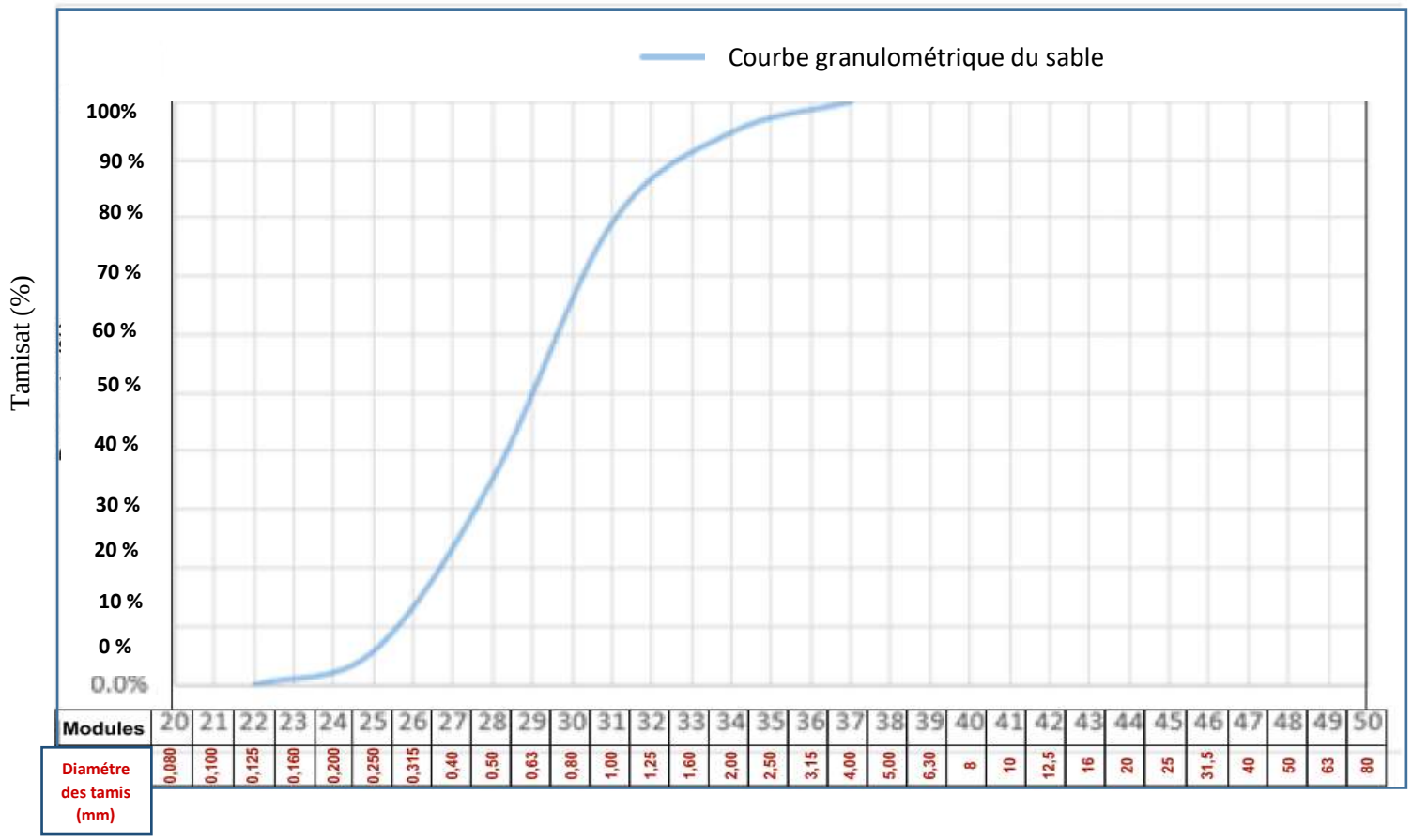


Figure IV.5 : Courbe granulométrique du sable

IV.2.3. Le gravier



Figure IV.6 : Gravier

Pour la réalisation de notre étude expérimentale, nous avons utilisé le gravier naturel concassé provenant de la rivière MUGERE se trouvant dans la commune MUHA en mairie de Bujumbura.

III.2.3.1. La masse volumique apparente

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu de peser la quantité de granulats correspondant.

- **Mode opératoire :**

-Verser les granulats dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par couches horizontales successives.

-Araser la couche supérieure des granulats à l'aide d'une réglette. La masse volumique est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M2-M1}{VR}$$

D'où :

V : volume du récipient

M2 : poids de l'ensemble (granulat + récipient)

M1 : poids du récipient

Tableau IV.5 : La masse volumique apparente du gravier

Désignation	Gravier	V (cm^3)	M2 (g)	M1 (g)	ρapp(g/cm^3)	Moyenne
Essai 1	4/ 20	1570	10010	7720	1.46	1.48
Essai 2			10090	7720	1.51	
Essai 3			10050	7720	1.48	

III.2.3.2. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue est déterminée convenablement à la norme NF P 18-554 [42].

On utilise le même mode opératoire que le sable :

-Remplir l'éprouvette échantillon graduée avec un volume d'eau V_1 (on a pris V_1= 150 ml)

-Peser un échantillon sec M de granulats (nous avons utilisé M=150g)

- La masse volumique absolue est donnée par cette formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Tableau IV.6 **:** La masse volumique absolue du gravier

Désignation	M(g)	V_2 (cm^3)	V_1 ((cm^3)	ρ_{abs} (g/cm3)	Moyenne (g/cm3)
Essai 1	150	203	150	2.83	2.88
Essai 2	150	201	150	2.94	
Essai 2	150	202	150	2.88	

II.2.3.3. Teneur en eau

La teneur en eau est déterminée selon la norme NF P 18 - 555 [45] et on utilise le même mode opératoire que pour le sable.

La teneur en eau du gravier est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{[(M_h - M_s).100]}{M_s}(\%)$$

D'où : Ms : poids du gravier sec en (g)

Mh : poids du gravier humide en (g)

Tableau IV.7 : Teneur en eau du gravier

M_h(g)	M_s(g)	W (%)
1500	1496	0.267%

II.2.3.4. Analyse granulométrique du gravier

L'essai d'analyse granulométrique est de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Le gravier passe à travers une série de tamis décroissante des mailles en (mm).

Tableau IV.8 : Résultat d'essai d'analyse granulométrique du gravier

module	Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
44	20	0	0	0	100
43	16	854	854	18.9	81.1
40	8	2457	3311	73.1	26.9
37	4	550	4530	100	0

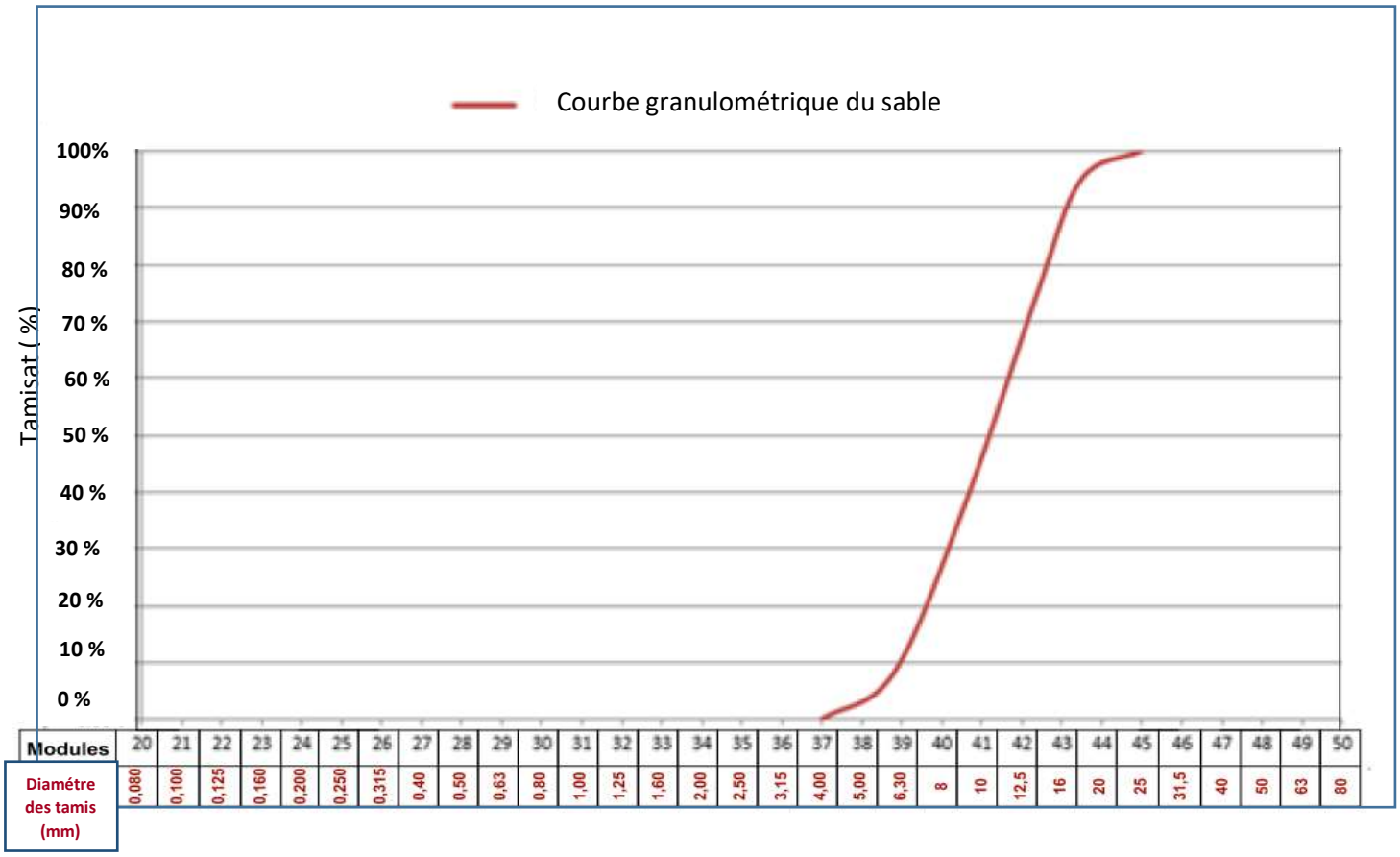


Figure IV.7 : Courbe granulométrique du gravier

IV.2.4. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des différents bétons est une eau potable de robinet sans traitement supplémentaire. Elle est appropriée pour la fabrication du béton, sa qualité est conforme aux prescriptions de la norme NFP 18- 404.

IV.2.5. Les fibres plastiques (déchets plastiques) :

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres de nature plastique issues des déchets industriels «les bouteilles plastiques » traitées et coupées manuellement sous forme des fibres ondulées. Le choix de ce type de fibre a été fait dans le but de valoriser les déchets industriels, de limiter la pollution environnementale et d'augmenter la résistance mécanique du béton surtout en traction par flexion. Leurs propriétés sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau IV.9: Propriétés des fibres plastiques

Caractéristiques	Fibres plastiques
Longueur (mm)	25 à 40
Largeur (mm)	0.5 à 1



Figure IV.8 : Les fibres (déchets plastiques des bouteilles kinju)

La longueur de la fibre doit être supérieure au diamètre du plus gros granulat, ce qui est le cas pour notre travail car le diamètre du plus gros granulat utilisé est de 20mm et la longueur des fibres varie entre 25 à 40 mm. Le dosage de ces fibres dans le béton est fait par rapport à la masse du ciment.

- **La masse volumique des fibres à l'état compact**

C'est la masse des fibres par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les fibres. Elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Après remplissage du récipient et le compactage par tassement manuelle, on le pèse : soit M2 la masse de l'ensemble (fibres + récipient) et M1 la masse du récipient.

La masse volumique est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M2-M1}{VR}$$

Avec V_R : le volume du récipient.

Tableau IV.10 **:** La masse volumique apparente des fibres à l'état compact

Désignation	M_1 (g)	M_2 (g)	V (cm^3)	ρ_{app} (g/cm^3)	Moyenne
Essai 1	8	160	918.45	0.17	0.16
Essai 2	8	150	918.45	0.15	
Essai 3	8	150	918.45	0.15	

IV.3. Formulation du béton ordinaire

La composition d'un béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable, graviers) dans 1 m^3 de béton, la définition de ces proportions passe d'abord par les essais sur les matériaux que nous avons décrit dans la partie précédente, le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation, par la suite on choisit la méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Dreux-Gorisse, Bolomey, Faury, Vallette, , Joisel, etc. La méthode utilisée dans ce travail est celle de Dreux-Gorisse [38].

IV.3.1. La méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode française est de nature fondamentalement empirique qui date de 1970. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants, sur la base d'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme Semi-logarithmique.

Son but est de définir d'une manière simple et rapide une première formulation de béton en fonction de trois paramètres principaux de béton :

- les courbes granulométriques des granulats utilisés (sable et gravier) ;
- la résistance et l'ouvrabilité désirée.

IV.3.2. Principe de la méthode

La résistance et l'ouvrabilité désirée conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau. Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité de serrage, module de finesse du sable, pompabilité, des différents granulats dont on dispose. Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré.

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

IV.3.2.1. Résistance souhaitée

Par sécurité, la résistance visée doit être majorée de 15% par rapport à la résistance que l'on Souhaite obtenir. Ainsi, la résistance visée doit être obtenue comme suit :

$$f_c \approx f_{c28} + 15\% f_{c28}.$$

IV.3.2.2. Dosage en ciment et en eau

Il faut en premier lieu évaluer le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée $\boldsymbol{fc'}$ en utilisant la formule empirique suivante :

$$\boldsymbol{fc'} = G.\, f_{CE}\,(\frac{C}{E} - 0.5)$$

Avec :

$f_{C'}$: résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours $f_{C'28}$) en MPa

f_{CE}: classe vraie de ciment en MPa.

G : coefficient granulaire.

C : dosage en ciment (Kg de ciment/m^3 de béton).

E : dosage en eau totale (Kg d'eau/m^3 de béton ou litre d'eau/m^3 de béton).

-par la suite d'après le rapport $\frac{C}{E}$ on détermine le dosage en ciment en fonction de l'affaissement que l'on souhaite avoir ainsi que le volume d'eau. .

Tableau IV.11 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins D ≤16mm	Moyens 20mm ≤ D ≤40mm	Gros D ≥50mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

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

La connaissance, ou l'évaluation de $f_{C'28}$, G et f_{CE} permet de calculer la valeur de C/E. L'application de l'abaque de la figure IV.9 permet, en fonction de cette valeur C/E et l'affaissement souhaité A, de déterminer le dosage en ciment C [38].

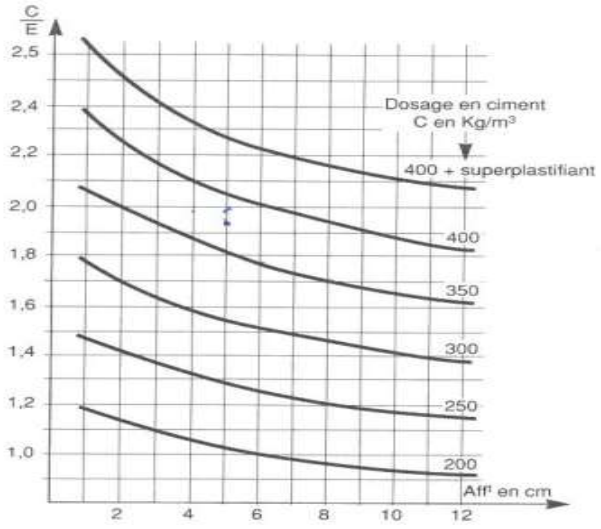


Figure IV.9 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)

La connaissance de ce dosage C et de la valeur C/E permet d'évaluer approximativement le dosage en eau E (E= dosage de ciment / le rapport $\frac{C}{E}$) qui sera ultérieurement corrigé pour obtenir la plasticité désirée (affaissement au cône d'Abrahams).

La correction se fait en fonction de la dimension des granulats, pour tenir compte de leur surface spécifique. Lorsque la dimension maximale des granulats D < 20 mm la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau.

Les corrections à appliquer sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau IV.12: Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats

Dimension maximale des granulats D en mm	5	8 à 10	12.5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63.5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+15	+9	+2	0	-4	-8	-12

IV.3.2.2. Tracé de la courbe granulaire de référence AOB

Cette courbe correspond au mélange des granulats (sables +graviers mais ciment non compris) peut être schématisée suivant une ligne brisée, tracée sur un graphique granulométrique normalisé. Son origine basse est à 0% de tamisât pour la dimension d correspondant théoriquement aux plus petits grains de sable et son extrémité haute à 100% de tamisât pour la dimension D correspondant aux plus gros granulats utilisés.

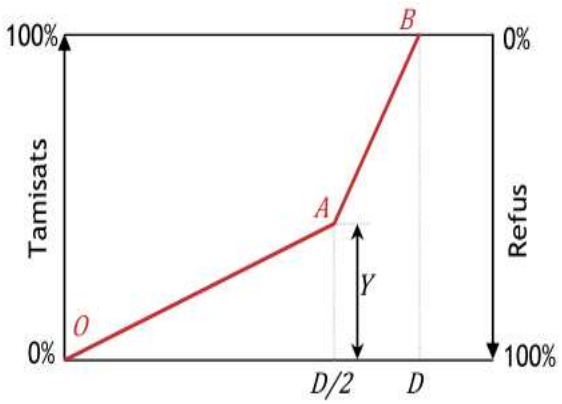


Figure IV.10 : Schéma de principe de la courbe granulaire de référence pour un béton dont les granulats ont un diamètre maximum D_{max} inférieur ou égal à 20 mm.

- le point O est repéré par ses coordonnées: [d; 0] (d : diamètre du plus petit granulat)
- le point B est repéré par ses coordonnées: [D; 100], (D: le diamètre du plus gros granulat).

Le point de brisure A a des coordonnées ainsi définies :

- en abscisse :
- si D ≤ 20 mm, le point de brisure a pour abscisse: D/2
- si D > 20 mm, l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D ;
- en ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K$$

Avec K : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés.

Deux cas nécessitent une correction supplémentaire du terme correcteur K :

- si le module de finesse est différent de 2,5 (la valeur de 2,5 correspond à une valeur optimale), une correction supplémentaire peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6MF_G - 15$ (MF_G étant le module de finesse du sable) ;
- si la qualité du béton est précisée pompable, il convient de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité *courante* ; le terme correcteur K sera majoré par un terme K_P = +5 à +10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

Tableau IV.13 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats [43]

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

IV.3.2.3. La ligne de partage :

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats qui seront utilisés. Cette ligne joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5%, de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et gravier.

Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier.
Après le traçage de la courbe on obtient les pourcentages des granulats (sable et gravier).

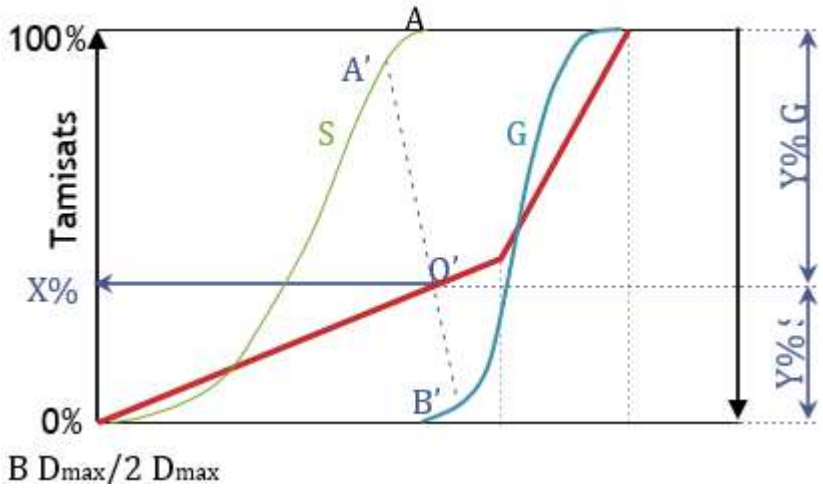


Figure IV.11 : Courbe granulaire de référence

IV.3.2.4. Estimation du coefficient de compacité

Le coefficient de compacité γ estimé à l'aide du tableau figure IV.14 permet de déduire la quantité des différents autres composants de la formulation. Les pourcentages relevés graphiquement pour chacun des granulats composants le béton s'appliquent aux volumes absolus de ces granulats.

La compacité γ est définie comme le rapport entre le volume absolus des matières solides au volume total du béton frais en œuvre soit un mètre cube.

$$\gamma = V_{SO} / V_{béton}$$

Le volume des matières solides V_{So} est la somme du volume de ciment V_C et le volume de granulats V_G :

$$V_{SO} = V_C + V_G$$

La connaissance de ce coefficient de compacité γ est nécessaire pour calculer les volumes absolus réels des divers granulats dont on connait les pourcentages pour chacun d'entre d'eux.
Ce coefficient est fonction de beaucoup des paramètres :

- D : dimension maximal des granulats ;
- la consistance (affaissement au cône d'Abrams) ;
- moyen de serrage.

Tableau IV.14 : Valeur du coefficient de compacité γ

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

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

IV.3.2.5. Détermination de la composition en volume absolu :

Ayant choisi dans le tableau précédant une valeur approximative de γ on en déduit le volume absolue de l'ensemble des matériaux solides $V_{SO}= (1000\times\gamma)$ (en litres l ou en décimètre cube dm^3)

À ce stade, on aura déjà défini le dosage en ciment C et le volume absolu des grains de ciment est

$Vc= \frac{c}{\rho abs\ ciment}$

Avec :

c : dosage en ciment (kg/m^3)

$\rho_{abs\ ciment}$: la masse volumique absolue de ciment kg/m^3 (soit 3100 kg/m^3 valeur moyenne habituellement admise)

Le volume absolu des granulats seuls (sans ciment) est donc $V_G= (1000dm^3 \times\gamma)$ –Vc

Et comme le tracé de la composition de référence a permis d'évaluer le pourcentage de chacun des granulats à utiliser, on détermine alors le volume absolu de chacun d'eux.

- **Volume absolu de granulats** :

- Volume de sable Vs = Le pourcentage de sable × V_G
- Volume des graviers Vg = Le pourcentage des graviers × V_G

Avec V_G : volume absolu des granulats

La connaissance des masses volumiques absolues de chacun des granulats permet alors d'obtenir la composition de pondérale sèche en masse

IV3.2.6. Détermination de la composition pondérale sèche en Kg

-Masse du sable = Vs × ρ_{abs} du sable

-Masse des graviers = Vg × ρ_{abs} des graviers

Finalement on trouve les quantités des masses de gravier, sable et eau et dosage de ciment pour un mètre cube de béton.

IV.3.3. Application de la méthode :

- **Résistance visée :**

Par sécurité, la résistance visée est majorée de 15% par rapport à la résistance que nous souhaitons obtenir. Ainsi, la résistance visée est obtenue comme suit :

La résistance désirée pour le béton à 28 jours est : σ28j =25 MPa

La résistance visée vaut alors : σ'28j=1.15 x σ28j = 1.15×25=28.75 MPa

- **Dosage en ciment et en eau :**

Le rapport $\frac{C}{E}$ est donné par :

$$fc' = G.F_{CE}\left(\frac{C}{E} - 0.5\right) \rightarrow \frac{C}{E} = \frac{28.75}{0.5X42.5} + 0.5 = 1.85$$

Remarque :

- La classe vraie du ciment CEMII/A-L est estimée à 42.5Mpa
- la qualité des granulats : bonne et D =20mm d'où le coefficient granulaire G=0.5

Dosage en ciment d'un mètre cube de béton:

Connaissant le rapport C/E et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A=8cm, on en déduit,

grâce à l'abaque (figure IV 9), le dosage en ciment correspondant :

C/E = 1.85
A= 8 cm
} **L'abaque (figure IV.9)** donne la valeur du dosage en ciment égal à C=375kg/m³

- d'après le rapport $\frac{C}{E} = 1.85$ la quantité d'eau sera estimée comme suit :

$$E = \frac{325}{1.85} = 203L \quad \Longrightarrow \quad E = 203\ L$$

(Pas de correction sur le dosage en eau car on a D =20mm)

Le rapport $\frac{E}{C}$ =0.54 .

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

Nous traçons une courbe de référence OAB avec:

- le point O est repéré par ses coordonnées: [0.063; 0]
- le point B est repéré par ses coordonnées: [20; 100],

Les coordonnées du point de brisure A sont les suivantes:

- en abscisse : comme le diamètre du plus gros granulat D = 20mm, donc le point de brisure a pour abscisse:

D/2 = 10 mm

- en ordonnée: Y = 50 - $\sqrt{D}$ + K

K: Terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés. Pour notre cas, comme nous avons le dosage en ciment de 375 kg/m3, un granulat concassé et une vibration normale,

On va prendre K = +1 ;

$K_S = 6MF_G - 15 = (6x2.84)-15=2.04$

$K_P = +0$ (béton non pompé)

Alors $Y = 50-\sqrt{20} +1+2.04=48.56$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont: [10;48.56].

➢ **la ligne de partage**

La ligne de partage est tracée sur la figure suivante :

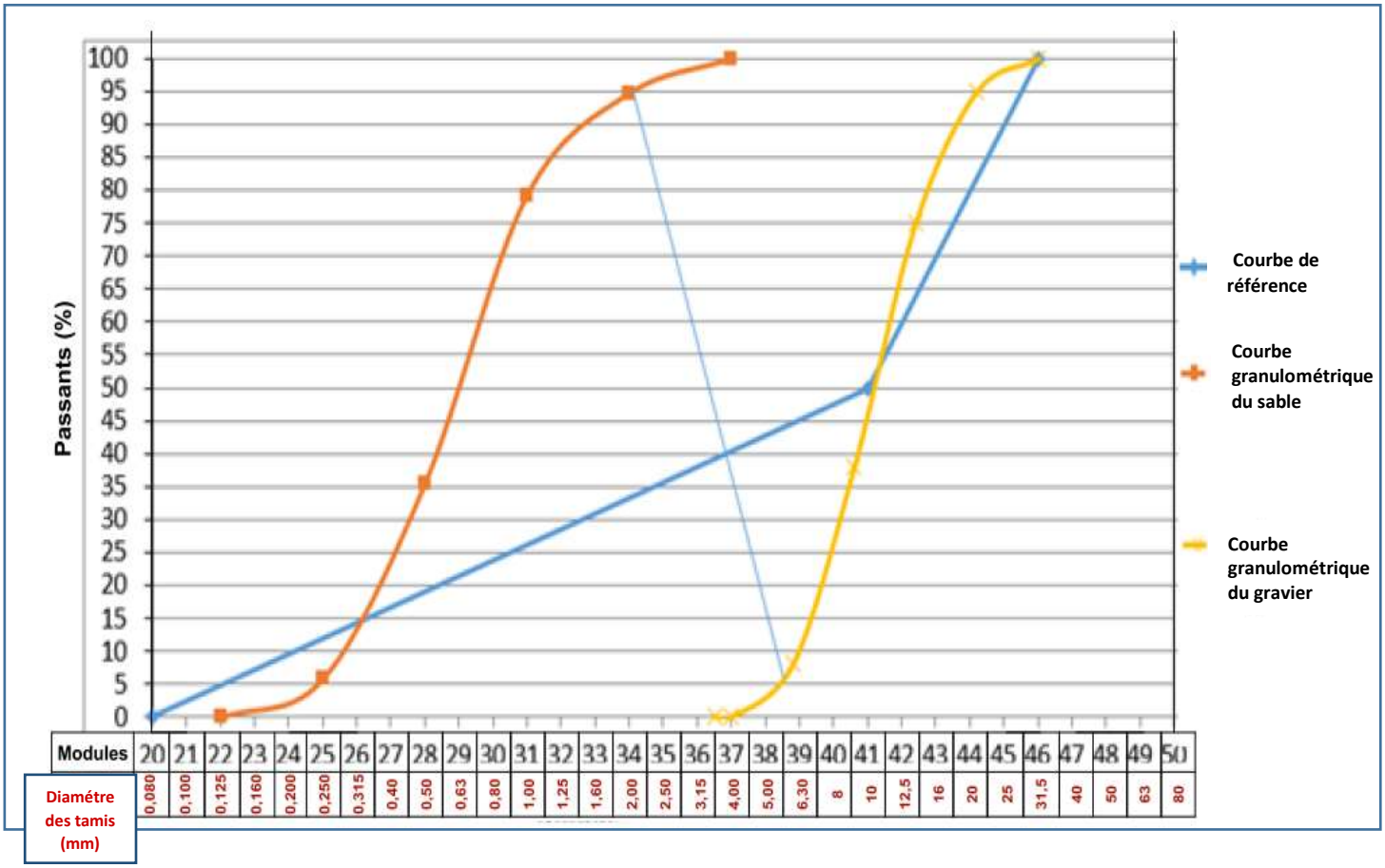


Figure IV.12 : Courbe granulaire de Dreux- Gorisse

Sur la courbe de granulométrie, les points d'intersection entre la ligne de partage et la courbe OAB donne les pourcentages des granulats suivants:

- Sable: 41%

-Gravier: 59%

➢ **Détermination de la composition en volume absolu** :

La compacité γ est définie comme le rapport entre le volume de solide et le volume total du béton :

$$\gamma = V_{SO} / V_{béton}$$

Le volume de solide V_{SO} est la somme du volume de ciment V_C et le volume de granulats V_G :

$$V_{SO} = V_C + V_G$$

-Le dosage en béton est déterminé pour obtenir un mètre cube de béton en place cela signifie que le volume des composants du béton vaut $1m^3$:

$$\gamma = \frac{Vc+VG}{1m^3} = \frac{Vc+VG}{1000dm^3}$$

La masse volumique du ciment utilisé étant de $3100kg/m^3$ on aura alors le volume du ciment :

$$Vc = \frac{375kg}{3100kg/\text{m3}} = 0.121\ m^3 = 121\ dm^3$$

-détermination des volumes absolus des granulats :

De la relation $\gamma = \frac{Vc+VG}{1000\ dm^3}$ on en déduit V_G

$$V_G = (1000\ dm^3 \times \gamma) - Vc$$

Avec :

V_G : volume absolu des granulats (V_G=Vg+Vs),

Vg : volume gravier

Vs : volume sable

γ : Coefficient de compacité

En utilisant le tableau des valeurs du coefficient de compacité, on trouve :

$$\gamma = 0.825$$

Et comme nous avons utilisé le sable roulé et les graviers concassés dans cette étude, on va alors apporter une correction de -0.01 sur la compacité :

$$\gamma = 0.825\text{-}0.01 = 0.815$$

Alors $V_G = (1000\ dm^3 \times 0.815) - 121\ dm^3$

$$V_G = 694\ dm^3$$

-Volume de sable : $Vs = 41\% \times 694 = 284.54\ dm^3$

- Volume de gravier $Vg = 59\% \times 694 = 409.46\ dm^3$

- **Détermination de la composition pondérale sèche en Kg**

- Masse de ciment (C) =375Kg/ m^3

- Masse de sable (S) = $Vs \times \rho_{abs} = 0.28454\ m^3 \times 2560kg/\ m^3 = 728.42\ Kg / m^3$

-Masse de gravier 4/20 = Vg× ρ_{abs} = 0.40946m^3×2880kg/ m^3 = 1179.24 Kg/ m^3

Pour préparer 1m^3 de béton, il faudra donc les masses suivantes :

Tableau IV.15 : Composition des bétons pour 1 m^3

Constituants	Quantité
Sable	728.42 kg
Gravier	1179.24 kg
Ciment	375kg
Eau	203kg
E/C	0.54
G/S	1.61

Le dosage des fibres plastiques (0.5%, 1.5%, 2%) est fait en fonction de la masse du ciment.

IV.4. Présentation du travail expérimental

Après la caractérisation de tous les matériaux constituant le béton, nous présentons les principaux essais faits dans le laboratoire des matériaux de construction au campus kiriri sur les différents bétons étudiés (béton ordinaire et les bétons fibrés).

On a procédé à la formulation de quatre variantes de béton :

- béton ordinaire : 0% des fibres (BO)
- béton fibré I : 0.5% des fibres (BF1)
- béton fibré II : 1.5% des fibres (BF2)
- béton fibré III : 2% des fibres (BF3)

Avant la réalisation d'une gâchée, la quantité des matériaux nécessaires a été mesurée pour chaque échantillon étudié (béton ordinaire et les bétons fibrés) suivant les dosages obtenus par la méthode de Dreux Gorisse .Le volume des gâchées a été fixé à 0.006 m^3 pour les moules cubiques et 0.012 m^3 pour les moules prismatiques de façon à permettre la confection de six éprouvettes cubiques de 10 cm de côté et 3 éprouvettes prismatiques de 10x10x40cm^3.

Mais pour des raisons de sécurité, pour chaque lot de mélange nous avons mis un dépassement correspondant à 2 moules cubiques (0.002m^3)

Volume de 1 moule cubique=$c \times c \times c$=$10 \times 10 \times 10 = 1000cm^3 = 0{,}001m^3$

Volume de 6 moules cubiques $= 0{,}001m^3 \times 6 = 0{,}006\ m^3$

Volumique de 1 moule prismatique= $c \times c \times L$=$10 \times 10 \times 40$=4000 cm^3=0.004m^3

Volume de 3 moules prismatiques=0.004m^3×3=0.012 m^3

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques, nous avons réalisé certains essais de flexion et compression sur les échantillons des différents bétons étudiés, les éprouvettes cubiques sont utilisées pour déterminer la résistance du béton à la compression tandis que les éprouvettes prismatiques sont utilisées pour déterminer la résistance à la traction par flexion.

Mise en œuvre

Pour réaliser le béton des déchets (fibres) plastiques nous avons fait un malaxage manuel en procédant comme suit :

- afin d'assurer l'homogénéité des fibres dans toute la matrice cimentaire, nous avons commencé à mélanger le ciment et les fibres à sec en les dispersant dans toutes les particules fines du ciment
- l'homogénéisation du mélange à sec (gravier +sable)
- mélange du ciment contenant les fibres et les granulats à sec
- introduction de l'eau de gâchage au cours du malaxage



Figure IV.13 : Malaxage du béton

Les différents essais réalisés au cours de ce travail sont:

Essais sur le béton frais :

- essai d'ouvrabilité
- masse volumique

Essais sur le béton durci:

- la masse volumique
- essai de résistance à la compression
- essai de résistance à la traction par flexion
- essai d'absorption d'eau par immersion

IV.4.1. Essais sur le béton frais

A l'état frais, nous avons fait l'essai d'affaissement au cône d'Abrams ainsi que la détermination des masses volumiques des différents bétons étudiés.

IV.4.1.1. L'ouvrabilité (affaissement au cône d'Abrams) :

L'ouvrabilité a été mesurée selon la norme NF P18-451[49], cet essai consiste à remplir un moule tronconique (D=20 cm, d=10 cm ; h= 30cm) en trois couches tassées par une tige d'acier de 16 mm de diamètre et d'extrémité arrondie. Le piquage est exécuté selon un ordre de 25 coups par couche avec une répartition des coups uniforme sur chaque section de couche. Ensuite, on soulève le moule verticalement avec précaution et sans provoquer un mouvement latéral ou de torsion sur le béton ; puis on mesure l'affaissement qui est la différence entre la hauteur du cône et la hauteur du béton affaissé.



Figure IV.14 : Mesure de d'Affaissement au cône d'Abrams

IV.4.1.2. La masse volumique

La masse volumique du béton à l'état frais a été mesurée selon la norme NF P18-440 [50]
La masse volumique est calculée selon la formule :

$$M_v=\frac{m_2-m_1}{v}$$

Avec

- M_V : la masse volumique du béton frais g/cm^3
- m_2 : la masse du récipient et du béton contenu dans ce récipient en g
- m_1 : la masse du récipient en g
- v : le volume du récipient en cm^3



Figure IV.15 : Mesure de la masse volumique à l'état frais

- **Vibration**

Les mélanges ont été gâchés avec l'eau du robinet, les moules ont été remplis en différentes couches pendant la vibration sur la table vibrante, nous avons choisi les éprouvettes cubique de type 10x10x10 cm^3 pour les essais de compression et 10x10x40 cm^3 pour les essais de traction par flexion, nous avons ensuite arasé les éprouvettes à l'aide d'une règle car la face supérieure de l'éprouvette doit être lisse est bien finie.



Figure IV. 16 : Vibration et remplissage des moules

- **Mode de conservation**

Après les vibrations, les éprouvettes sont conservées au laboratoire des matériaux de construction à une température ambiante de 20^0C selon la norme NF P18-438. Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Le démoulage a été effectué avec soin après 24 heures et les éprouvettes sont conservées dans une chambre de conservation jusqu'au moment de la réalisation des essais, ces derniers se font à 28 jours.



Figure IV.17 : Conservation des éprouvettes dans l'eau

IV.4.2. Essais sur le béton durci

Les essais de caractérisation sur le béton durci sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.16 : Les essais de caractérisation sur le béton durci

Mélanges	Pourcentage des fibres (%)	Nombre d'éprouvette	Dimension (Cm)	Age (Jours)	Type d'essai
BO	0	6	10x10x10	28	compression
BF1	0.5				
BF2	1.5				
BF3	2				
BO	0	3	10x10x40	28	Traction par flexion
BF1	0.5				
BF2	1.5				
BF3	2				
BO	0	3	10x10x10	28	Absorption par immersion
BF1	0.5				
BF2	1.5				
BF3	2				

IV.4.2.1. La masse volumique

Pour mesurer la masse volumique de différents bétons durcis, nous avons pesé 6 éprouvettes pour chaque béton étudié ensuite on a pris la moyenne laquelle nous avons divisé avec le volume du moule, selon la norme **NF EN 12390-7** [51].

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

Avec

M_V : la masse volumique du béton durci en g

M : la masse de l'éprouvette en g

V : le volume de l'éprouvette en cm^3



Figure IV.18 : Mesure de la masse volumique à l'état durci

IV.4.2.2. Résistance à la compression

Les essais de compression sur des éprouvettes cubique de béton des déchets (fibres) plastiques et ordinaire sont réalisés à l'aide d'une presse de compression suivant la norme NF P 18-406 [52].

L'essai a pour but de connaitre la résistance à la compression du béton. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La machine d'essai est une presse d'une capacité maximale de 1500 KN. Elle est constituée de deux plateaux. Celui du haut est fixe alors que celui d'en bas est relié à un piston exerçant une force axiale croissante P. cette presse est commandée manuellement et est munie d'un capteur qui enregistre directement la charge maximale de rupture et la résistance de compression maximale. La charge P qui est appliquée à vitesse constante 5KN/s jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression sera donc :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Avec

R_C : Résistance à la compression en MPa

F : Charge de rupture en kilo newton (KN)

S: Surface de l'éprouvette

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme propriété la plus importante bien que, dans nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité puissent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton à la compression et presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité **[16].**



Figure IV.19 : Essai de résistance à la compression

IV.4.2.3. Résistance à la traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimension 10x10x40 cm^3 ont été utilisées pour la détermination de la résistance à la traction par flexion. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes et est munie d'un banc de flexion à trois points et d'une capacité de 3000 KN.

Cet essai est fait suivant la norme NF P 15-471 [53], et permet de déterminer la résistance à la traction par flexion des bétons étudiés. C'est l'essai le plus couramment utilisé, il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté « a » et de longueur « 4a » (10x10x40cm^3).

$$R_f = \frac{1,5PL}{a^3}$$

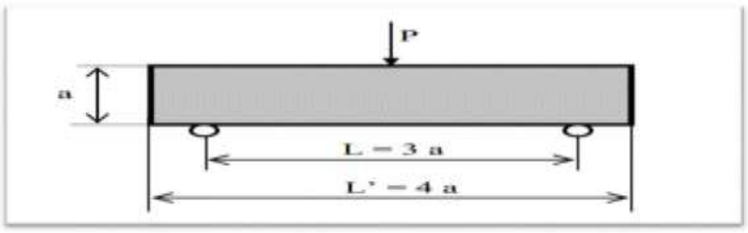


Figure V.8 : Illustration de l'essai de traction par flexion

Avec :

R_f : est la résistance en traction par flexion en MPa ;

a : est le côté de la section carrée de prisme en millimètres (mm) ;

P : est la charge à la rupture appliquée au milieu du prisme en newtons (N) ;

L : est la distance entre les appuis en millimètres (mm).



Figure IV.20 : Essai de résistance à la traction par flexion

IV.4.2.4. Essai d'absorption d'eau par immersion NF EN 13369 :

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, l'essai consiste à mettre les éprouvettes des bétons cubiques (10x10x10cm) dans l'étuve et les peser à l'état sec, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 h (c'est-à-dire jusqu'à la saturation des matériaux) afin de calculer le volume des vides du béton. Le coefficient d'absorption par immersion A_b est donné par la formule suivante :

$A_b=\frac{Mh-ms}{Ms}\times 100$

Avec

Mh : masse humide

Ms : masse sec



Figure IV.21 : Essai d’absorption d’eau par immersion

CHAPITRE V. RESULTATS ET DISCUSSION

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir des différents essais cités dans la partie précédente. Ensuite nous avons entamé un volet concernant l'analyse et discussions des résultats sur l'ensemble des différents bétons étudiés.

V.2. État frais

V.2.1. Affaissement au cône d'Abrams

Pour comparer l'ouvrabilité des différents bétons étudiés, nous avons mesuré l'affaissement par le cône d'Abrams et les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.1 : Valeurs de l'affaissement au cône d'Abrams trouvées

Type de béton	Dosage en fibre (%)	Affaissement (cm)
BO	0	8
BF1	0.5	6.5
BF2	1.5	5
BF3	2	4

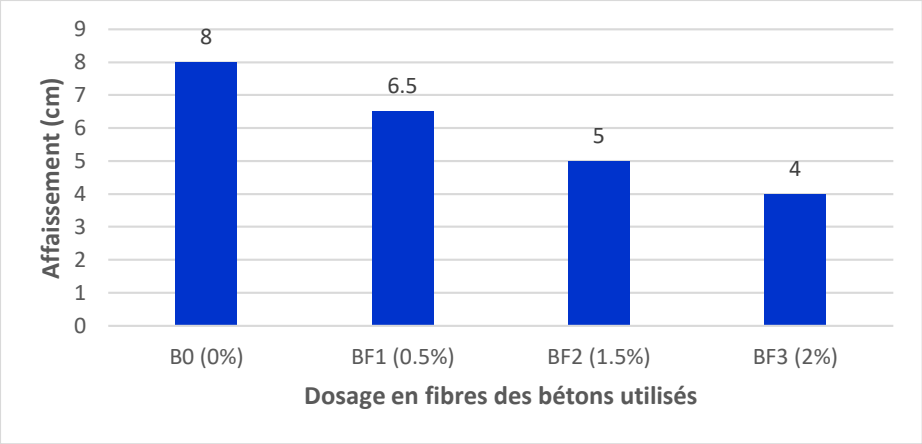


Figure V.1: Effet des déchets (fibres) plastiques sur l'affaissement

D'après ces figures, on constate que l'ouvrabilité du béton à base des déchets plastiques diminue avec l'augmentation du taux de dosage en fibres. Bien que pour notre cas les 3 premiers bétons étudiés restent dans la même classe de consistance (plastique), cependant à des dosages élevés (2%) on obtient un béton qui est ferme et cela nécessite l'utilisation des plastifiants. Donc l'ajout des déchets (fibres) plastiques a pour effet de diminuer l'ouvrabilité du béton. Cela s'explique par le fait que les fibres se mélangent avec le béton et créent une résistance à l'écoulement en augmentant la viscosité du béton qui rend difficile le déplacement du mélange.

V.2.2. Evaluation de la masse volumique à l'état frais

La masse volumique du béton à l'état frais a été mesuré juste après avoir mis le béton dans les moules, les résultats des mesures des masses volumiques des bétons étudiés à l'état frais sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Les masses volumiques frais des différents bétons étudiés

Type de béton	Masse des éprouvettes (en Kg)							Masse volumique ($Kg/m^{3)}$
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	moyenne	
BO (0%)	2.8	3	2.85	2.83	2.77	2.72	2.828	2828
BF1 (0.5%)	2.79	2.77	2.78	2.75	2.72	2.73	2.756	2756
BF2 (1.5%)	2.63	2.67	2.63	2.7	2.71	2.68	2.67	2670
BF3 (2%)	2.62	2.65	2.6	2.63	2.61	2.57	2.61	2613

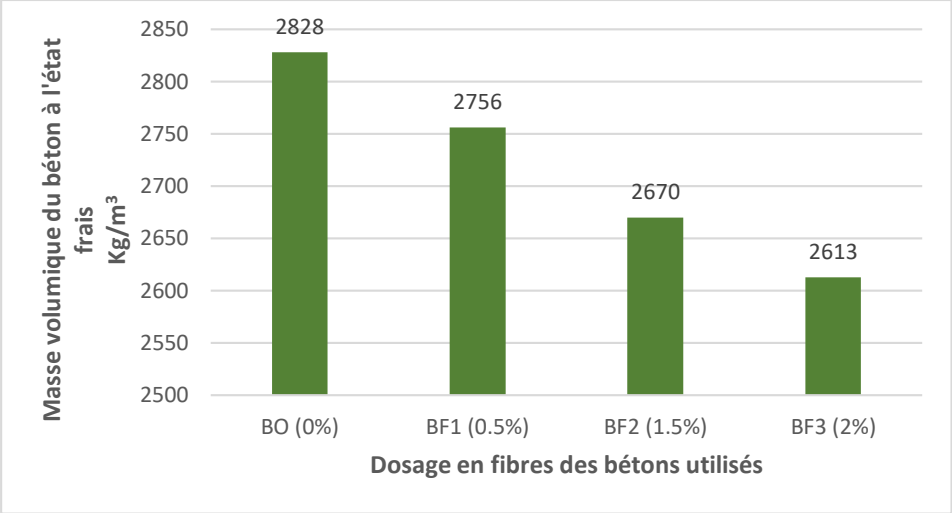


Figure V.2 : Variation de la masse volumique du béton frais en fonction du dosage en fibre plastique

D'après les résultats obtenus, on remarque que la masse volumique du béton ordinaire à l'état frais est de 2828 Kg/m^3 et diminue à 2725 Kg/m^3 ,2670 Kg/m^3 et 2613 Kg/m^3 pour respectivement 0.5%, 1.5% et 2% des bétons contenant des fibres plastiques. Ceci est dû à la densité des fibres qui est faible.

V.3. État durci

V.3.1. Evaluation de la masse volumique :

La masse volumique a été évaluée après 28 jours de durcissement en milieu humide, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.3 : Valeurs des masses volumiques trouvées à l'état durci

Type de béton	Masse des éprouvettes (en Kg)							Masse volumique (Kg/m$^{3)}$
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	moyenne	
BO (0%)	2.67	2.69	2.6	2.67	2.5	2.7	2.638	2638
BF1 (0.5%)	2.57	2.52	2.63	2.55	2.56	2.57	2.566	2566
BF2 (1.5%)	2.5	2.47	2.5	2.59	2.61	2.59	2.543	2543
BF3 (2%)	2.56	2.5	2.55	2.61	2.57	2.43	2.536	2536

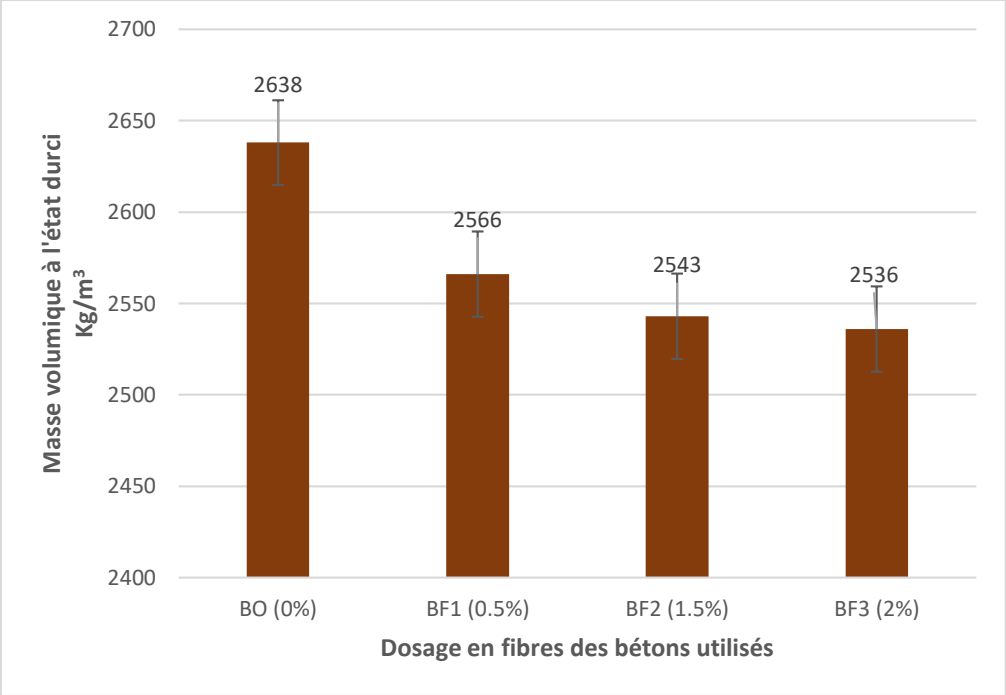


Figure V.3 : Variation de la masse volumique des bétons à l'état durci en fonction du dosage en fibre des déchets plastiques

On remarque que les masses volumiques des bétons contenant les fibres plastiques diminuent en fonction de l'augmentation du dosage des déchets plastiques et reste toujours inferieurs à la masse volumique du béton ordinaire. Cette diminution est de l'ordre de 2.7%, 3.6% et 3.8% pour respectivement 0.5%, 1.5% et 2% des bétons contenant les fibres des déchets plastiques, cela est expliquée par le fait que les fibres plastiques ont une masse volumique très faible. Ces résultats sont conformes à ceux de Coronaldesi et Al dans la littérature mais eux ont trouvé une diminution de la masse volumique allant jusqu'à 5%.

La masse volumique nous permet aussi de faire la classification des bétons, les différents bétons fibrés étudiés sont classés comme des bétons normaux (masse volumique comprise entre 2200 à 2600kg/m^3) et le béton ordinaire est classé comme étant un béton lourd (masse volumique supérieur à 2600 kg/ m^3)

V.3.2. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression sont la moyenne évaluée sur 6 éprouvettes cubique pour chaque type de béton étudié, ces résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.4 : Résultats de la résistance à la compression

Désignation	Résistance du béton à la compression à 28 jours (MPa)						
Eprouvettes	E1	E2	E3	E4	E5	E6	moyenne
BO (0%)	26.689	26.071	28.419	25.536	24.239	26.394	26.22
BF1 (0.5%)	26.189	28.486	29.828	22.162	25.234	26.143	26.34
BF2 (1.5%)	28.452	24.927	23.169	24.845	28.365	26.423	26.03
BF3 (2%)	25.958	23.933	25.443	25.588	27.245	26.241	25.73

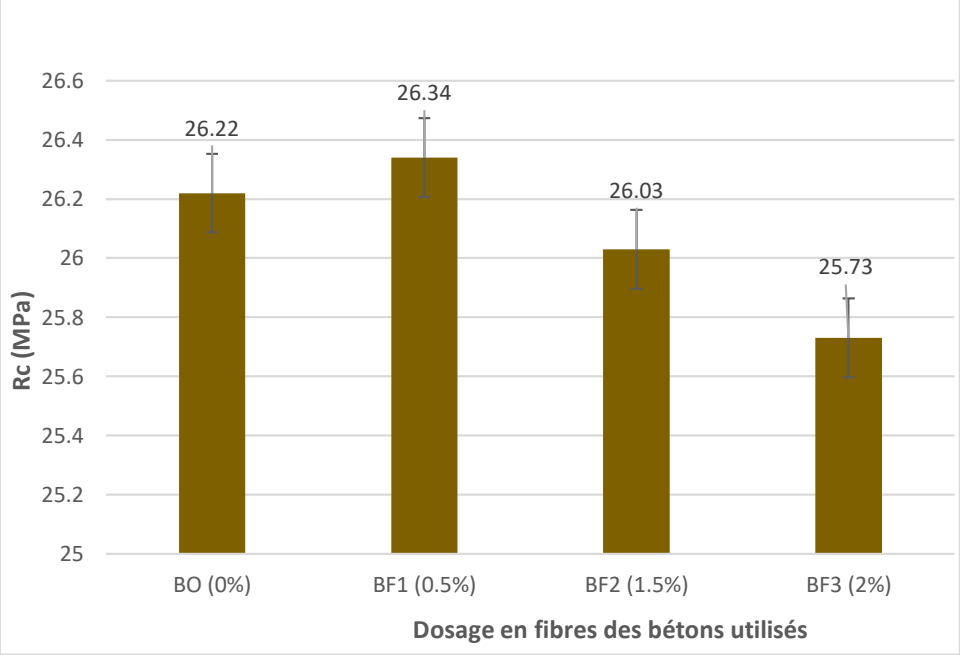


Figure V.4 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des fibres des déchets plastiques

D’après les résultats obtenus, on constate que l’ajout des fibres plastiques dans le béton a un effet non significatif sur la résistance à la compression, avec l’ajout de 0.5% de fibres, nous remarquons un gain de résistance en compression (26.34Mpa) mais qui est presque négligeable par rapport au béton ordinaire (26.22Mpa), ce gain est de l’ordre de 0.45%. Cependant avec les dosages de 1.5% et 2% on remarque que la résistance à la compression diminuent légèrement (26.03Mpa et 25.73Mpa), cette diminution est respectivement de l’ordre de 0.72% et 1.86%. Cette influence non remarquable de fibres sur la résistance du béton à la compression peut être justifiée par le fait que la matrice est relativement forte à la compression et les fibres ne contribuent qu’après la rupture de la matrice, ce qui veut dire qu’ils ont un faible effet sur la résistance de béton à la compression.

V.3.3. Résistance du béton à la traction par flexion

La machine utilisée pour la réalisation de l’essai de traction par flexion donne uniquement la charge de rupture appliquée au milieu du prisme en kilo newtons (KN), ces charges ont été évaluées sur la moyenne de trois éprouvettes prismatiques pour chaque béton étudié comme c’est indiqué dans le tableau suivant :

Tableau V.5: Résultats de la résistance à la traction par flexion

désignation	la charge de rupture (KN)				Résistance à la traction par flexion (MPa)
éprouvettes	E1	E2	E3	Moyenne	
BO (0%)	13	14	11	12.66	5.7
BF1 (0.5%)	19	15	17	17	7.65
BF2 (1.5%)	17	18	20	18.33	8.25
BF3 (2%)	20	19	17	20.66	8.4

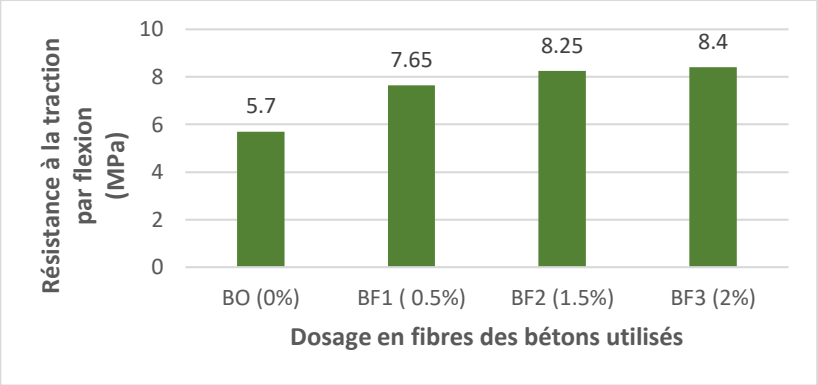


Figure V.5 : Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du dosage des fibres des déchets plastiques

On remarque que tous les bétons fibrés présentent des résistances élevées en traction par flexion par rapport au béton ordinaire et plus le taux de dosage en fibre augmente plus la résistance à la traction par flexion augmente aussi, cette augmentation est de l'ordre de 34.21%, 44.73% et 47.36% pour respectivement 0.5%, 1.5% et 2% des bétons contenant les déchets plastiques. Ce qui veut dire que les fibres ont apporté un soutien dans la zone de faiblesse du béton, elles ont pour effet d'homogénéiser la répartition des efforts internes, de retarder l'apparition des fissures dans le béton et d'améliorer sa ductilité. Ces résultats sont conformes à ceux de GUENDOUZ Mohamed, DEBIEB Farid et KADRI El hadj dans la littérature.

Lors de l'écrasement, nous avons constaté que l'ouverture des fissures est importante dans le cas du béton ordinaire par rapport au béton renforcé par les fibres des déchets plastiques comme l'indique la figure suivante :



Figure V.6 : Béton fibré après écrasement et béton sans fibre après écrasement

V.3.4. Essai d'absorption d'eau par immersion

Nous avons effectué l'essai d'absorption d'eau par immersion pour avoir une idée sur la porosité interne des différents bétons étudiés et les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.6 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion

Type de béton	Masse sec (Kg)	Masse humide (Kg)	Absorption (%)
BO (0%)	2.56	2.67	4.29
BF1 (0.5%)	2.43	2.57	5.76
BF2 (1.5%)	2.36	2.5	5.93
BF3 (2%)	2.41	2.56	6.22

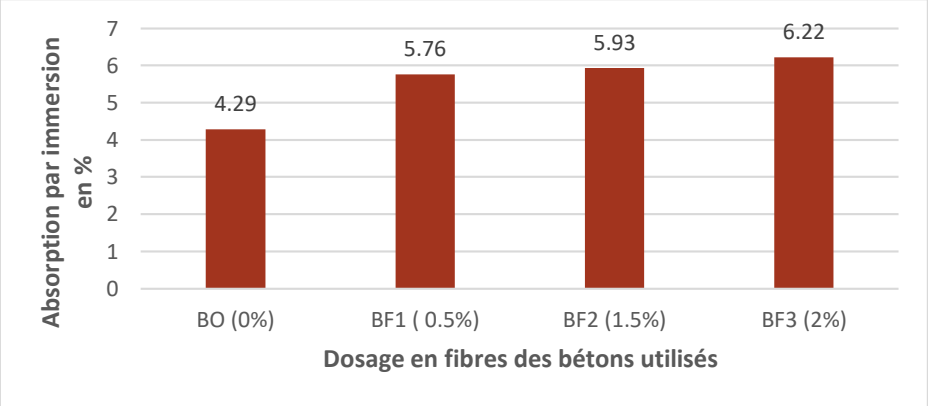


Figure V.7 : Variation de l'absorption de l'eau par immersion en fonction du dosage des fibres des déchets plastiques.

Les résultats obtenus montrent que la porosité est plus élevée pour les bétons fibrés par rapport au béton ordinaire et plus le taux de dosage en fibres augmente plus la porosité augmente également. Cette augmentation de la porosité est due à l'incorporation des fibres qui réduisent la surface de contact entre les granulats et la pâte du ciment créant ainsi des espaces vides dans le béton et diminue sa compacité. Cependant, cette diminution de compacité est relativement faible et peut être compensée par l'utilisation des plastifiants. L'augmentation de la porosité peut également être justifiée par des canaux formés après l'introduction des bétons fibrés dans l'étuve lors de la réalisation de l'essai. Les fibres ont tendance à fondre et créent ainsi des vides dans la matrice.

CONCLUSION

Notre travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des déchets des bouteilles plastiques dans le béton sous formes de renfort (fibres plastiques) afin d'améliorer le comportement mécanique du béton surtout en traction par flexion en augmentant sa ductilité et en transformant le comportement fragile du béton en un comportement ductile.

Dans l'étude expérimentale nous avons formulé quatre types de béton contenant des pourcentages différents des fibres plastiques : 0% pour le béton ordinaire sans fibres et 0.5%, 1.5% et 2% pour les bétons fibrés .Les essais de traction par flexion et de compression ont été réalisés afin d'étudier l'effet de l'ajout de ces fibres sur le comportement mécanique du béton. Les résultats obtenus pour les différents bétons fibrés ont été comparés avec ceux obtenus pour le béton ordinaire.

A la lumière des résultats obtenus, on conclut que :

- Les déchets plastiques peuvent être valorisés comme renfort dans le béton.
- L'ouvrabilité des bétons à base des déchets plastiques diminue avec l'augmentation du taux de dosage en fibres plastiques, le dosage élevé des fibres nécessite l'utilisation des plastifiants.
- L'incorporation des fibres des déchets plastiques dans le béton donne une certaine légèreté du béton à cause de la faible densité des fibres par rapport aux granulats du béton.
- Les bétons fibrés donnent des résistances à la traction par flexion élevées par rapport au béton ordinaire, le béton formulé avec 2% de fibres donne de meilleurs résultats (gain de 47.36%) par rapport aux autres bétons.
- Les bétons fibrés donnent des résistances à la compression presque identique à celles du béton ordinaire.

Nous espérons une continuité des travaux de recherches dans les années à venir afin de valoriser tous ces déchets plastiques dans la formulation des bétons pour limiter la pollution environnementale et améliorer le comportement mécanique du béton dans sa zone de faiblesse.

RECOMMANDATIONS

Afin de rendre cette étude encore plus meilleure, je recommande donc, éventuellement pour les travaux futurs, d'aborder les points suivants :

- Etude du comportement mécanique du béton contenant des déchets plastiques soumis à des hautes températures. cela permettre de comprendre comment le matériau réagit aux variations de température et s'il peut être utilisé dans des applications requérant une isolation thermique.
- Valorisation des déchets plastiques dans le béton sous forme des granulats.
- Effets de l'ajout des plastifiants sur le comportement mécanique des bétons contenant des fibres plastiques.
- Etude du comportement mécanique des pavés à base des déchets plastiques et du sable
- Etudier l'adhérence entre les fibres plastiques et le béton en effectuant des essais d'arrachement. Cela permettra de déterminer la résistance de l'interface fibres-béton et d'évaluer la capacité de transfert de charge.
- Déterminer le module d'élasticité du béton contenant les fibres plastiques. Cette mesure sera utile pour évaluer la rigidité du matériau et sa capacité à résister aux déformations élastiques.
- Effectuer une analyse économique pour évaluer la viabilité financière de l'utilisation du béton contenant des fibres plastiques dans différents projets de construction. Comparer ses coûts par rapport à ceux des autres matériaux traditionnels et examiner les avantages potentiels.
- Identifier les domaines d'application spécifiques où le béton contenant des fibres plastiques pourrait être utilisé avantageusement. Par exemple, explorer son utilisation dans la construction de structures légères, revêtements routiers ou de produits préfabriqués

Toutes ces différentes études pourront conforter les arguments avancés et permettre de convaincre la population et le monde scientifique en générale de l'utilité de la valorisation de ces déchets plastiques dans le but d'assainir notre environnement souillé par ces déchets.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Khemissi Redouane «Caractérisation et choix d'une filière de traitement des déchets ménagers et assimilés de la ville d ' Oran» thèse de Magister Université d ' Oran 2013-2014.

[2] SOULEYMANE, DIA Mouhamadou Bassirou et SOUMAH Mouloukou. Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât: perspectives pour l'Algérie. Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.

[3] B. Traore, ' Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés) : Amélioration de la résistance par des charges en argiles', thèse de doctorat, Université de Félix Houphouët- Boigny, 30 novembre 2018.

[4] Les plastiques, http://positiveimpakt.eu/wp-content/uploads/2018/0.

[5] Composition du plastique, «http://sindaleachadapte.e-monsite.com/pages/le-plastique-principal-constituant-du-7éme-continent/composition-du-plastique, html.

[6] M. fontaine and Y. Gnanou, chimie et physico-chimie des polymères. Dunod, 2014.

[7] Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Gutierrez, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior+at different w/c ratios. Waste Manag 2009.

[8] Sheelan M. Hama, Nahla N. Hilal Propriétés fraîches du béton autocompactant avec des déchets.

[9] Al-Manaseer, A.A., Dalal, T.R., Concrete containing plastic aggregates, 19. American Concrete Institute, 1997.

[10] Siddique, R., Khatib, J. & Kaur,l.(2008).use of recycled plastic in concrete]

[11] Corinaldes, V., Giuggiolini,M.,& Moriconi, G.(2014).recycled PET fibers in precast concrete elements. Construction and building Materials, 55, 78-85.

[12] Nazari,A & Riahi,S.(2019).experimental investigation of polyethylene terephthalate fibers on mechanical properties of concrete journal of cleaner production.

[13] François PERCHE « absorption des poly carboxylates et de lignosulfates sur poudre modèle et ciments »Thèse de doctorat.

[14] Barkat Abderezzak «valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrage en béton » thèse de Magister Université Kasdi Merbah Ouargla 2006-2007.

[15] Livre des résumés. Université le roi saoud saoudien, 2019.

[16] BELBALI. Amel et BOUCHENTOUF. Fatima Valorisation énergétique de déchet de déjection par méthanisation (mouton). Mémoire de master, Université Adrar, 2016.

[17] M. Quebaud, « caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats.» Béthune, université d4artois, 1996.

[18] Nassah Dalila, « Influence de la quantité de fibres naturelles et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés », mémoire de Master UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES, 2017.

[19] P. Rossi, N. Harrouche et A. Belloc (1989), « Méthode de Composition des bétons de fibres métalliques », Annales de l'ITBTP, n° 475, pp. 38-43.

[20] Bindiganavile, N. Banthia, B. Aarup, Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite, ACI Mater. J. 99 (6) (2002) 543e548.

[21] CHANVILLARD G, (1993), « analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire », études et recherche des LPC, série ouvrages d'art.

[22] P. Casanova (1995), « Béton renforcé de fibres métalliques du matériau à la structure ». Thèse Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées Paris (France).

[23] Taylor M., Lydon F.D. et Barr B.I.G. «Toughness measurements on steel fiber reinforced high strength concrete », Cement and Concrete Composites, 1997.

[24] Johnston C.D. (1996), « Proportioning, mixing and placement of fiber-reinforced cements and concretes », Production Methods and Workability of Concrete Proceedings of the International RILEM Conference, edited by Bartos, Marrs and Cleland, London.

[25] Youssef fritih «doctorat de l'université de Toulouse » 2009.

[26] A. Noumowé. Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances. PhD thesis, INSA, Lyon, 1995.

[27] KACHI, M.S. (1997) « calcul non linéaire jusqu'à rupture, d'une section en béton armée de fibres métalliques », thèse de magister, université m. mammeri de tizi-ouzou, fev. 1997.

[28] A.N.Bdour, Y.A.AL- Khalayeh, innovative application of scraptire steel cords in concrete mixes, Jordan (2010)

[29] http://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc 215_41-51.pdf.

[30] Fares Hanna,. "Propriétés Mécaniques et Physico-chimiques de Bétons Autoplaçants Exposés à une température élevée." Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.

[31] Noumowé, N.A., Effet de hautes températures sur le béton (20-600°C), Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.

[32] Khoury G., Majorana C., Thermo-Hydralbehaviour, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.

[33] Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Pentalla, V., Behaviour of high strength concrete at elevated temperatures, Espoo 1989, Helsinki University of Technology, Department of structural Engineering, report 92, pp. 72.

[34] Pierre ROSSI Laboratoire Central des Ponts & Chaussées (mars/avril 2009)

[35] Chanvillard G, Aitcin P.C, Lupien C, et Do M.T, "Les surfaçages minces adhérents en béton renforcés de fibres métalliques", Colloque Francophone, les bétons renforcés de fibres métalliques, recherches en cours et réflexion sur leur développement. Béthune, France, pp. 93-104, (juillet 1994).

[36] Dinnequin P., Cours supérieur de béton armé -Règles BAEL 80, Paris: EYROLLES, 1983, p. 350.

[37] J. Baron – JP. Olivier et J.C.Weiss : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles – 806p-1997.

[38] Gorisse F., Essais et contrôle des bétons, Paris: EYROLLES, 1978, p. 200.

[39] Commission d'Experts de l'UNESCO, Code et manuel d'application pour le calcul et l'exécution du béton armé Rédigé par une Commission d'Experts de l'UNESCO, Paris: DUNOD, 1968, p. 417.

[40] Nassah Dalila, « Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales(polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés », mémoire de Master UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES, 2017.

[41] Ben Boujemaa Kahina, Djerroud Mounia et Moussaoui Sabrina, « Influence des fibres métalliques (issues de l'unité BCR) sur le comportement mécanique et physico-chimique des mortiers ». Mémoire de Master de l'université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2013.

[42] Norme NF P 18-554, Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du Coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, 1990.

[43] Festa Jean et Dreux Georges, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles (huitième édition), 1998, 416 pages.

[44] BOUFEDAH BADISSI, Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire, thèse de magister ; université Mentouri Constantine.

[45] Norme NF P 18-555, Granulats - Mesures des masses volumiques, Coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, 1990.

[46] Norme NF P 18-554, Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité ,du Coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, 1990.

[47]Norme NF EN 933-1, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- Partie 1: Détermination de la granularité- Analyse granulométrique par tamisage, 1997.

[48]Norme XP P 18-540, Granulats - Définitions Conformité Spécifications(indice de classement P 18-540), 1997.

[49] N.F P18-451. Béton frais, « essaie d'affaissement », 1981 pdf.

[50] N. F P18-440. Essai pour le béton frais « Partie 6 : masse volumique », 1999.

[51] NF.EN 12390-7, Essai pour béton durci « partie 7 : Masse volumique du béton » vol.33 no. 0,2001.

[52] Hélène H., Xavier J., Formulation d'un béton ordinaire, Paris: Ecole normale supérieure. 2018.

[53] Essai pour le béton durci, partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes » vol. P18-433,2001.