

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU**  
**Faculté de Génie de la Construction**  
**Département de Génie Civil**



**MEMOIRE DE MASTER**  
Spécialité : Génie Civil  
Option : Structure

**Thème**

**Etude du comportement mécanique à  
haute température des bétons à base de  
fibres plastique (PET) et métalliques**

**Réalisé par :**

**M<sup>lle</sup> TAYEBI Mariem**

**Dirigé par :**

**M<sup>me</sup> O. FEDAOUI - AKMOUSSI**

**Promotion : 2022/2023**

## *Remerciements*

Tout d'abord je tiens à remercier, Dieu le tout puissant qui m'a accordé la force, la patience et la volonté d'accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice M<sup>me</sup> AKMOUSSI pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, sa modestie et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail.

Je voudrais aussi que M<sup>ME</sup> KHELOUI, trouve ici mes meilleures salutations et ma reconnaissance pour son accueil, son soutien et ses conseils.

Mes vifs remerciements vont également aux membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du laboratoire Génie Civil, et génie mécanique de l'Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, en particulier à M<sup>me</sup> FADILA. M ainsi que M<sup>r</sup> BOUHRAOUA. R et le technicien du laboratoire de génie mécanique.

Mes sincères remerciements vont également à mes parents et tous ceux qui ont contribué de près et de loin à l'aboutissement de ce projet de fin d'étude.



# Dédicaces

Je dédie ce travail :

A **mes parents** qui m'ont soutenus et encouragés durant ces années d'études. Qu'ils trouvent le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mon chère **frère boudjema** qui m'a toujours soutenu et encouragé.

A mon mari Hakim qui a été toujours à mes côtés, et qui m'a beaucoup encouragé

A mes frères **Rahim** et **Mohamed**, et mes sœurs **Khaoula** et **Romaissa**, et ma très chère tante **Nadia**.

A mes belles sœurs **Lilia** et **Zohra** et **ma grand-mère**.

A tous mes amis (es) et ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, et qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours « **S. Celia, M. Amel, S. Meriem, B. Yasmine, M. Randa, M. djidji,**

**A. Yasmine, I. hamadoune** »

A tous ceux que j'aime.

## Table de matière

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

### Chapitre I

#### Partie A : Les déchets dans le béton

I. A. Généralités sur les déchets .....	04
I.A.1. Définition des déchets .....	04
I.A.2. Etat de l'environnement .....	05
I.A.3. Les différents types de déchets .....	05
I.A.3.1. Les déchets ménagers.....	05
I.A.3.2. Les déchets non dangereux .....	06
I.A.3.3. Les déchets toxiques .....	06
I.A.3.4. Les déchets inertes .....	06
I.A.3.5. Les déchets industriels banals (DIB) .....	07
I.A.3.6. Les déchets ultimes .....	08
I.A.4.L'impact des déchets sur l'environnement .....	08
I.A.5.L'impact des déchets sur le secteur économique .....	08
I.A.6. Types de valorisation des déchets en génie civil .....	09
I.A.7. Les déchets valorisables en génie civil .....	09
I.A.7.1. Les laitiers d'aciérie .....	09
I.A.7.2. Les cendres volantes .....	09
I.A.7.3. Les déchets de verre .....	10
I.7.4. Pneus usagés .....	11
I.A.7.5. Ciment durci.....	12
I.A.7.6. Valorisation et recyclage des plastiques .....	12
I.A.7.7. Déchet de démolition .....	12
I.A.8. Déchets plastiques.....	13
I.A.8.1. Définition de PET .....	14
I.A.8.2. Propriétés générales du PET .....	14
I.A.8.3. Domaines d'application de PET .....	15
I.A.8.4. Recyclage et valorisation du PET .....	15

I.A.9. Conclusion .....	15
-------------------------	----

## **Partie B : Béton soumis à haute température**

I.B.1. INTRODUCTION.....	17
I.B.2. Comportement du béton à la haute température .....	18
I.B.2.a. Transformations de la matrice cimentaire .....	18
I.B.2.b. Transformations des granulats .....	19
I.B.2.c Déformation thermique libre .....	20
I.B.3.1 Evolution des Propriétés mécaniques.....	21
I.B.3.2. Module d'élasticité .....	23
I.B.3.3. Evolution des propriétés physiques .....	23
I.B.3.3.1. Perte de masse .....	23
I.B.3.3.2. Porosité.....	24
I.B.3.3.3. Formes d'endommagement thermique .....	25

## **Chapitre II**

### **Partie A : Matériaux et méthodes**

Introduction .....	29
II.A.1. Matériaux utilisés .....	29
II.A.1.1. Types d'éprouvettes utilisées.....	29
II.A.1.2. Ciment.....	31
II.A.1.3. L'eau .....	31
II.A.1.4. Les granulats .....	31
II.A.1.5. Le sable .....	32
II.A.1.6. Les adjuvants .....	32
II.A.1.7. Les fibres .....	33
II.A.1.7.1. Fibres plastique PET .....	33
II.A.1.7.2. Les fibres métalliques .....	33
II.A.1.8. Équipements utilisés .....	34
II.A.3. Analyse granulométrique.....	34
II.A.4. Module de finesse .....	37

II.A.5. Masse volumique apparente et absolue .....	38
II.A.6. Équivalent du sable.....	40
II.A.7. Essai d'affaissement .....	43
II.A.8. Composition de béton par la méthode de DREUX – GORISSE .....	44
II.A.9. Confection du béton.....	45
II.A.10. Les essais à l'état durci .....	47
II.A.3.8. Essais de cycles chauffage – refroidissement .....	47
II.A.3.9. Essai de compression uni axial .....	48
II.A.3.10 Essai de traction par flexion trois points.....	49
II.A.11. CONCLUSION.....	50

### **Partie B : Interprétation des résultats**

INTRODUCTION.....	52
II.B.1 FORMULATIONS .....	52
II.B.2 PERTE DE MASSE.....	52
II.B.3 ESSAI DE COMPRESSION .....	54
II.B.3.1 Résistance à la compression.....	54
II.B.3.2 Courbes contrainte-déformation à la compression.....	54
a) Influence de la température .....	54
b) Influence du type de fibres .....	57
II.B.4 ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS .....	60
a) Influence de la température .....	60
b) Influence du type de fibres .....	62
Conclusion générale .....	65

## Liste des figures :

### Chapitre I :

#### Partie A : Les déchets dans le béton.

Fig.I.A.1 : L'état de dégradation de l'environnement de la Wilaya Tizi Ouzou .....	4
Fig.I.A.2 : Ratio de production de déchets .....	5
Fig.I.A.3 : Composition moyenne annuelle de DMA (Source AND, Année 2018/2019) .....	5
Fig.I.A.4 : Déchets interne .....	7
Fig.I.A.5 : Déchets ultime .....	8
Fig.I.A.6 : Laitiers d'aciérie .....	9
Fig.I.A.7 : Cendres volantes .....	10
Fig.I.A.8 : Déchets de verre .....	10
Fig.I.A.9 : Pneus usagés .....	11
Fig.I.A.10 : Ciment durci .....	12
Fig.I.A.11 : Déchets de démolition .....	13
Fig.I.A.12 : Type des fibres plastiques utilisées dans le béton /mortier.....	13
Fig.I.A.13 : Flacon en PET .....	14

#### Partie B : Béton soumis à haute température

Fig.I.B.1 : Exemples des détériorations à la suite d'incendies.....	18
Fig.I.B.2 : Processus de déshydratation /réhydratation de la pâte de ciment exposée à haute température .	19
Fig.I.B.3 : Déformation thermique des pâtes de ciment.....	21
Fig.I.B.4 : Résistances en compression à chaud de béton à différentes températures.....	22
Fig.I.B.5 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des BO et BHP.....	23
Fig.I.B.6 : Evolution du module d'élasticité résiduel relatif .....	24
Fig.I.B.7 : Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons.....	25
Fig.I.B.8 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température .....	26
Fig.I.B.9 : Etat de surface et fissures des bétons avec différentes températures .....	27

### Chapitre II: Partie expérimental :

Fig.II.A.1 : Moules cylindriques .....	28
Fig.II.A.2 : Moules prismatiques .....	29
Fig.II.A.3 : Eprouvette décoffré.....	29

Fig.II.A.4 : Le ciment.....	30
Fig.II.A .5 : Les granulats utilisés .....	30
Fig.II.A.6 : Le sable utilisé .....	31
Fig.II.A.7 : Fibres plastiques PET .....	32
Fig.II.A.8 : Les fibres métalliques utilisées .....	32
FigII.A.9 : Vibrotamis électrique .....	34
Fig.II.A.10 : Courbes Granulométriques .....	36
FigII.A.11 : Mesure de la masse volumique apparente des graviers .....	38
FigII.A.12 : Mesure de la masse volumique absolue des graviers .....	39
Fig.II.A.13 : Es Visuel et Es à piston .....	40
Fig.II.A.14 : L'essai d'équivalent du sable .....	42
Fig.II.A.15 : Détermination d'affaissement du béton l'état frais .....	43
Fig.II.A.16 : Déversement des matériaux secs dans le malaxeur .....	45
Fig.II.A.17 : Le gâchage des bétons .....	46
Fig.II.A.18 : Epreuve démolées nommées et numérotées .....	46
Fig.II.A.19 : Epreuve conservées dans l'eau.....	46
Fig.II.A.20 : Cycles de chauffage –refroidissement imposés aux éprouvettes .....	47
Fig.II.A.21 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four .....	48
Fig.II.22 : Presse hydraulique AUTO TEST .....	48
Fig.II.A.23 : Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points .....	49

## **Partie B: Interprétation des résultats :**

Fig.II.B.1 : Perte de masse des éprouvettes cylindriques .....	53
Fig.II.B.2 : Perte de masse des éprouvettes prismatiques .....	53
Figure II.B.3 : Résistance en compression des différents bétons étudiés.....	54
Figure II.B.4 : Courbes contrainte – déformation en compression du béton témoin (BT).....	55
Figure II.B.5 : Courbes contrainte – déformation en compression du béton de fibres.....	55
Figure II.B.6 : Courbes contrainte – déformation en compression du béton de fibres plastique PET (BFP) .....	56
Figure II.B.7 : Courbes contrainte – déformation en compression du béton de fibres cocktail (BFMP).....	56
Figure II.B.8 : Courbes contrainte – déformation en compression des bétons étudiés à 20°C .....	57
Figure II.B.9 : Courbes contrainte – déformation en compression des bétons étudiés à 600°C .....	57
Figure II.B.10 : Courbes contrainte – déformation en compression des bétons étudiés à 800°C .....	58

Figure II.B.11 : L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton témoin (BT) à la sortie du four (600°C et 800°C) .....	58
Figure II.B.12 : L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres métalliques (BFM) à la sortie du four (600°C et 800°C).....	59
Figure II.B.13 : L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres plastique (BFP) à la sortie du four(600°C et 800°C) .....	59
Figure II.B.14 : L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres cocktail (BFMP) à la sortie du four (600°C et 800°C).....	59
Figure (II.B.15) : Courbes forces – déplacement du béton témoin (BT) .....	60
Figure (II.B.16) : Courbes forces – déplacement du béton de fibres métalliques (BFM).....	60
Figure (II.B.17) : Courbes forces – déplacement du béton de fibres plastique PET (BFP) .....	61
Figure (II.B.18) : Courbes forces – déplacement du béton de fibres cocktail (BFMP).....	61
Figure II.B.19 : Courbes force – déplacement en flexion des bétons étudiés à 20°C .....	62
Figure II.B.20 : Courbes force – déplacement en flexion des bétons étudiés à 600°C .....	62
Figure II.B.21 : Courbes force – déplacement en flexion des bétons étudiés à 800°C .....	63
Figure (II.B.22) : L'aspect des éprouvettes prismatiques des bétons étudiés à la sortie du four .....	63

## Listes des tableaux :

Tableau II.A.1 : Composition chimique du ciment .....	30
Tableau II.A.2 : Les dimensions et caractéristiques des différentes fibres utilisées .....	32
Tableau II.A.3 : Analyse granulométrique du sable (0/3) .....	34
Tableau II.A.4 : Analyse granulométrique du gravier (3/8) .....	35
Tableau II.A.5 : Analyse granulométrique du gravier (8 /15) .....	35
Tableau II.A.6 : Masses volumiques absolue et apparente des granulats.....	39
Tableau II.A.7:Equivalent du sable (0/3) .....	49
Tableau II.A.8:Valeur d'équivalent du sable .....	42
Tableau II.A.9 :Les résultats d'affaissement du béton .....	43
Tableau II.A.10:Evaluationdel'ouvrabilitéparréférenceàl'affaissement.NF-EN-206/CN.....	43
Tableau II.A.11:Composition finale pour 1m <sup>3</sup> de béton .....	44

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les incendies d'ouvrages en béton ont mis en avant l'impact des températures élevées sur l'endommagement du béton. Les différents exemples d'incendie de tunnels, et de bâtiments montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de morceaux de béton ou par un effondrement total de la structure.

Les constructions doivent respecter plusieurs critères de sécurité vis-à-vis de la protection des personnes, de l'ouvrage, ainsi que de l'environnement lors d'un incendie. Compte tenu de la formulation du béton, les phénomènes qui y ont lieu lors des incendies sont complexes.

D'après de nombreux auteurs, l'instabilité thermique des bétons est due à un effet couplé des processus thermo-hydrique et thermomécanique. Toutefois, les mécanismes exacts régissant le comportement du béton soumis à des feux à développement rapide ne sont pas encore bien connus. Cela résulte principalement du grand nombre de paramètres intervenant.

L'instabilité thermique a pour origine la formation de pression et de contraintes qui se développent dans le matériau chauffé. Les paramètres comme l'eau dans le béton, la perméabilité, la porosité et la nature des granulats ont une influence sur l'instabilité thermique. Une méthode efficace pour réduire le risque d'instabilité thermique est l'ajout des fibres de polypropylène ou de fibres plastique dans la composition du béton. Et afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton, il est nécessaire d'ajouter à ce dernier les fibres métalliques.

### **Objectif de l'étude :**

Le but de ce travail est d'étudier les performances mécaniques d'un béton renforcé de fibres métalliques et fibres plastique (PET) issues de l'industrie de récupération soumis à des cycles de chauffage - refroidissement. Des éprouvettes cylindriques et prismatiques sont utilisées pour des essais de compression et de flexion 3 points. Nous avons étudié les caractéristiques mécaniques des bétons fibrés soumis à des températures de 600 °C et 800 °C. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, courbes et d'histogrammes.

## **Organisation du mémoire:**

Ce présent travail est subdivisé en 02 grandes parties qui sont présentés comme suit :

### **❖ Recherche bibliographique**

**Partie A :** Ce chapitre porte sur la présentation des déchets d'une manière générale et ceux existants dans notre environnement. L'intérêt de la valorisation et recyclage de ces déchets sont plus que nécessaire au vu de leur abondance dans la nature.

**Partie B :** Cette partie est consacré aux bétons soumis à haute température.

### **❖ Partie expérimentale**

**Partie A (Matériaux et méthodes) :** Ce chapitre présente le matériel et les matériaux utilisés pour la réalisation du Protocol Expérimental. Dans ce chapitre nous avons présenté les différents matériaux utilisés pour cette étude, les différents types des bétons étudiés ainsi que les essais effectués au laboratoire.

**Partie B (Interprétation des résultats) :** Dans cette partie, une présentation détaillée et interprétation des différents résultats obtenus lors des différents essais sont présentés sous forme de courbes, de tableaux et d'histogrammes pour une bonne interprétation.

Nous avons terminé ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en évidence les points essentiels de cette recherche.

# PARTIE : A

Les déchets dans le béton

## I.A Généralités sur les déchets

### Introduction

La valorisation des déchets dans le domaine génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité très élevés. Le recyclage des déchets touche des impacts économiques très importants. Donc plusieurs pays du monde utilisent différents déchets dans le domaine de la construction et spécialement dans le ciment ou béton comme poudre, fibres ou agrégats. Ce travail s'intéresse à la valorisation d'un déchet qui est nuisible pour l'environnement vu son caractère encombrant et inesthétique. De nombreux déchets sont générés par des processus de fabrication, des industries de services et des déchets solides municipaux. La sensibilisation croissante à l'environnement a énormément contribué aux préoccupations liées à l'élimination des déchets produits.

La gestion des déchets solides est l'une des principales préoccupations environnementales dans le monde. En raison de la rareté de l'espace pour l'enfouissement des déchets et de son coût toujours croissant, l'utilisation des déchets est devenue une priorité. Et de son coût toujours croissant, l'utilisation des déchets est devenue une alternative attrayante à l'élimination [1].

Dans un contexte de développement de l'économie circulaire, le domaine du Génie Civil, générateur d'un gros volume de déchets, peut se transformer en un secteur parmi les plus producteurs de matériaux alternatifs si la valorisation des déchets générés est développée et encouragée.

Dans ce chapitre, nous parlerons des déchets en général et de leur impact sur l'environnement et l'économie tout en citons quelques déchets utilisés dans le domaine de génie civil.

#### I.A. 1. Définition des déchets

Appelé déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. D'autres variantes existent et la notion de déchet peut être abordée de façon économique, sociale, en fonction de sa nature chimique, etc.

Du point de vue économique, un déchet est un bien qui n'a, à priori, aucune valeur marchande. Sociologiquement, le déchet est le témoin d'une culture et de ses valeurs. Il est le reflet d'une du niveau social des populations et de l'espace dans lequel elles évoluent : zones rurales / urbaines, habitats collectifs / individuels. Actuellement, la définition du déchet n'est pas totalement acceptée par tous. C'est notamment le cas lors des évolutions qu'il pourra subir (opérations de collecte, tri, transformation primaire) et qui lui confère des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques différentes, et de fait, une valeur économique [2].

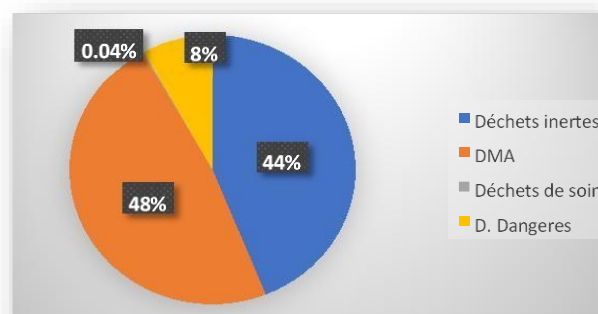
## I.A.2. Etat de l'environnement

L'insalubrité des villes et la prolifération des décharges sauvages constituent l'une des préoccupations majeures des différents acteurs économiques (élus, citoyens, associations, universités...) qui organisent, à cet effet, des séminaires et des colloques pour dénoncer la situation alarmante dont se trouve l'environnement de la wilaya [3]



**Figure I.A.1:** L'état de dégradation de l'environnement de la wilaya de Tizi-Ouzou [3]

Différents types de déchets, Selon leur nature, leur provenance ou encore leur caractère toxique se répartissent en différentes catégories : (-BOURAS ABDELBASSET 2021/2022)



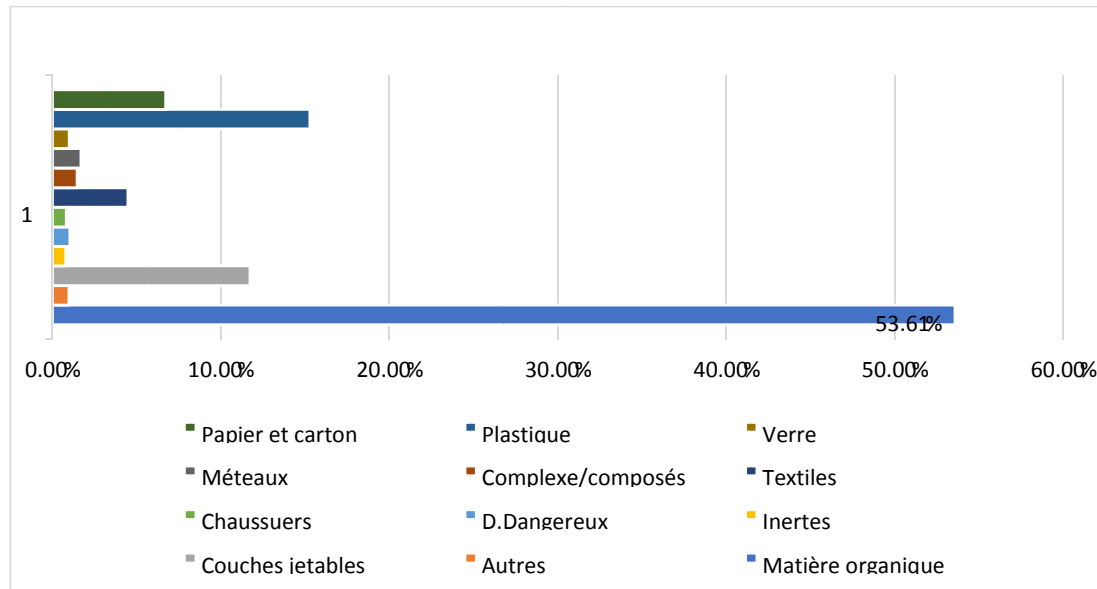
**Figure I.A.2.** Ratio de production de déchets [1]

## I.A.3. Les différents types de déchets

### I.A.3.1. Les déchets ménagers

Les déchets ménagers comprennent différents types de déchets, tels que les ordures ménagères destinées à l'incinération et les déchets recyclables triés. Parmi ces derniers, on retrouve des déchets provenant d'entreprises ou d'industries qui présentent des similitudes avec les déchets

ménagers, tels que les papiers de bureau, les cartons, les emballages, les palettes en bois et les invendus d'un supermarché. Bien que ces déchets soient traités de la même manière que les déchets ménagers, étant donné qu'ils sont produits en grandes quantités, ils sont collectés et traités par des sociétés privées. [1]



**Figure I.A.3:** Composition moyenne annuelle de DMA (Source AND, Année 2018/2019) [4]

### I.A.3.2. Les déchets non dangereux

Les déchets ménagers incluent une variété de catégories, notamment les ordures ménagères destinées à l'incinération et les déchets recyclables triés. Parmi ceux-ci, on trouve des déchets provenant d'entreprises ou d'industries qui présentent des similarités avec les déchets ménagers, tels que les papiers de bureau, les cartons, les emballages, les palettes en bois et les produits invendus des supermarchés. Bien que ces déchets soient traités comme des déchets ménagers, leur production en grandes quantités nécessite qu'ils soient collectés et traités par des sociétés privées. [1]

### I.A.3.3. Les déchets toxiques

Les déchets provenant d'entreprises ou d'industries renferment des substances toxiques telles que des solvants, des vernis, des colles, des goudrons, des huiles et des déchets d'équipements électriques et électroniques. Ces déchets présentent un réel danger pour la santé et l'environnement en raison de leur toxicité. Ils doivent être collectés et traités par des entreprises spécialisées. Les déchets provenant d'activités médicales à risques infectieux nécessitent également un traitement spécifique. [1]

#### I.A.3.4. Les déchets inertes

Les déchets inertes se caractérisent par leur absence de modification physique, chimique ou biologique significative. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ces déchets peuvent être réutilisés en tant que sous-couches pour les routes ou enfouis dans des centres de stockage de déchets. Dans le domaine de la construction, on distingue les déchets provenant des activités de construction, de rénovation et de démolition tels que le béton, les briques, les tuiles, la céramique et le carrelage. Ils englobent également les déchets issus des travaux liés à la réalisation et à l'entretien des ouvrages publics tels que les routes, les ponts et les réseaux. Dans le secteur des travaux publics, les déchets inertes principaux sont constitués de débris minéraux provenant de la démolition d'ouvrages d'art et de génie civil, ainsi que de cailloux et de terre [1]



**Figure I.A.4.**Déchets inertes.[1]

#### I.A.3.5. Les déchets industriels banals (DIB)

Les déchets non dangereux provenant de l'industrie et du commerce regroupent divers types de déchets tels que les emballages, les produits d'entretien et les équipements en fin de vie. Ces déchets, également appelés déchets industriels banals, sont similaires aux déchets ménagers en termes de nature. Ils comprennent notamment :

- ✓ Les bois non traités ou traités avec des produits non dangereux, comme les emballages, les coffrages, les menuiseries et les planchers.
- ✓ Les plastiques tels que le PVC, le polystyrène et le polypropylène, utilisés dans les canalisations, les menuiseries, les revêtements de sol et les emballages.
- ✓ Les métaux ferreux et non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, l'acier et le zinc, provenant notamment des toitures, des matériels électriques, des canalisations et des équipements.

- ✓ Les revêtements muraux et les revêtements de sol textiles.
- ✓ Les produits mélangés provenant de chantiers de réhabilitation.
- ✓ Les peintures, vernis, colles et mastics qui ne contiennent ni solvants organiques, ni substances dangereuses.[1]

#### **I.A.3.6. Les déchets ultimes**

Un déchet ultime est défini comme un déchet qui ne peut plus être traité de manière économiquement viable ou techniquement réalisable par les processus de valorisation ou de réduction de sa pollution ou de sa dangerosité. La classification en tant que déchet ultime dépend davantage du système de collecte et de traitement auquel il est soumis que de ses caractéristiques physico-chimiques.[1]



**Figure I.A.5.**Déchets ultimes. [1]

#### **I.A.4.L'impact des déchets sur l'environnement**

Une gestion inadéquate des déchets contribue au changement climatique et à la pollution de l'air, avec des répercussions directes sur de nombreux écosystèmes et espèces. Les décharges, considérées comme une option de dernier recours dans la hiérarchie des déchets, émettent du méthane, un puissant gaz à effet de serre associé au changement climatique. Le méthane est produit par des micro-organismes qui se développent dans les déchets biodégradables tels que les déchets alimentaires, le papier ou les déchets végétaux présents dans ces décharges. Selon leur conception, les décharges peuvent également entraîner une contamination du sol et de l'eau. [1]

### **I.A.5.L'impact des déchets sur le secteur économique**

Les déchets entraînent une perte économique et constituent un fardeau pour la société. Les ressources (terres, énergie, etc.) utilisées pour extraire, produire, distribuer et consommer un produit sont perdues lorsqu'il est mis au rebut. De plus, la gestion des déchets engendre des coûts considérables. L'établissement d'une infrastructure de collecte, de tri et de recyclage nécessite des investissements importants, mais une fois en place, elle peut générer des revenus et créer des emplois.[1]

### **I.A.6. Types de valorisation des déchets en génie civil**

La valorisation des déchets comprend le recyclage ou toute autre action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie à partir des déchets. Dans le cadre du développement de l'économie circulaire, le secteur du Génie Civil, qui génère une grande quantité de déchets, peut se transformer en l'un des secteurs les plus producteurs de matériaux alternatifs si la valorisation des déchets est encouragée et développée. [5]

### **I.A.7. Les déchets valorisables en génie civil**

#### **I.A.7.1. Les laitiers d'aciérie**

Les laitiers sidérurgiques sont des matières minérales artificielles produites par l'industrie de l'acier. Ils sont considérés comme déchets, ces matériaux sont Co-générés sous forme liquide (à environ 1500°C) en même temps que la fonte sidérurgique (laitier de haut-fourneau) ou l'acier (laitier d'aciérie). Les laitiers de convertisseur (ou de conversion) sont des laitiers d'aciérie obtenus lors de l'affinage de la fonte sidérurgique, alors que les laitiers d'aciérie électrique sont obtenus lors de la fusion de ferrailles.



**Figure I.A.6 : Laitiers d'aciérie [5]**

### I.A.7.2. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des matériaux minéraux finement divisés, issus de la précipitation électrostatique ou mécanique de particules minérales contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Ce sont donc des matériaux pulvérulents, de texture majoritairement vitreuse et de composition silico-alumineuse ou silico-calcique. Les cendres siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques et les cendres calciques peuvent posséder des propriétés hydrauliques et /ou pouzzolaniques. Les cendres volantes sont utilisées soit addition au béton, soit comme constituant principal autre que le clinker dans les ciments et contribuent ainsi à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Elles peuvent être utilisées dans certains ciments de types CEM II, IV, et V. (NF EN 197-1 pour plus de détails). [5]



**Figure I.A.7 :** Cendres volantes.

### I.A.7.3. Les déchets de verre

Indéfiniment sans perdre en qualité. Cependant, s'il n'est pas recyclé, il peut mettre des millénaires à se décomposer. Le verre est un matériau entièrement recyclable et recyclé, il peut être réutilisé. Une tonne de verre permet d'économiser ½ tonne de CO<sub>2</sub> par rapport à la production d'une tonne de verre neuve. Les établissements et services sanitaires, sociaux et médico-sociaux produisent des déchets de verre qui peuvent être divisés en deux catégories : ceux qui présentent un risque infectieux, chimique ou toxique, appelés DASRI, et ceux qui ne présentent aucun de ces risques. Les déchets de verre non dangereux doivent suivre la filière normale de traitement du verre, en étant collectés séparément. [5]



**Figure I.A.8 :** Déchets de verre.

#### **I.A.7.4. Pneus usagés**

Les pneumatiques sont constitués de gomme de caoutchouc (à base de polymère d'isoprène), d'acier, de textiles et d'autres éléments qui renforcent la résistance de la gomme.

Les matériaux cimentaires présentent une faible capacité de déformation et une résistance à la traction limitée, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment en raison du retrait. Par exemple, les dalles, les chaussées et autres éléments de grande surface ont tendance à se fissurer sous l'effet du retrait. L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant l'apparition de fissures visibles. En conséquence, le composite cimentaire contenant des granulats en caoutchouc présente une résistance élevée à la fissuration due au retrait. Les pneus usagés constituent une source de matières premières secondaires, et leur récupération et valorisation sont économiquement impératives pour notre pays [5].



**Figure I.A.9 :** Pneus usagés. [5]

### I.A.7.5. Ciment durci

Le contact direct des sacs de ciment avec l'eau ou l'humidité provoque une cristallisation de poudre, cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence. [5]



Figure I.A.10 : Ciment durci.

### I.A.7.6. Valorisation et recyclage des plastiques

La valorisation des déchets plastiques permet de préserver les ressources qu'ils contiennent, mais elle nécessite des ressources supplémentaires pour assurer le processus de transformation, ce qui peut entraîner des impacts environnementaux et des coûts. Tous les plastiques ne se recyclent pas de la même manière.

Étant donné que les plastiques sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la construction, l'agriculture, l'électroménager, cela se traduit par une augmentation des quantités de déchets plastiques. Il est donc devenu important de recycler et de valoriser ces plastiques. Le recyclage chimique vient compléter le recyclage mécanique en transformant les déchets plastiques en matières premières secondaires.

Lorsque les déchets plastiques sont transformés en granulés plastiques par recyclage mécanique, le recyclage chimique permet de produire de nouvelles matières en modifiant la structure chimique du polymère, ouvrant ainsi de nombreuses possibilités [5].

### I.A.7.7. Déchet de démolition

Les déchets provenant de la démolition et de la construction se divisent en trois grandes catégories : les déchets inertes, les déchets non dangereux (tels que plastiques, métaux, bois,

cartons) et les déchets dangereux. Ces activités génèrent également des déchets spécifiques tels que l'amiante, les plâtres et les déchets contenant du plomb ou du bois traité.

De nos jours, les producteurs de granulats recyclés adoptent une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux en fonction de leur nature :

- Les bétons armés sans enduit ni plâtre,
- Les matériaux composés de briques, tuiles, gravats, pierres, blocs rocheux, etc.
- Les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- Les mauvais matériaux présentant une teneur en bois, plâtre, plastique supérieure à 10%,
- Les autres matériaux qui ne rentrent pas dans les catégories précédentes. [5]



**Figure I.A.11** : Déchets de démolition [5].

### **I.A.8. Déchets plastiques**

Parmi les différents types d'approches de la gestion des déchets, on cite la réutilisation des déchets et des matières plastiques recyclées dans l'industrie de la construction, qui est considérée comme une méthode idéale pour l'élimination des déchets plastique.

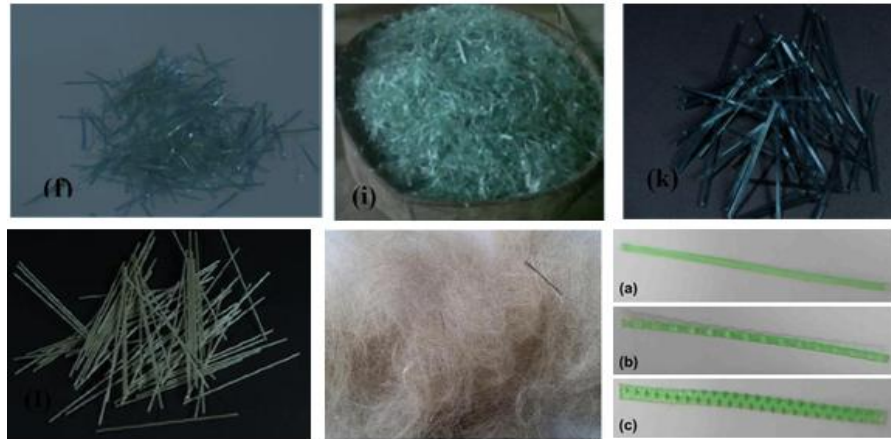


Figure I.A.12 : Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier. [5]

### I.A.8.1. Définition de PET

Le **PET** est l'abréviation de **polyéthylène téréphtalate**, que l'on trouve également avec l'abréviation PETE est un plastique. Chimiquement, c'est le polymère obtenu par la polycondensation de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol. Les molécules sont composées exclusivement d'éléments hydrogène, carbone et oxygène Le PET se présente sous de nombreuses formes : pièces moulées par injections, tubes,

Films d'emballage, fibres, tissus, etc. et est utilisé pour la fabrication de bouteilles en plastiques (BENMEKEDECH-GOUISEM, 2015) [28]



Figure I.A.13 : flacon en PET [28]

### I.A.8.2. Propriétés générales du PET

Le PET est devenu un des polymères les plus industrialisés grâce à ces bonnes propriétés électrique, chimique et physique qui en ont fait un polymère fortement utilisé par les industries du film, des fibres et de l'emballage.

Le PET est un matériau rigide, avec une bonne stabilité dimensionnelle. Il présente de bonnes propriétés barrière et une bonne résistance chimique. Sa cristallinité varie

entre amorphe et relativement cristallin. Il peut être très transparent et incolore, mais les parties épaisses sont le plus souvent opaques et blanchâtres. (BENYACHE, 2016) [28]

#### ❖ Principales Propriétés (Benmekideche-gouissem, 2015) [28]

Le PET possède des caractéristiques spécifiques qui sont :

- ✓ Résistance au bris
- ✓ Étanchéité à l'oxygène et au dioxyde de carbone
- ✓ Stabilité chimique
- ✓ Flexibilité
- ✓ Transparence
- ✓ Résistance thermique
- ✓ Légèreté
- ✓ Durabilité
- ✓ Température de fusion (°C) 245
- ✓ Température de transition vitreuse (°C) 61-77

#### I.A.8.3. Domaines d'application de PET

Le PET a été trouvé dans plusieurs domaines qui dépendent fortement des propriétés moléculaires du PET pour son application. Ainsi, le choix du grade approprié pour une application particulière est déterminé en mesurant la viscosité intrinsèque, dont la valeur est directement liée à la masse moléculaire du matériau et à partir de ces domaines on trouve :

- ✓ **Textiles** : fils textiles, fibres...etc.
- ✓ **Films** : emballage, supports de film photos, ...etc.
- ✓ **Corps creux** : bouteilles pour boisson gazeuses, ...etc.
- ✓ **Automobiles** : ventilateur, alternateur, poignées de pièces pour circuit d'allumage, etc.
- ✓ **Application médicales** : tricot tubulaire pour prothèse vasculaires, prothèse du larynx et de l'œsophage, ...etc.
- ✓ **Technologies de pointe** : supports magnétiques, des outils informatique tels que disquettes bandes vidéo et audio, bandes pour ordinateurs, ...etc.

(Benayache.H, 2016). [29]

**I.A.8.4. Recyclage et valorisation du PET**

Les bouteilles en PET sont produites à partir de dérivés du pétrole. Au niveau mondial, la fabrication de bouteilles en PET requiert chaque année 2,7 millions de tonnes de ce polymère. La nécessité de recycler cette matière est devenue une priorité à cause du coût élevé de la matière première.

**I.A.9. Conclusion**

La démarche Zéro Déchet repose sur les principes de réduction, réutilisation, recyclage et compostage, intégrant ainsi l'économie circulaire. La prise de conscience croissante a entraîné la mise en place de nombreuses restrictions, ce qui a conduit à une augmentation du recyclage et de l'exploitation des déchets.

L'augmentation des déchets ne dépend pas uniquement de la croissance démographique, mais est influencée par de nombreux autres facteurs tels que le niveau de vie, l'absence de lois cadres, le niveau d'éducation, la structure urbaine, les infrastructures de recyclage, le système de collecte et le développement industriel et économique.

# **PARTIE: B**

Béton soumis à haute  
température

## I. B. Béton À Haute Température

### I.B.1. Introduction

Les incendies sont source de dégradations importantes du béton. L'impact des températures élevées sur le comportement du béton est étudié depuis les années 1940. Lors du chauffage du béton, ses constituants subissent diverses transformations qui ont un impact sur ses propriétés mécaniques et minéralogiques.

À la suite des différents incendies survenus durant les dernières décennies, il a été démontré la difficulté d'appréhender le feu et les dégradations survenues. Les dégradations importantes sont caractérisées par un détachement de matière, une perte de résistance mécanique et dans certain cas la mise hors service de l'ouvrage.

Les incendies des tunnels sont les phénomènes les plus redoutés. Ils sont difficiles à combattre à cause du confinement du feu. D'autant plus, la densification du trafic augmente le risque d'incendie, particulièrement les camions et les poids lourds et surtout ceux transportant des produits inflammables. Les incendies dans les bâtiments ou autres ouvrages d'arts sont beaucoup plus fréquents que les incendies dans les tunnels. L'incendie dans un bâtiment a un caractère moins sévère car il se trouve cloisonnés et l'intervention des secours est assez rapide. De ce fait, il y aura moins de répercussion sur la structure en béton. Selon l'étude de Malhotra [6], sur 100 incendies, l'instabilité thermique de la structure du béton est conclue dans 80 cas. Cependant, les instabilités thermiques du béton n'aboutissent pas forcément à la ruine de la structure. La figure (I.B.1) nous présente quelques incendies dans les tunnels et l'état de la structure d'un bâtiment et d'un pont à la suite d'un incendie.



**Figure I.B.1:** Exemples des détériorations à la suite d'incendies.

## I.B.2. Comportement du béton à la haute température

### I.B.2.a. Transformations de la matrice cimentaire

La température engendre de fortes dégradations de la microstructure du béton par les modifications subies à la matrice cimentaire et aux granulats.

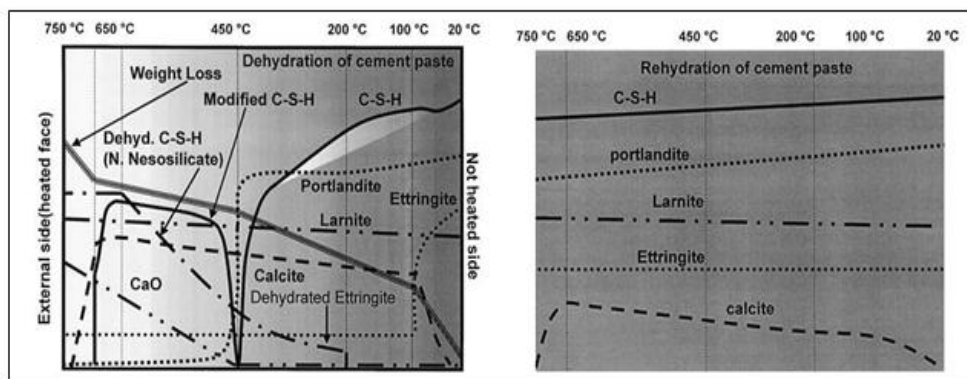
Comme évoqué au premier chapitre, la pâte de ciment ordinaire hydratée contient en moyenne 50 à 70 % de C-S-H et de 25 à 27 % de Portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , le reste étant constitué d'ettringite, de monosulfoaluminate, d'aluminates calciques hydratés et de quelques grains de ciment anhydre.

Les principales transformations des composants dans la matrice cimentaire avec l'augmentation de la température ont été étudiées par plusieurs auteurs [7] [8][9]

1. **Jusqu'à 120°C**, l'eau libre est l'eau adsorbée s'échappent du béton d'une façon marquée à 100°C [65]. L'eau non liée est complètement éliminée à 120°C
2. **Entre 70 et 80°C**, l'ettringite ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), se décompose et entraîne une baisse de sa concentration dans la matrice cimentaire [7] [8]
3. **Entre 130°C et 170°C**, la décomposition du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) provoque une double réaction endothermique [11].
4. **Autours de 180°C et jusqu'à environ 300°C**, les molécules d'eau sont arrachées à certains calcium de silicate hydraté (C-S-H) [8] [7]. C'est la première phase de déshydratation du C-S-H. Cela caractérise l'échappement de l'eau liée chimiquement.
5. **Entre 250 et 370°C**, on observe une coloration rosée de certains granulats due à l'oxydation des composés contenant du fer, qui a lieu aux alentours de 300°C. Cette oxydation est accompagnée par des petits piques endothermiques provoqués par la réaction. Parallèlement, la perte d'eau liée dans la matrice cimentaire et les dégradations conséquentes deviennent plus significatives.
6. **Entre 450 et 550°C**, il se produit la décomposition de la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  en chaux libre (CaO) en libérant de l'eau [10].  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .  
Aussi sur ces températures, on observe la coloration rosée des granulats qui devient plus intense, sauf pour les silex qui se calcinent entre 250°C et 450°C et par conséquent prennent une coloration blanche-grise.
7. **A 573°C**, il se produit une transformation du quartz de la phase  $\alpha$ -quartz à la phase  $\beta$ quartz. Cette transformation est accompagnée d'une augmentation jusqu'à 5% du volume du quartz. Cela induit l'apparition de fissures autour des grains de quartz. En revanche, les granulats en silex observent une décomposition des silanols (SiOH) entre la température de 400 et 570°C [12].

8. **Entre 600°C et 700°C**, une deuxième phase de déshydratation du C-S-H se produit. Cette réaction produit une nouvelle forme de silicates, silicate bi-calciq (βC<sub>2</sub>S). Elle est accompagnée par un dégagement des molécules d'eau [10].
9. **Autour de 800°C**, il a lieu la décarbonatation du carbonate de calcium:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . C'est une réaction qui est fortement endothermique qui libère du gaz carbonique [7].
10. **Entre 800 et 1200°C**, la désintégration complète des composés calcaires dans les granulats et la matrice cimentaire, causé à la fois aux phénomènes de dissociation et à la contrainte thermique, produit le blanchiment du béton et l'apparition de sévères fissures. Les granulats calcaires deviennent blanches.
11. **A 1200°C**, le béton commence à fondre.
12. **A partir de 1300-1400°C** a lieu le début de la fusion de la pâte de ciment.

Selon les observations d'Alonso et Fernandez [7], au cours du refroidissement du béton une nouvelle formation de Portlandite se produit et un processus de réhydratation des silicates conduit à la formation de nouveaux C-S-H. Les travaux menés par Alonso [7] ont été réalisés par un processus de déshydratations et de réhydratation de la pâte de ciment soumise à différents cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de 1°C/min. La figure(I.B.2) montre l'évolution des composants de la matrice en phase de chauffage et de refroidissement.



**Figure I.B.2:** Processus de déshydratation/réhydratation de la pâte de ciment exposée à haute température [7].

Sur la Figure (I.A.2), on observe une disparition complète de l'ettringite avant la température de 100°C. Le C-S-H se déshydrate progressivement avec la montée de température jusqu'à 400°C. Tandis que la Portlandite observe une légère augmentation à 100°C suivi d'une

stagnation jusqu'à 450°C pour une chute importante de sa concentration jusqu'à 600°C. Cette chute de Portlandite est accompagnée par la formation du CaO.

### **I.B.2.b. Transformations des granulats**

Selon le type de granulat, la haute température modifie ses caractéristiques minéralogiques. Ils se décomposent et subissent des modifications physico-chimiques et minéralogiques significatives.

Les granulats siliceux ne réagissent pas avec la pâte de ciment et ne développent pas de liaisons importantes avec la matrice cimentaire. Ils sont considérés comme neutres. Les granulats de quartzite présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. A partir de 573°C, une transformation du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  s'accompagne d'une forte dilatation de 1 % à 5 % [13]. Cette transformation peut provoquer un gonflement ou un éclatement du granulat. Aussi, l'éclatement a été observé pour des granulats de silex entre 110°C et 450°C [12]. Cette réaction à la chaleur est la conséquence de la présence d'eau piégée dans les micropores d'eau provenant de la déshydroxylation des groupes silanes du quartz cryptocristallin.

A contrario, Les granulats calcaires sont considérés comme réactifs. Ils développent de fortes liaisons avec la pâte de ciment. Ce sont des granulats qui présentent un comportement stable jusqu'à une température de 600°C. A partir de 600°C, les granulats présentent une décarbonatation de la calcite :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La formation de cette nouvelle Portlandite avec un volume supérieur à celui du granulat initial crée des nouvelles fissures dans le béton [7].

### **I.B.2.c Déformation thermique libre**

Le béton étant constitué de granulats et de pâte de ciment, la déformation thermique de chaque partie et leurs interactions conditionnent l'endommagement du matériau.

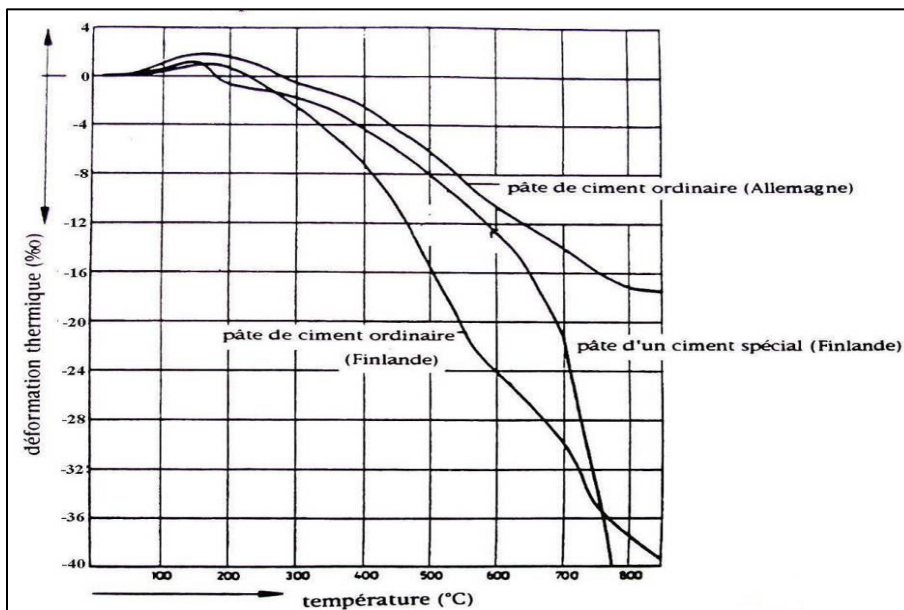
#### **❖ La déformation thermique de la pâte de ciment :**

L'analyse de la déformation thermique de la pâte de ciment démontre qu'elle se décompose en deux phases. [14] [15]

❖ **Première phase :** Une expansion est observée jusqu'à 150°C. Cette phase de dilatation est attribuée aux mouvements de l'eau et à la dilatation volumique des molécules d'eau. Aussi, la réduction des forces capillaires de l'eau du fait de l'augmentation de la température influe sur l'expansion.

❖ **Deuxième phase :** la pâte de ciment subit un retrait au-delà de 150°C et il devient très important une fois la température de 300°C dépassée. Le retrait est lié au départ de l'eau contenue dans le matériau.

Diederrichs [15] ont étudié la déformation de trois pâtes de ciment différentes (Figure I.B.3) et ils ont constaté que la nature de la pâte n'a pas grande influence sur la déformation thermique.



**Figure I.B.3:** Déformation thermique des pâtes de ciment [15].

La vitesse de chauffage a une influence sur la température de changement de comportement de la pâte de ciment [16]. Avec une vitesse de chauffage de moins de 10°C/min, la température de changement de comportement est autour de 150°C à 200°C. Alors qu'avec une vitesse de 35°C/min, la température de changement de comportement avoisine 300°C, rapporté par [16]. Tandis que les vitesses utilisées par Hager [45], de 0.5°C/min et 1°C/min, conduisent respectivement à des températures de changement de comportement entre 225°C et 300°C. Plusieurs facteurs peuvent influencer cette température de comportement comme l'humidité relative de la pâte de ciment.

#### ❖ Déformation thermique des granulats

Les granulats réagissent différemment à l'augmentation de la température que la pâte de ciment. L'expansion thermique dépend de la nature minéralogique des granulats, notamment de leur teneur en silice. Le granulat calcaire a un coefficient d'expansion thermique plus faible que celui du granulat de nature siliceuse mais plus important que le granulat de basalte [17], [18], [19], [9]

a comparé dans son étude les déformations thermiques de la pâte de ciment à celle du béton contenant des granulats d'origine diverses.

### I.B.3.1 Evolution des Propriétés mécaniques

Les changements structurels et les déformations engendrées au béton par la montée de température affectent grandement ses propriétés mécaniques. La résistance à la compression et à la traction du béton se voient modifiées et le module d'élasticité affecté. Ces propriétés mécaniques sont étudiées à chaud ou après refroidissement. Les études de la résistance mécanique du béton à chaud permettent d'évaluer le comportement en cours d'un incendie. En revanche, les études après refroidissement du béton, résistance résiduelle, permettent d'indiquer les propriétés mécaniques « post-incendie ». Cela permet d'évaluer la capacité portante résiduelle de l'ouvrage et sa robustesse. Ainsi, la possibilité de réparation pourra être étudiée.

#### ➤ Résistance à la compression:

L'évolution de la résistance à la compression au moment de l'exposition à la température se dénomme la résistance à chaud. La résistance à la compression à chaud a été étudiée par différents auteurs. Hager [16] a étudié la résistance à chaud sur différentes compositions du béton avec un rapport E/C de 0.3, 0.4 et 0.5. La résistance à chaud en compression en fonction de la température permet de diviser l'évolution en trois phases (Figure I.B.4).

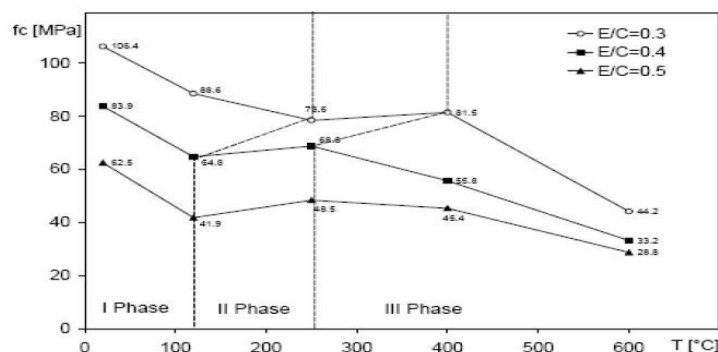


Figure I.B.4: Résistance en compression à chaud de béton à différentes températures [16].

➤ **La première phase, de 0°C à 100°C:** chute de la résistance de 20 à 30%.

➤ **La deuxième phase, de 100°C à 250°C:** elle est caractérisée par une chute de résistance moins importante que celle enregistrée à 100°C. En revanche, l'augmentation de la résistance du béton avec un faible E/C (BHP) est observée aux environs de 400°C. Cette augmentation retardée a été constatée par d'autres auteurs [20].

➤ **La troisième phase, au-delà de 400°C pour le BHP et 250°C pour les autres bétons**, elle est caractérisée par une chute de résistance monotone.

Les premières fissures liées à la déformation différentielle entre les granulats et la pâte sont observées dans cette phase.

➤ **Résistance à la traction**

Nguyen [22] a fait une étude comparative des résultats des essais de résistance à la traction résiduelle par fendage de différentes études sur le béton ordinaire et le béton haute performance [10], [21], [20]

L'étude comparative est représentée dans la figure (I.B.5) Une baisse légère de résistance à la traction est observée jusqu'à la température 350°C. Au-delà de 350°C, une chute de résistance plus importante est constatée.

Les bétons à faible rapport E/C présentent une baisse plus significative de résistance à la traction que les bétons à rapport E/C élevé dès la température 150°C [20].

L'influence du type de granulats sur la résistance résiduelle à la traction est similaire à son influence sur la résistance résiduelle à la compression [12]. Entre 300°C et 600°C, les bétons avec des granulats siliceux ou de silex présentent des pertes de résistance plus importante que le béton avec des granulats de calcaire. Au-delà de 600°C, la perte de la résistance résiduelle à la traction est plus importante pour le béton avec des granulats à calcaire. Cela est liée à la décarbonatation.

L'étude de Pliya 2010, conclue à une amélioration de la résistance en traction des bétons contenant de la fibre polypropylène. Il attribue cette amélioration de résistance à la traction à la fusion du polypropylène qui remplit les pores du béton et se resolidifie durant la phase de refroidissement. Ainsi, les forces de contact et les liaisons entre les différents grains s'améliorent. Avec le béton à hautes performances, les fibres fondues se diffusent moins dans la matrice cimentaire du fait de sa forte densité. Après le chauffage à 600°C, les résistances résiduelles à la traction des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont presque les mêmes.

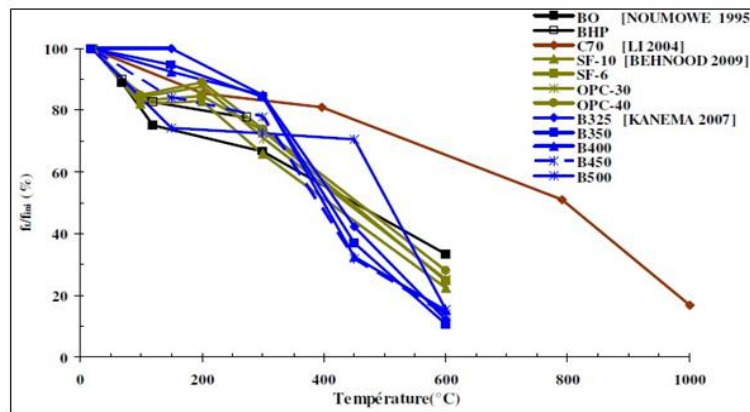


Figure I.B.5: Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des BO et BHP [22].

### I.B.3.2. Module d'élasticité

Il existe très peu d'études réalisées sur l'évaluation du module d'élasticité du béton à chaud. Cependant, de nombreuses études se sont intéressées à l'évaluation du module d'élasticité après son exposition à la haute température, module d'élasticité résiduelle. Nguyen [23] a réuni les résultats de l'évolution du module d'élasticité résiduelle obtenue sur différentes études [23], [20] et [26]. L'évolution en fonction de la température du module d'élasticité résiduelle relatif des différentes études sont exposés dans la figure (I.B.6). On constate que le module d'élasticité résiduel diminue en fonction de la température d'une manière progressive. Cette diminution est similaire pour les types de béton étudiés (BO, BHP et BAP) et cela même avec différents rapports Eau/Liant. De ce fait, le type de béton n'a pas grande influence sur l'évolution de la rigidité du béton [20] et [16]. La rigidité observée après traitement à 600°C est presque nulle. Elle est de 2% pour l'étude de Kenema [20]. Cette forte chute est liée aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire, à la déformation des granulats avec l'interface pâte-granulats et à l'augmentation du volume poreux [16] et [10].

La nature des granulats utilisée dans la composition du béton présente une influence sur l'évolution du module d'élasticité résiduelle [12], [24] et [19]. Le béton avec des granulats calcaire présente une chute de la valeur du module d'élasticité plus faible que celui du béton avec des granulats à base de quartzite [19] et à base siliceux et silico-calcaire [12]. Cependant, il n'y a pas de différence notable entre les modules d'élasticité résiduelle du béton ordinaire et du béton haute performances contenant des granulats calcaires ou siliceux

Le module de l'élasticité résiduelle contenant des fibres polypropylènes baisse avec l'augmentation de la température d'exposition [25]. Cela malgré que l'ajout de fibres polypropylènes à un effet bénéfique sur la stabilité du béton à haute température. Cette diminution est plus importante avec l'augmentation du dosage de fibres polypropylène utilisées [25]. Cela est dû aux vides laissés dans la matrice du béton après évaporation des fibres.

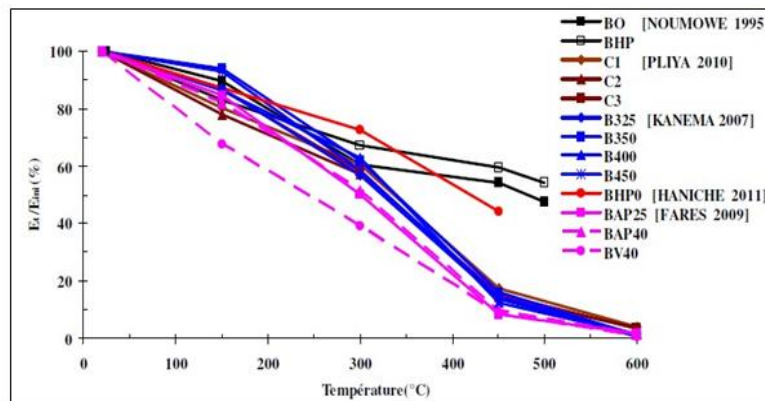


Figure I.B.6 : Evolution du module d'élasticité résiduel relatif [22].

### I.B.3.3. Evolution des propriétés physiques

#### I.B.3.3.1. Perte de masse

La perte de masse se caractérise par la perte de matière sous forme solide ou de gaz avec l'augmentation de la température. La principale cause de la perte de masse du béton avant 600°C est le départ de l'eau. Hager [16] a étudié la perte de masse en fonction de la température du BO et du BHP, notés respectivement M30C et M100C. La courbe d'évolution de la perte de masse est représentée dans la figure (I.B.7). Elle peut être divisée en trois phases :

➤ **De la température ambiante jusqu'à 100°C ou 150°C** une faible variation de la masse est constatée. Cette variation est due au départ de l'eau libre des capillaires [Mali, 1982], [10]. Sur cette phase, la perte de masse est plus importante avec un E/C élevée.

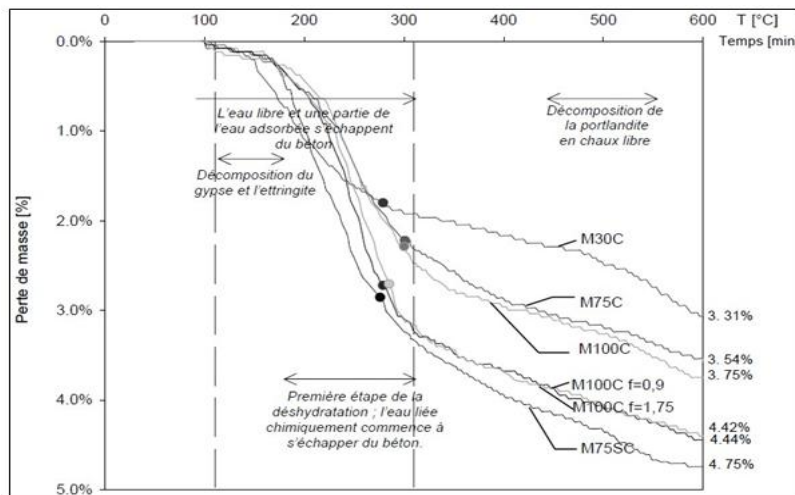
Cela est observé sur la (Figure I.B.7) [16] entre le BO et le BHP, E/C plus faible.

➤ **De 150°C à 300°C**, on observe une perte de masse beaucoup plus rapide. Cette perte est caractérisée par le départ de l'eau liée dans les hydrates. Cela est constaté principalement à la première phase de déshydratation du gel C-S-H et à la décomposition du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [10], [45]. Jusqu'à 300°C, le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale [20].

➤ **Au-delà de 300°C**, la perte de masse est moins importante que la phase précédente.

Cela correspond à :

- La déshydratation de la Portlandite entre 450°C et 550°C,
- La décomposition des silanols ( $\text{SiOH}$ ) du silice entre 400°C et 570°C,
- La décarbonatation du calcaire  $\text{CaCO}_3$  entre 600°C et 800°C [12], et [11].



**Figure I.B.7:** Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons [16].

Plusieurs études observent que la perte de masse du BHP est toujours inférieure à celle du BO [12], [20], [16]. Cela est lié à la quantité d'eau utilisée dans la composition du béton. Plus la quantité d'eau est importante plus la perte de masse est conséquente. Cependant, la vitesse de chauffage a un effet important sur la perte de masse. On observe une perte de masse plus importante avec un chauffage de  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  qu'avec  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , particulièrement entre  $100^{\circ}\text{C}$  et  $300^{\circ}\text{C}$  [20].

### I.B.3.3.2.Porosité

#### ➤ La porosité à l'eau

La porosité à l'eau permet de quantifier le volume des pores avec un diamètre entre 0.1 mm et 2.5 mm accessible à l'eau par le réseau capillaire de la structure du béton. La porosité augmente en fonction de température pour tout type de béton [10]. L'augmentation de la porosité se décompose en deux phases :

➤ **De la température ambiante jusqu'à  $300^{\circ}\text{C}$** , une croissance de la porosité relativement similaire est observée pour différents types de béton (BO, BHP), augmentation de 16% (Figure I.B.8).

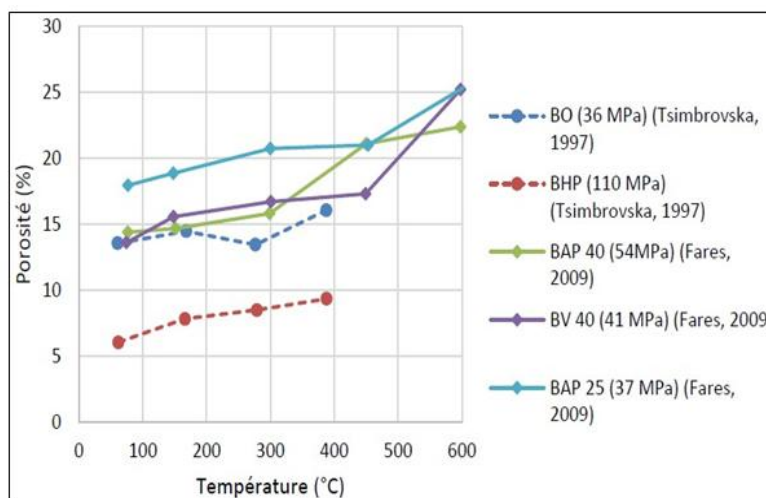
Certains auteurs [9] observent dans cette phase une porosité stable ou qui décroît légèrement. Certains auteurs attribuent un tel phénomène à la recristallisation de la chaux amorphe

➤ **Au-delà de  $300^{\circ}\text{C}$** , la porosité du BO augmente d'une façon plus significative que le BHP. De la (figure I.B.8) on observe une augmentation de la porosité de 34% alors que l'augmentation de la porosité du BHP est de 20%. Cette forte croissance de la porosité est attribuée à l'ouverture

des microfissures engendrées par la dilatation différentielle pâte–granulat. Cette dilatation est causée par le départ d'une grande partie de l'eau liée.

La perte d'eau localisée entre les feuillettes des hydrates induit un retrait et réduit ainsi le volume de l'espace libéré par l'eau entre les feuillettes. On note sur la (figure I.B.8) l'évolution de la porosité en fonction de la température de différents types de béton.

L'addition de fibres propylènes contribue à l'augmentation de la porosité avec la température. L'accroissement de la porosité évolue avec la quantité de fibres polypropylènes ajoutées. Tandis que l'addition de fibres métalliques n'a peu d'effet sur la porosité accessible à l'eau [23].



**Figure I.B.8:** Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température [27].

### I.B.3.3.3. Formes d'endommagement thermique

On distingue deux **modes d'endommagement** thermique:

- **L'écaillage**, appelé aussi « progressive spalling ». C'est un phénomène caractérisé par une perte progressive de matière qui correspond à un détachement de matière graduel et répétitif.
- **L'éclatement**, appelé aussi « explosif spalling ». C'est un phénomène caractérisé par la perte brutale de matière accompagné d'un fort bruit. Les morceaux détachés sont volumineux et peuvent engendrer la perte de capacité portante de la structure.

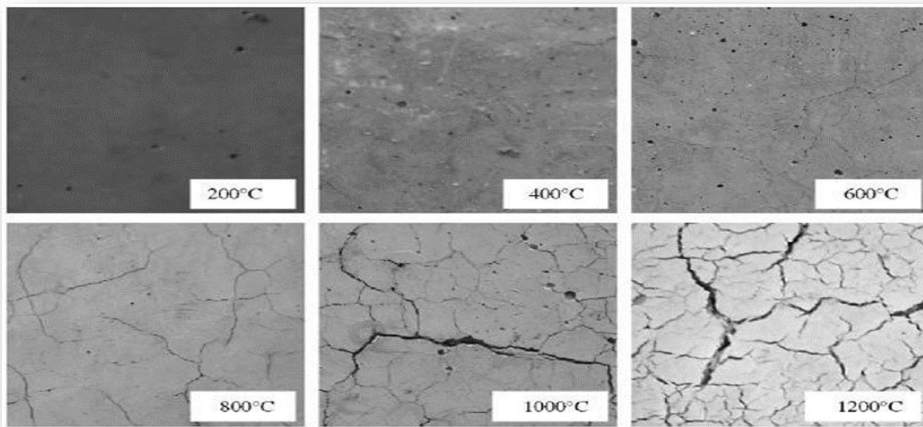
Ces deux modes d'endommagement sont appelés « spalling ». Ils apparaissent dans les endroits non isolés et exposés à la chaleur du feu.

L'instabilité thermique du béton se présente au-delà d'une certaine température sous diverses **formes** (Jansson 2004) :

- **Eclatement de granulats**, appelé aussi « aggregate spalling ». Il est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface exposée à la haute température. Les

principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz- $\alpha$  au quartz- $\beta$  à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement des granulats sont que superficiels.

- **Eclatement de surface**, appelé aussi « area spalling ». C'est un éclatement discoïdal violent, probablement causé par la migration d'eau. Il est caractérisé par le détachement de petits morceaux du parement exposé au feu, de taille jusqu'à 20 mm environ.
- **Eclatement d'angle**, appelé aussi « corner spalling ». Il est constaté dans les stades avancés du feu. Le béton se trouve affaibli et les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et extrémités de l'ouvrage.
- **Eclatement explosif (explosif spalling)**. C'est un éclatement très violent qui se produit généralement dans les 30 premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température dépassant 100°C. Il se caractérise par une perte brutale de petits ou gros



morceaux de béton pouvant causer une perte de résistance.

**Figure I.B.9** :Etat de surface et fissures des bétons avec différents températures [14].

# **Chapitre II**

## Partie expérimentale

# **Partie : A**

## Matériaux et méthodes

## Introduction

Suite à l'étude bibliographique sur le béton de manière générale ; nous présentons dans cette partie toutes les étapes du Protocole expérimental réalisé au sein du laboratoire de Génie Civil de la faculté du Génie de la Construction à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi - Ouzou.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des fibres plastique PET, des fibres métalliques et des fibres cocktail (mélange de fibres plastique PET et fibres métalliques) sur le comportement du béton porté à une température élevée. Nous avons confectionné plusieurs éprouvettes de béton.

Les propriétés physiques et mécaniques sont déterminées à la température ambiante et après différents cycles de chauffage – refroidissement.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques de tous les matériaux utilisés pour la confection de nos bétons, leurs compositions et le dispositif expérimental utilisé.

### II.A.1. Matériaux utilisés :

#### II.A.1.1. Types d'éprouvettes utilisées

Dans ce programme expérimental, deux types de moules ont été utilisés :

- ❖ **Les éprouvettes de forme cylindrique** normalisées et d'élancement 2 (10×20) cm norme NF P 18-400, NA 2600) utilisées pour la détermination des résistances à la compression.



Figure II.A.1 Moules cylindriques.

- ❖ Les éprouvettes prismatiques normalisées (NF P18-400, NA2600) de dimensions  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$  pour la détermination des résistances à la flexion.



Figure II.A .2 : Moules prismatiques.

72 éprouvettes (prismatiques et cylindriques) ont été confectionnées pour l'achèvement des objectifs de ce travail. Tous les moules ont été huilés pour faciliter le démoulage des éprouvettes.



Figure II.A.3 : Epreuve décoffré.

### II.A.1.2. Ciment

Le ciment utilisé pour la confection de nos éprouvettes est une matière pulvérulente, à base de silicate aluminé de chaux, de type CPJ-CEMII/B de la classe 42,5. Il est stocké au laboratoire à température ambiante et recouvert d'un sac en plastique pour éviter toute pré-hydratation éventuelle. Sa composition chimique est donnée dans le tableau (II.A .1)



Figure II.A.4 : Le ciment.

Tableau II.A.1 : Composition chimique du ciment.

Minéraux	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl
<b>Ciment (%)</b>	23.45	4.86	3.2	60.8	1	2.2	/	0.1	0.45	0.05

### II.A.1.3. L'eau

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet, cette eau doit être très propre (eau potable).

### II.A.1.4. Les granulats

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures roulé(3/8, 8/15). Leur diamètre varie de 3 à 15mm, ils ont été lavés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24 heures et conservés dans des bacs après dans des sacs à l'intérieur du laboratoire (granulats sec et propres).



Figure II.A.5 : Les granulats utilisés.

### II.A.1.5. Le sable

Le sable utilisé pour le mélange provient de l'oued, de diamètre maximum égal à 0,3 mm. Il est lavé pour réduire les impuretés puis séché à l'étuve à température 105°C pendant 24 heures.



**Figure II.A.6 :** Le sable utilisé.

### **II.A.1.6. Les adjuvants :**

Les adjuvants pour béton fibre sont des substances ajoutées au mélange de béton contenant des fibres pour améliorer certaines propriétés du matériau. Les fibres de renforcement sont souvent utilisées pour améliorer la résistance à la traction et la résistance aux fissures du béton. Les adjuvants peuvent aider à optimiser la dispersion et l'ancrage des fibres dans la matrice de béton, améliorant ainsi l'efficacité de renforcement.

- L'incorporation des fibres dans le béton diminue considérablement la maniabilité du mélange, l'utilisation d'un super-plastifiant permet d'augmenter l'ouvrabilité du béton en diminuant la porosité du matériau.
- Pour les essais de laboratoire nous avons utilisé un plastifiant commercialisé sous le nom Sikaplast BV 40+.

### **II.A.1.7. Les fibres**

#### **II.A.1.7.1. Fibres plastique PET :**

PET est l'abréviation des termes polyéthylène téréphtalate. Ce plastique particulier est fait de molécules composées exclusivement d'éléments hydrogène, carbone et oxygène. Il existe 3 types de PET : le PET-A, le PET-G et le PET-C.

Nous avons utilisé les fibres de Bouteilles d'eau PET-C, découpées sous la forme de bande de 50 mm de long de 4 mm de large.



**Figure II.A.7 :** Fibres plastiques PET.

### II.A.1.7.2. Les fibres métalliques :

Nous avons utilisé les fibres métalliques afin d'améliorer le comportement mécanique de notre béton. Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture. Nous avons utilisé des fibres métalliques ondulées.



**Figure II.A.8 :** Les fibres métalliques utilisées.

Les caractéristiques et les dimensions des différentes fibres sont données dans le tableau (III.2)

**Tableau II.A.2 :** Les dimensions et caractéristiques des différentes fibres utilisées.

Dimensions	Longueur [mm]	Largueur [mm]	Epaisseur [mm]	Densité [g/cm <sup>3</sup> ]
Fibres plastique PET	50	4	0,5	1,34
Fibres métalliques	50	4	1	7,9

### II.A.1.8. Équipements utilisés

Dans le programme expérimental nous avons utilisé:

- Une balance.

- Un malaxeur.
- Une table vibrante.
- Le cône d'Abrams pour mesurer l'affaissement.

## II.A.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat.

Une fois les matériaux lavés ils sont séchés à l'étuve à température de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du haut de la colonne vers le bas. Dans la partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle est disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appelle tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

-Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. La norme actuelle (EN 933-2) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm) : 0.063, 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125.

Nous avons utilisé pour l'analyse granulométrique la série de tamis suivante en (mm) pour chaque échantillon :

- **SABLE (0.3)** : 3.15, 2, 1.25, 0.5, 0.315, 0.16, 0.125, FT.
- **GRAVIER (3 /8)** : 10, 8, 6.3, 5, 3.15, 2, FT.
- **GRAVIER (8/15)** : 20, 16, 12.5, 10, 8, 6.3, FT.

- Un échantillon de 2500 g pour chaque matériau.
- Une balance pesant au gramme près
- Une étuve thermostat.
- Un vibrotamis électrique.



Figure II.A.9 : Vibrotamis électrique.

## ❖ Analyse granulométrique :

Tableau II.A.3 : Analyse granulométrique du sable (0/3).

Dimension des tamis [mm]	Refus[g]	Refus cumules [g]	Refus cumules [%]	Tamisât [%]
5	0	0	0	100
3.15	160	160	6.4	93.6
2	295	455	18.2	81.8
1.25	750	1205	48.2	51.8
0.5	490	1995	67.8	35.2
0.315	270	1965	78.6	21.4
0.16	300	2265	90.6	9.4
0.125	65	2330	93.2	6.8
Fond de tamis	170	2500	100	0

**Tableau II.A.4** : Analyse granulométrique du gravier (3/8).

<b>Dimension des tamis [mm]</b>	<b>Refus [g]</b>	<b>Refus cumulés[g]</b>	<b>Refus cumulés[%]</b>	<b>Tamisât [%]</b>
10	0	0	0	100
8	50	50	2	98
6.3	555	605	24.4	75.8
5	800	1405	56.2	43.8
3.15	790	2195	87.8	12.2
2	150	2345	93.8	6.2
Fond de tamis	155	2500	100	0

**Tableau II.A.5** : Analyse granulométrique du gravier(8 /15).

<b>Dimension Des tamis [mm]</b>	<b>Reus[g]</b>	<b>Refus cumulés [g]</b>	<b>Refuscumulés [%]</b>	<b>Tamisât [%]</b>
20	0	0	0	100
16	90	90	3.6	96.4
12.5	765	855	34.2	65.8
10	750	1605	64.2	35.8
8	635	2240	89.6	10.4
6.3	230	1470	98.8	1.2
Fond de tamis	30	2500	100	0

Les courbes granulométriques pour chaque type de granulats sont présentées sur la figure (II.A.10).

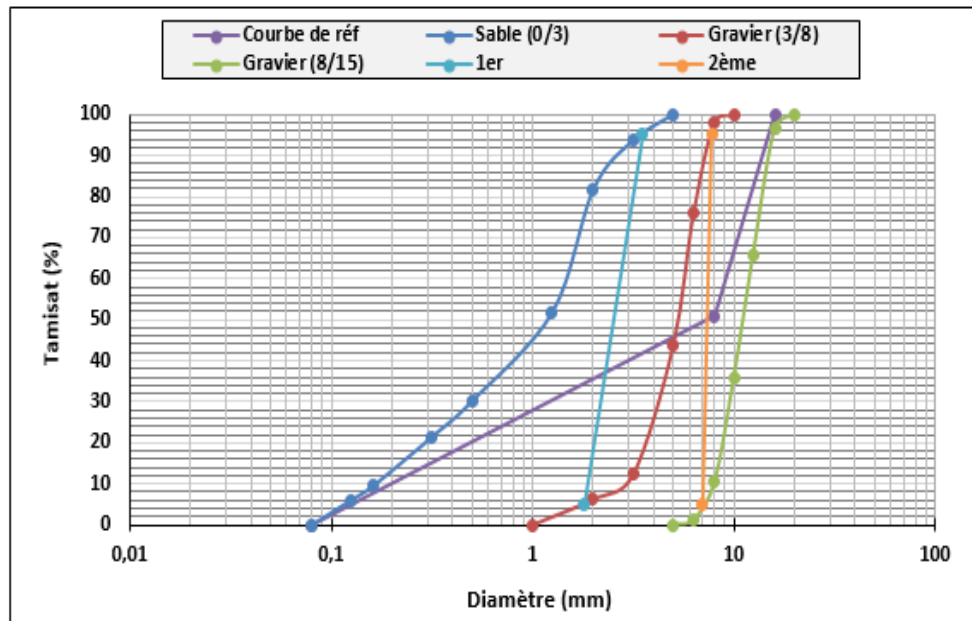


Figure II.A.10: Courbes Granulométriques.

#### II.A.4. Module de finesse :

En résumé, le module de finesse est un paramètre utilisé pour évaluer la granulométrie des granulats dans le domaine de la construction. Il est calculé à partir des résultats de l'analyse granulométrique et fournit une mesure globale de la distribution des tailles de particules. Il est utilisé pour optimiser les proportions de granulats dans la fabrication du béton afin d'atteindre les propriétés souhaitées. Dans le tableau (II.A.1), la somme des refus nous donne 2500g.

Le module de finesse se calcule comme étant le un centième de la somme des refus cumulés sur les tamis de modules : 23.26.29.32.35.38 selon la norme française [NFP18-540], correspondant à la somme des refus cumulés (Exprimés en pourcentage) sur les dimensions des tamis suivant : 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5

Ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de composition des bétons.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable

- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier:  $2,8 < MF < 3,2$
- Un module de finesse moyen correspond à un sable préférentielle  $2,2 < MF < 2,8$
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin  $1,8 < MF < 2,2$

La valeur du module de finesse dépend sur tout de la teneur en grains du fins sable.

$$Mf = \frac{\sum \text{refus cumulés}\%}{100}$$

$$Mf = \frac{90.6 + 78.6 + 61 + 48.2 + 12 + 0}{100}$$

MF=2.8 on déduit que notre sable est un sable grossier

2.8 < MF < 3.2    Donc    2.8 < 2.9 < 3.2

## II.A.5. Masse volumique apparente et absolue

### ➤ Masse volumique apparente

La masse volumique apparente, également appelée densité apparente, est une mesure de la masse d'un matériau par unité de volume, incluant à la fois la masse des particules constitutives du matériau et les vides ou les pores qu'il contient.

**La formule générale pour calculer la masse volumique apparente est la suivante :**

$\text{Masse volumique apparente} = (\text{Masse totale du matériau}) / (\text{Volume total du matériau})$
--

La masse volumique apparente est donnée par :

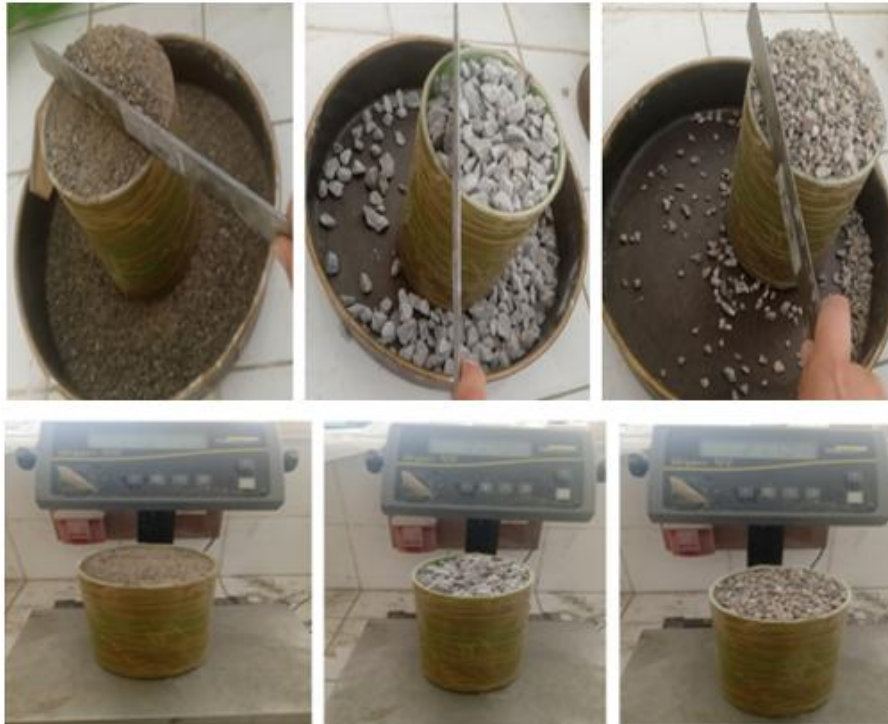
$$p_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad \text{En g/cm}^3$$

M<sub>1</sub> : Masse du récipient

M<sub>2</sub> : Masse du récipient rempli

V : Volume du récipient

Par définition la masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis à l'aide d'un récipient de 1 dm<sup>3</sup> en versant lentement le sable entre les 2 mains à 10 cm au-dessus du récipient puis en rasé à la règle. Le contenu est pesé. Elle est comprise entre 1 400 kg/m<sup>3</sup> et 1 600 kg/m<sup>3</sup> pour les granulats roulés silico-calcaires. Elle est définie par le rapport entre la masse du matériau sec sur son volume total. Les résultats sont présentés dans le tableau (II.A.5).



**Figure II.A.11** : Mesure de la masse volumique apparente des gravi

➤ **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. Elle est comprise entre 2500 à 2600 kg/m<sup>3</sup> pour les granulats roulés silico-calcaires. Elle est définie par le rapport entre la masse du matériau sec sur son volume absolu.

La masse volumique absolue est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{abs}} = \frac{P_3 - P_1}{(P_2 - P_1) - (P_4 - P_3)}$$

P1 : Pycnomètre vide.

P2 : 1L+ masse de pycnomètre vide.

P3 : Masse de pycnomètre + masse de (sable, gravie 3 /8, gravie 8/15)

P4 : Masse de pycnomètre + masse de sable + eau.



**Figure II.A.12 :** Mesure de la masse volumique absolue des graviers.

➤ Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

**Tableau II.A.6 :** Masses volumiques absolue et apparente des granulats.

<b>Granulats</b>	<b>Sable (0/3)</b>	<b>Gravier (3/8)</b>	<b>Gravier (8/15)</b>
Masse volumique Absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.72	2.72
Masse volumique Apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.86	1.54	1.50

### II.A.6. Équivalent du sable :

L'équivalent du sable permet d'évaluer la propreté du sable. Une solution la vante sépare les éléments fins du sable en provoquant leur floculation dans une éprouvette normalisée.

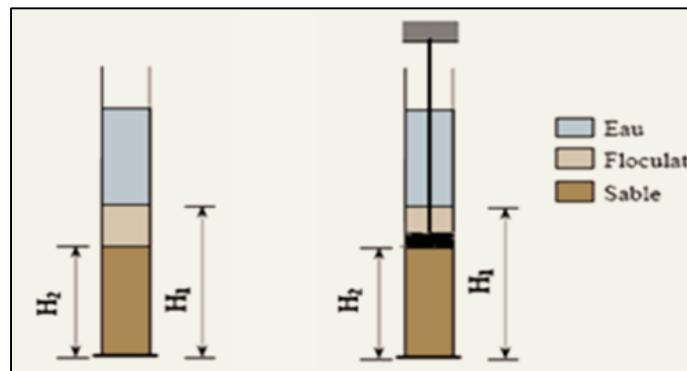
Un sable pour lequel E.S. visuel compris entre 65 et 75 est très légèrement argileux pouvant présenter un retrait légèrement plus fort. Les sables dont l'Es visuel est compris entre 75 et 85 (ou E.S. piston compris entre 70 et 80) conviennent parfaitement pour du béton de haute qualité. Enfin pour les sables présentant des valeurs supérieures, signe d'un manque presque total de fines argileuses, on peut craindre un défaut de plasticité du béton qui devra être compensé, sans majoration du rapport E/C. L'essai est effectué suivant la norme française [NFP18-598]

- Essai d'équivalent du sable :
  - Peser un échantillon de sable, 400g
  - Verser dans une éprouvette de l'eau jusqu'au repère 1

- Verser dans cette éprouvette l'échantillon de sable
- Agiter le tout durant 90 cycles en 30 secondes (utiliser l'agitateur manuel)
- Compléter par de l'eau l'éprouvette jusqu' au repère 2
- Laisser reposer pendant 20 min(placer l'éprouvette verticalement) et mesurer :
- H<sub>1</sub>: la hauteur de la partie sableuse sédimentée.
- H<sub>2</sub>: la hauteur totale de flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

La valeur de l'équivalent de sable (Es) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur H<sub>1</sub>, la hauteur totale H<sub>2</sub>. La hauteur H<sub>2</sub> est prise visuellement ou à l'aide d'un piston comme c'est indiqué sur la figure ci-dessous, on détermine :

- EsV : équivalent de sable visuel
- Esp : équivalent de sable au piston
- $ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100$
- $ESP = \frac{h_2}{h_1} \times 100$



**Figure II.A.13 : Es Visuel et Es à piston**



**Figure II.A.14 :** L'essai d'équivalent du sable.

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'ES exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable. L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact.

L'essai a donné les résultats suivants présentés dans le tableau suivant:

**Tableau II.A.7 :** Equivalent du sable (0/3).

Granulats	Sable(0/3)
Equivalent du sable visuel (ESV) %	86.14
Equivalent du sable sous le poids d'un piston (ES)%	85.15

**Tableau II.A.8 :** Valeur d'équivalent du sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
SE<60	SE<60	Sable argileux : risqué de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ SE < 70	60 ≤ SE < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
75 ≤ SE < 80	70 ≤ SE < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
SE > 85	SE > 80	Sable très propre: l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

### II.A.7. Essai d'affaissement

Le contrôle de la plasticité au cône d'Abrams permet de déterminer le temps de vibration nécessaire ainsi que la classe de maniabilité de notre béton. C'est une propriété essentielle du béton frais, elle caractérise son aptitude à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.



**Figure II.A.15 :** Détermination d'affaissement du béton l'état frais.

Les résultats d'affaissement du béton sont représentés ci-dessous:

**Tableau III.9 :** Les résultats d'affaissement du béton.

Les composants du béton	L'affaissement
BT	2cm
BFM	2.5cm
BFP	3cm
BFMP	2.5 cm

Connaissant sa classe, son ouvrabilité est évaluée à partir du tableau III.10

**Tableau II.A.10:** Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement. NF-EN-206/CN.

Plasticité	Serrage	Affaissement [cm]	Dénomination NF-EN-206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1/S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S3
Béton mou	Piquage	10 à 13	S4
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	S3/S4/S5

Selon la valeur de l'affaissement trouvé dans l'essai, on constate que c'est un béton ferme, donc il lui faut une bonne vibration.

#### II.A.8. Composition de béton par la méthode de DREUX–GORISSE

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode empirique utilisée pour la formulation du béton. Elle est basée sur un système de dosage proportionnel des différents composants du béton en fonction de leur masse volumique apparente.

Pour la formulation du béton ordinaire (béton témoin), nous avons choisi la méthode de DREUX-GORISSE qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour  $1\text{m}^3$  de béton. Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant données satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [5].

Après calcul, les résultats de la composition pour  $1\text{ m}^3$  sont donnés dans le tableau (II.A.11).

**Tableau II.A.11:** Composition finale pour  $1\text{m}^3$  de béton.

Constituants	Dosage( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Sable	677.6
Gravier3/8	225.86
Gravier8/15	903.49
Eau	200
Ciment	400
E/C	0.5
Adjuvant	2.4
Fibres métalliques(FM)	1%
Fibres plastique PET(FP)	0,5%
Fibres cocktail(FMP)	(0,5% FM + 0,30% FP)

### II.A.9. Confection du béton

Tous les mélanges ont été gâchés en suivant le même protocole, le béton a été réalisé dans un malaxeur à axe verticale. Pour chaque gâchée, 09 éprouvettes prismatiques et 09 éprouvettes cylindriques (norme NF P 18-400, NA 2600) ont été confectionnées et utilisées pour la détermination des résistances à la compression et à la flexion.

Le malaxage du béton se fait comme suit:

- Déversement du sable, gravier et ciment dans le malaxeur et mise en marche pendant 1 min jusqu'à homogénéisation des matériaux,
- Introduction de l'eau de gâchage et super-plastifiant et malaxage pendant 2 mn,
- L'introduction des fibres se fait dans cette dernière phase. Cette dernière phase permet d'assurer une meilleure dispersion des fibres dans le béton et une bonne homogénéisation du mélange,
- Les moules sont remplis en trois couches d'égale épaisseur, chaque couche étant compactée par la mise en marche de la table vibrante pendant 20 secondes.
- Conservation des éprouvettes Après la confection des échantillons, ces derniers sont recouverts d'un sac en plastique afin d'éviter toute évaporation de l'eau,
- Démoulage après 24 heures,
- Mises en cure des échantillons dans de l'eau, après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans un bac à eau pendant 28 jours.



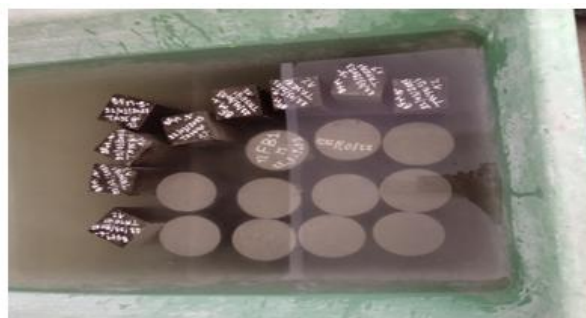
**Figure II.A.16 :** Déversement des matériaux secs dans le malaxeur.



**Figure II.A.17 :** Le gâchage des bétons.



**Figure II.A.18 :** Éprouvettes démoulées nommées et numérotées.



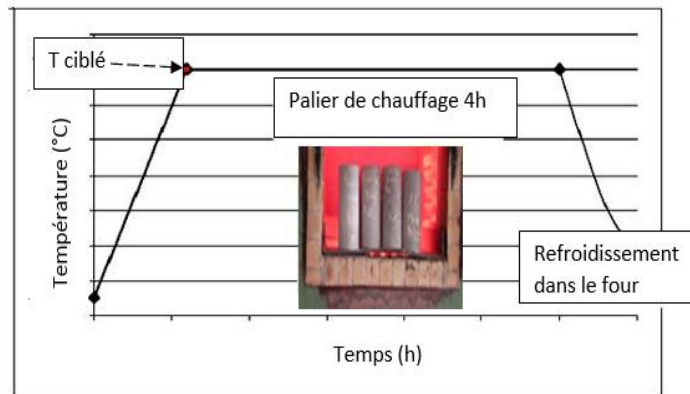
**Figure II.A.19 :** Eprouvettes conservées dans l'eau.

Après cette cure toutes les éprouvettes ont été stockées dans la salle du laboratoire pour bien sécher jusqu'à la stabilisation de leurs masses. Les éprouvettes ainsi préparées seront soumises aux cycles thermiques (cycles chauffage – refroidissement).

## II.A.10. Les essais à l'état durci

### II.A.10.1. Essais de cycles chauffage – refroidissement

Chaque cycle (chauffage-refroidissement) est composé de trois phases. La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de  $1^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ . La seconde est un palier de température constante qui dure quatre heures de temps dans le four afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes. La dernière phase est une diminution de la température jusqu'à atteindre la valeur ambiante à la vitesse moyenne de  $-1^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ . Cette phase de refroidissement des éprouvettes n'est pas pilotée. Elle se fait de façon naturelle en fonction de la température à l'intérieur du four qui est maintenu fermé.



**Figure II.A.20 :** Cycles de chauffage-refroidissement imposés aux éprouvettes.

Les éprouvettes sont disposées à l'intérieur du four de façon à ce que la chaleur soit répartie d'une façon homogène grâce au système de ventilation du four. Le pilotage du four est réalisé à l'aide d'un régulateur programmeur auquel sont reliés les thermocouples.



Figure II.A.21 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.

### II.A.10.2. Essai de compression uni axial

Pour chaque variante, les essais de compression sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques ( $\phi$  10 – 20) cm pour tous les cycles de chauffage – refroidissement. L'éprouvette est placée et centrée sur une presse hydraulique AUTO TEST puis soumise à un taux de chargement de 0.5 MPa/s jusqu'à la rupture (Figure III.22). La charge maximale atteinte est enregistrée et la contrainte de rupture en compression est obtenue par la formule suivante:

$$\sigma_c = \frac{4 \times F_{\max}}{\pi D^2}$$

Où :

$F_{\max}$  désigne la charge à la rupture en compression et D le diamètre de l'éprouvette.



Figure II.A.22 : Presse hydraulique AUTO TEST.

### II.A.10.3. Essai de traction par flexion trois points

Les essais de traction par flexion sont menés sur des éprouvettes prismatiques de dimension  $(7 \times 7 \times 28)$  cm<sup>3</sup>. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen d'un rouleau supérieur et de deux rouleaux inférieurs. Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs distancés de  $l$  ( $l = 18$  cm) et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieur et inférieur) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette. Conformément à la norme NF EN 12390-525 [Afnor, 2001], le chargement en deux points est effectué à une vitesse de 0.25mm/mn jusqu'à la rupture. La charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que la courbe force - déplacement.

La résistance en traction est obtenue par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{3 F l}{2 b h^2}$$

Avec:

F: désignant la valeur de la charge maximale appliquée à la rupture.

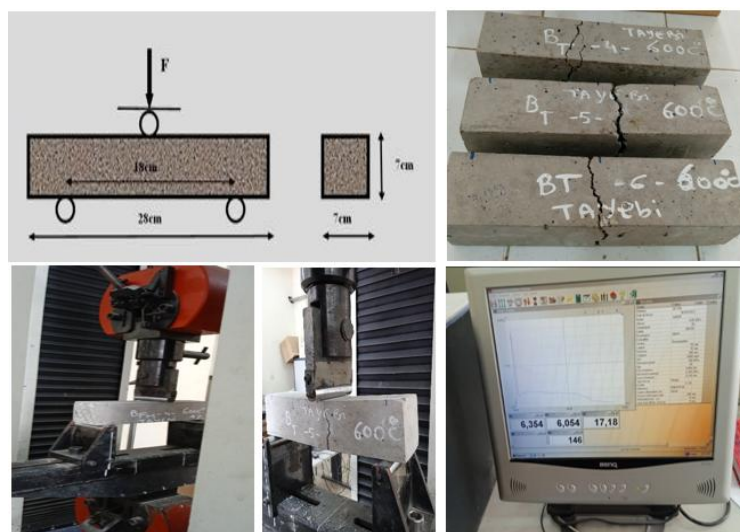
L : distance entre axe d'appuis,  $l = 180$ mm

b : largeur de la poutre,

b = 70 mm

h : hauteur de la poutre,

h = 70mm.



**Figure II.A.23 :** Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.

**CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés avec leurs caractéristiques ainsi que la formulation du béton. Nous avons fait varier deux paramètres qui sont : le type de fibres et la température des cycles de chauffage – refroidissement.

# **Partie : B**

## **Interprétation des résultats**

## INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on a traité le comportement mécanique des bétons étudiés. Les différents bétons sont formulés en faisant varier deux paramètres à savoir la nature des fibres et la température d'exposition. Les matériaux renforcés sont caractérisés en flexion 3 points et en compression. Les essais de compression ont été réalisés sur des cylindres ( $\phi$  10 – 20) cm comme déjà mentionné dans le chapitre III. Et ceux de flexion ont été effectués sur des échantillons prismatiques de dimensions ( $7 \times 7 \times 28$  cm<sup>3</sup>). Une synthèse des résultats des caractéristiques mécaniques (résistance en traction par flexion, résistance en compression) obtenus est présentée dans ce chapitre. Les courbes contrainte – déformation en compression et les courbes force – déplacement en flexion sont présentées et analysées pour chaque variante.

### II.B.1 FORMULATIONS

Dans ce travail, nous avons étudié quatre formulations de béton qui sont :

- BT : béton témoin (béton sans fibres),
- BFM : béton avec des fibres métalliques (1%),
- BFP : béton avec des fibres plastique (PET) (0,5%),
- BFMP : les bétons avec des fibres cocktail (association de fibres plastique (PET) (0,3%) et fibres métalliques (0,5%)).

### II.B.2 PERTE DE MASSE

Pour la détermination de la perte de masse, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Après les cycles de chauffage, les éprouvettes sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant.

La perte de masse qu'ont subie les échantillons lors du chauffage a été déterminée par rapport à leur état initial (état avant le chauffage). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

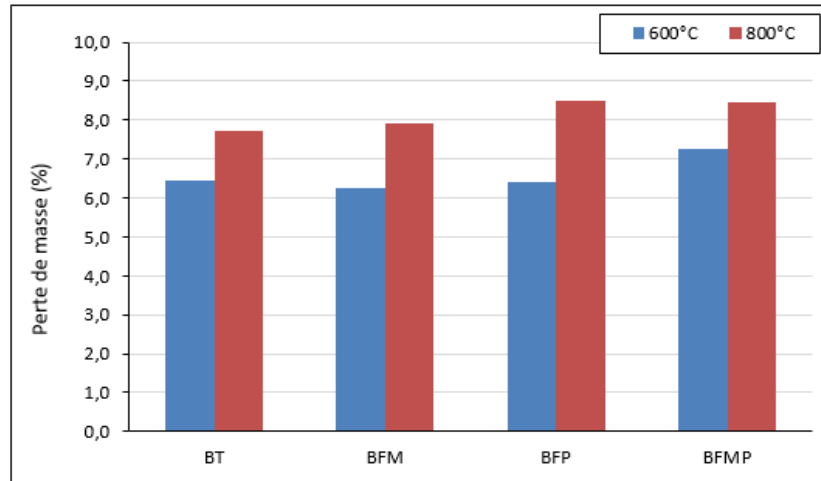
$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_0 - M_T}{M_0} \times 100\%$$

Avec :

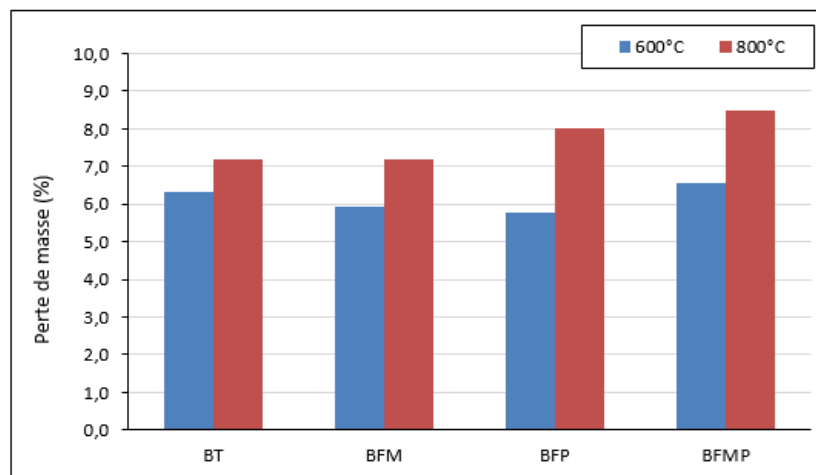
$M_0$ : la masse de l'éprouvette à la température ambiante (avant le chauffage),

$M_T$ : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement.

Toutes les éprouvettes ont été pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g. Nous avons calculé la perte de masse pour les éprouvettes cylindriques et prismatiques. Les résultats sont présentés dans les figures (II.B.1) et (II.B.2).



**Figure II.B.1 :** Perte de masse des éprouvettes cylindriques.



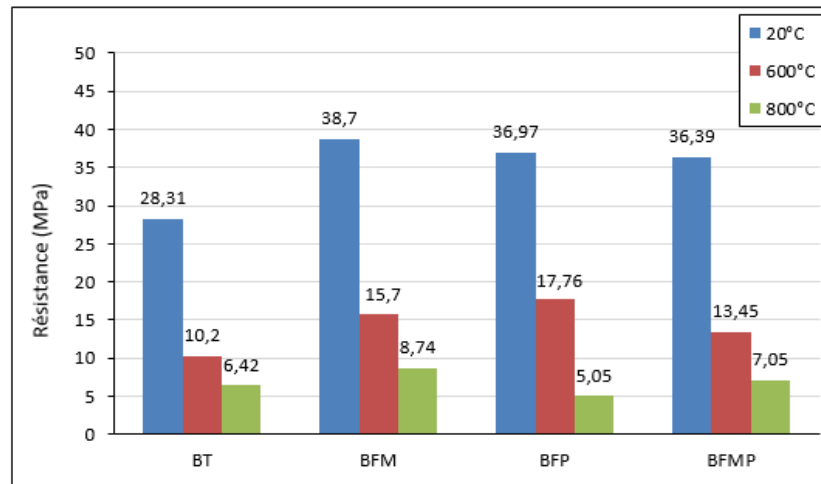
**Figure II.B.2 :** Perte de masse des éprouvettes prismatiques.

Le calcul de la perte de masse est une moyenne de trois valeurs. Nous avons effectué le calcul sur les éprouvettes cylindriques et prismatiques. On remarque que plus la température augmente, plus la perte de masse augmente. A 600°C, le béton de fibres métalliques et béton de fibres plastiques ont présenté une perte de masse presque de même grandeur et légèrement inférieur à celle du béton témoin. Alors que le béton de fibres cocktail (BFMP) a présenté une perte de masse légèrement supérieure à tous les autres types de bétons et cela pour les deux cas d'éprouvettes. A 800°C, tous les béton sont présenté une perte de masse légèrement supérieure à celle du béton témoin.

### II.B.3 ESSAI DE COMPRESSION

#### II.B.3.1 Résistance à la compression

Tous les essais de compression ont été réalisés sur des cylindres ( $\phi$  10 – 20) cm. La résistance à la compression a été calculée pour une moyenne de trois valeurs. Les résultats sont présentés sur la figure (II.B.3).



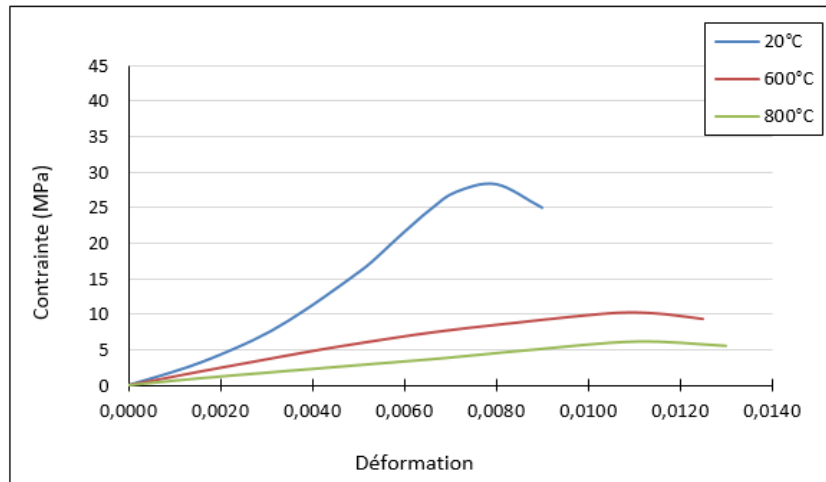
**Figure II.B.3 :** Résistance en compression des différents bétons étudiés.

Pour toutes les températures, on remarque que les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté des résistances à la compression supérieures par rapport aux bétons de fibres plastique (BFP) et au béton de fibres cocktail (BFMP). A 600°C et 800°C, on a une importante chute de résistance pour tous les types des bétons étudiés comparés aux bétons à 20°C. A 800°C, cette chute de résistance est de l'ordre de 77% pour le béton témoin (BT), de 77,4% pour le béton de fibres métalliques, de 86% pour les bétons de fibres plastique (BFP) et de 80,6% pour les bétons cocktail (BFMP).

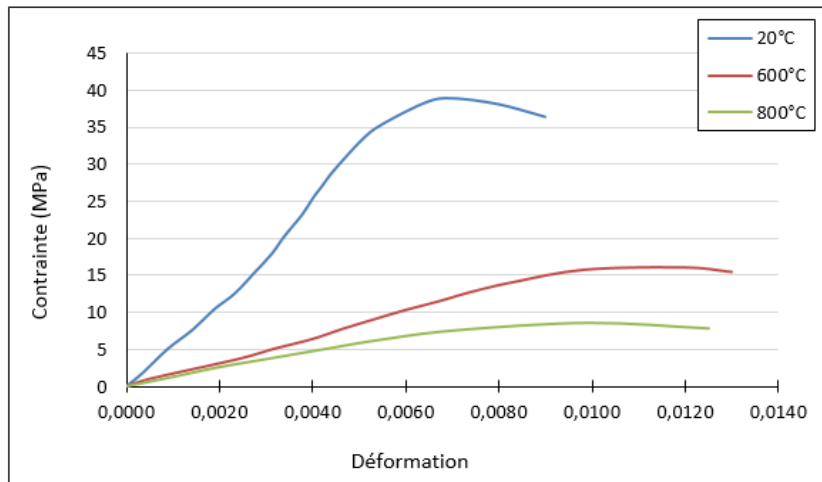
#### II.B.3.2 Courbes contrainte-déformation à la compression

##### a) Influence de la température

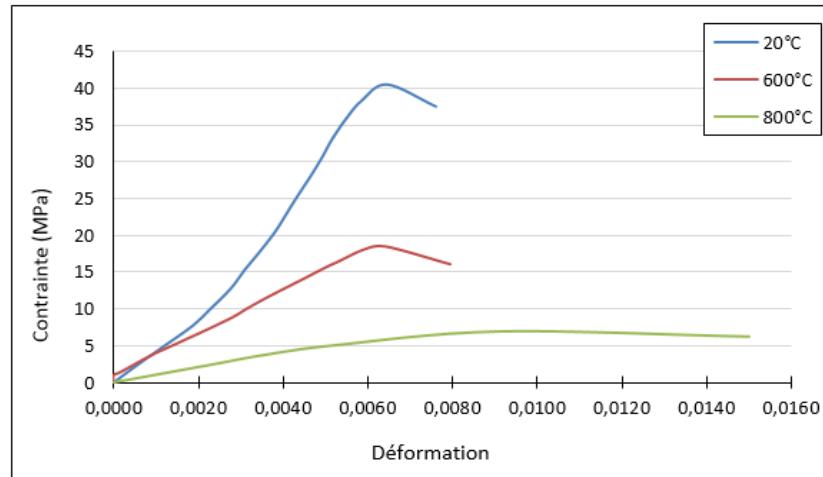
Nous avons tracé les courbes contrainte-déformation en compression des différents bétons étudiés, voir figure (II.B.4), (II.B.5), (II.B.6) et (II.B.7).



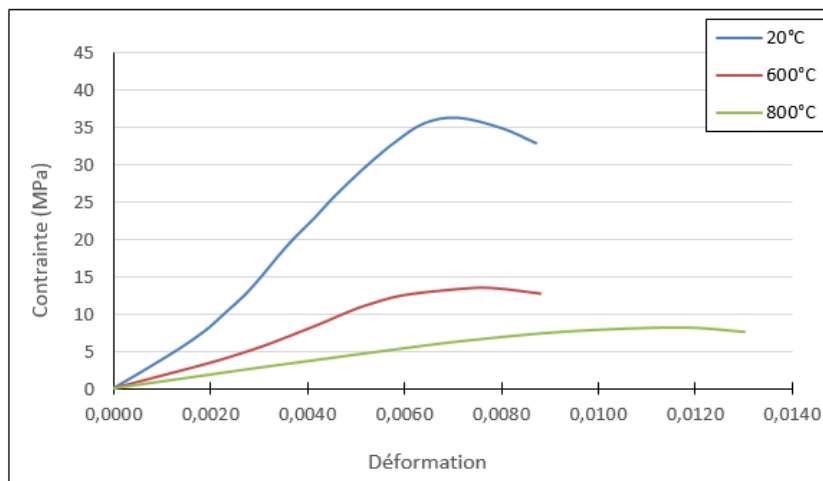
**Figure II.B.4 :** Courbes contrainte – déformation en compression du béton témoin (BT).



**Figure II.B.5 :** Courbes contrainte – déformation en compression du béton de fibres métalliques (BFM).



**Figure II.B.6 :** Courbes contrainte – déformation en compression du béton de fibres plastique PET (BFP).

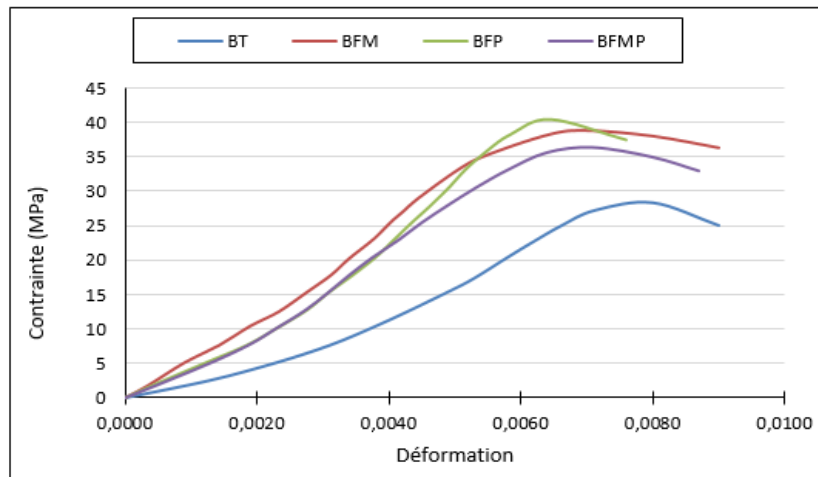


**Figure II.B.7 :** Courbes contrainte – déformation en compression du béton de fibres cocktail (BFMP).

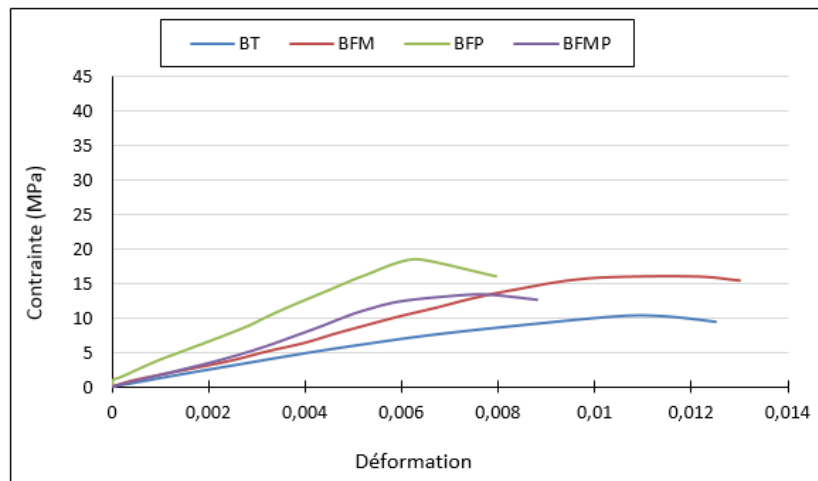
La pente des courbes contrainte – déformation en compression de tous les bétons étudiés diminue lorsque la température augmente. Les bétons soumis à des cycles chauffage – refroidissement à 600°C et 800°C ont présenté des résistances inférieures comparés aux bétons qui n’ont pas été soumis aux cycles de chauffage – refroidissement.

**b) Influence du type de fibres**

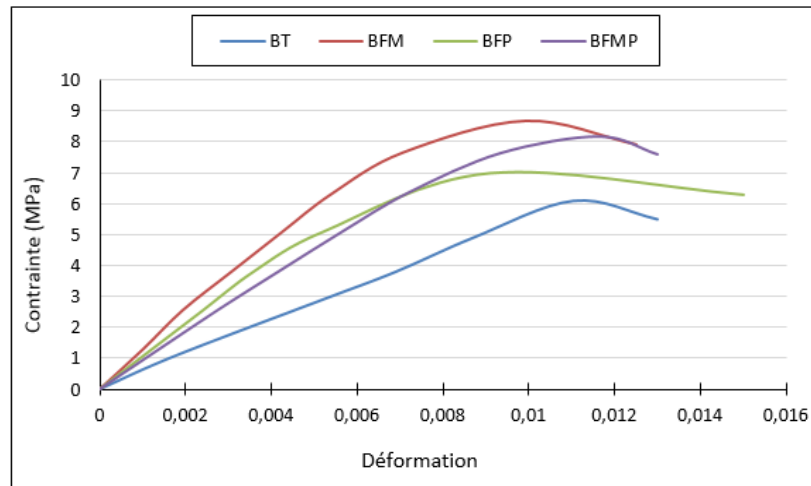
Dans les figures (II.B.8), (II.B.9) et (II.B.10), nous avons présenté les courbes contrainte-déformation en compression en fonction du type de fibres.



**Figure II.B.8 :** Courbes contrainte – déformation en compression des bétons étudiés à 20°C.



**Figure II.B.9 :** Courbes contrainte – déformation en compression des bétons étudiés à 600°C.



**Figure II.B.10 :** Courbes contrainte – déformation en compression des bétons étudiés à 800°C.

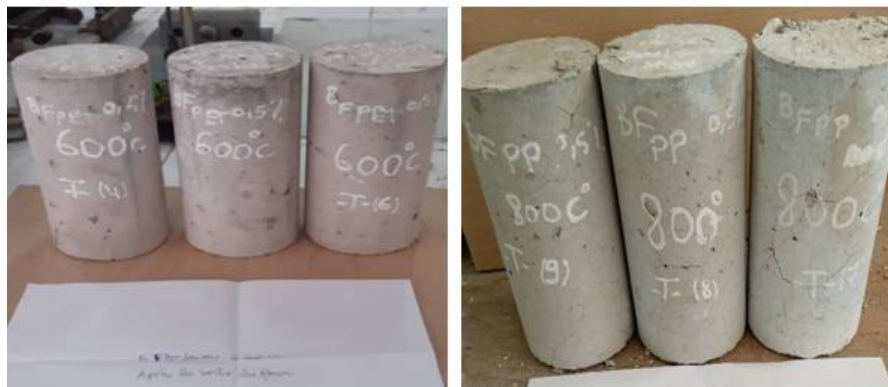
Pour les différentes températures étudiées, on constate que les bétons fibrés (BFM, BFP, BFMP) ont présenté un meilleur comportement par rapport au béton témoin (BT). La pente des courbes contrainte – déformation en compression des bétons fibrés est supérieure à celle du béton témoin pour toutes les températures étudiées. Par contre la pente donnée par le béton de fibres plastique et béton de fibres cocktail est presque de même allure. La contrainte de rupture des bétons fibrés est supérieure à celle du béton témoin.



**Figure II.B.11 :** L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton témoin (BT) à la sortie du four (600°C et 800°C).



**Figure II.B.12 :** L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres métalliques (BFM) à la sortie du four (600°C et 800°C).



**Figure II.B.13 :** L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres plastique (BFP) à la sortie du four (600°C et 800°C).



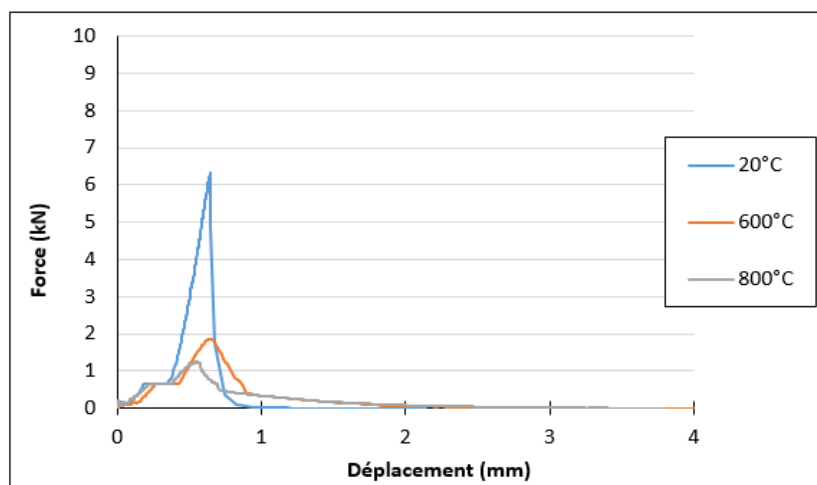
**Figure II.B.14 :** L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres cocktail (BFMP) à la sortie du four (600°C et 800°C).

En observant l'aspect des éprouvettes à la sortie du four (soumises à des températures de 600°C et 800°C), on constate qu'il y a apparition de fissures sous forme de faïençage pour les différents bétons étudiés. Ces fissures sont très visibles pour les éprouvettes soumises à la température de 800°C. On constate aussi un détachement de matière qui est très visible sur les éprouvettes du béton témoin.

#### II.B.4 ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS

Nous avons déterminé la résistance en traction par flexion 3 points des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm<sup>3</sup>. Les courbes force-déplacement ont été tracées pour chaque type de béton et pour chaque température étudiée.

##### a) Influence de la température



**Figure (II.B.15) :** Courbes forces – déplacement du béton témoin (BT).

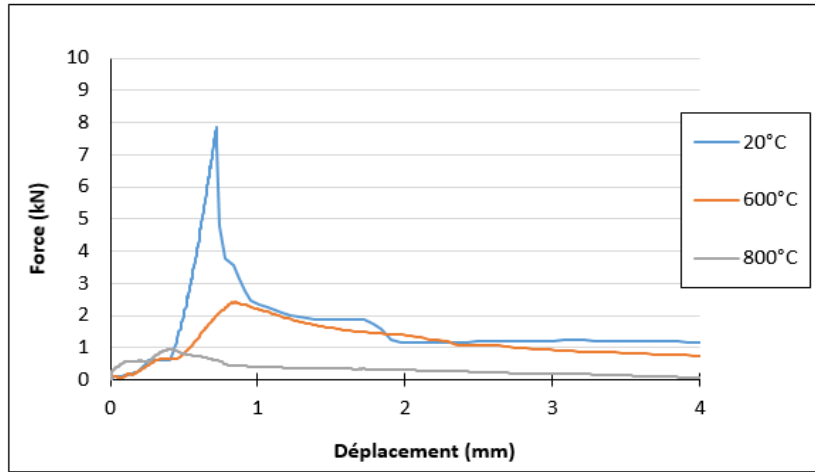


Figure (II.B.16) : Courbes forces – déplacement du béton de fibres métalliques (BFM).

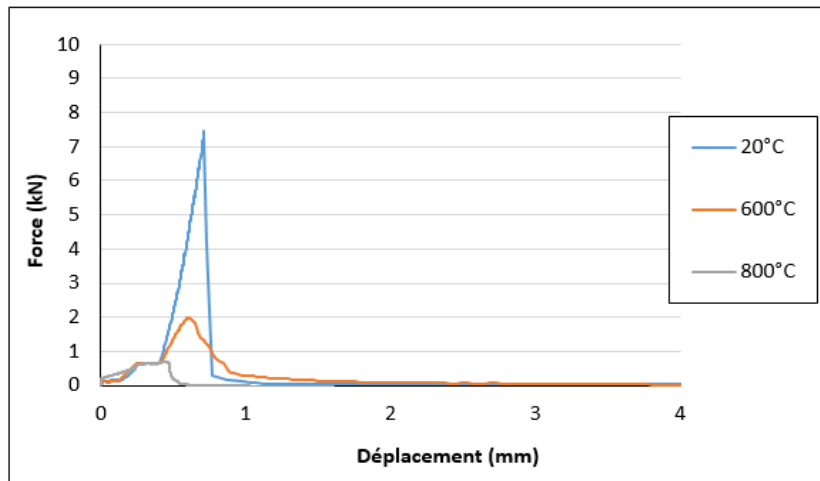


Figure (II.B.17) : Courbes forces – déplacement du béton de fibres plastique PET (BFP).

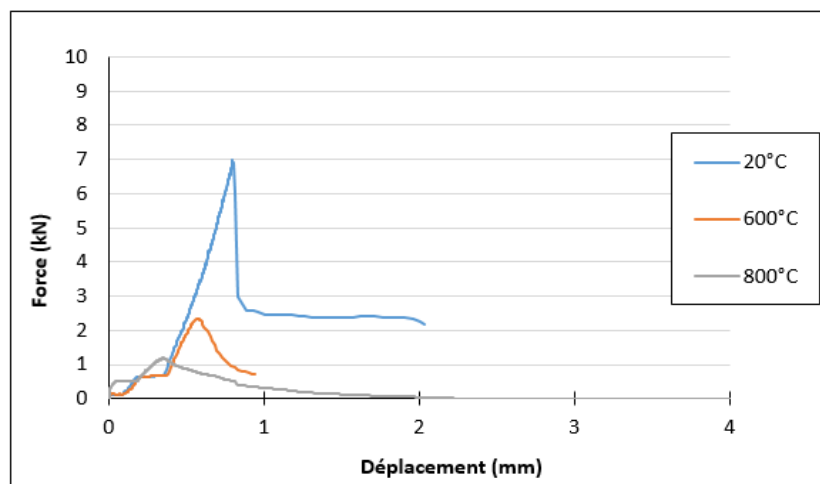


Figure (II.B.18) : Courbes forces – déplacement du béton de fibres cocktail (BFMP).

La résistance à la flexion des différents types de béton étudié diminue en augmentant la température. La résistance à la flexion du béton témoin (BT) et du béton de fibres plastique (BFP), est inférieure à celle du béton de fibres métalliques (BFM) et fibres cocktail (BFMP) A 800°C, on constate une diminution assez importante des résistances.

### b) Influence du type de fibres

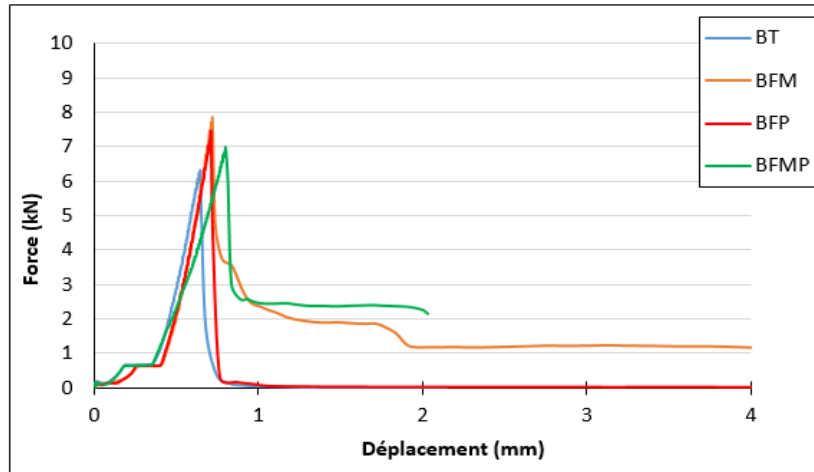


Figure II.B.19 : Courbes force – déplacement en flexion des bétons étudiés à 20°C.

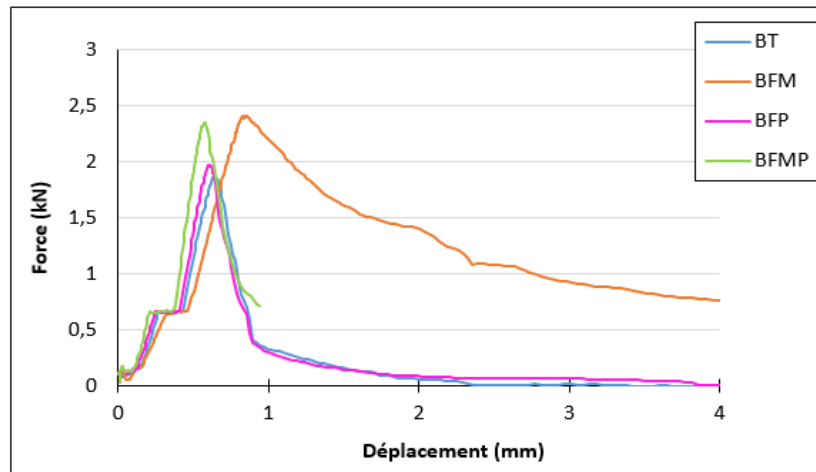
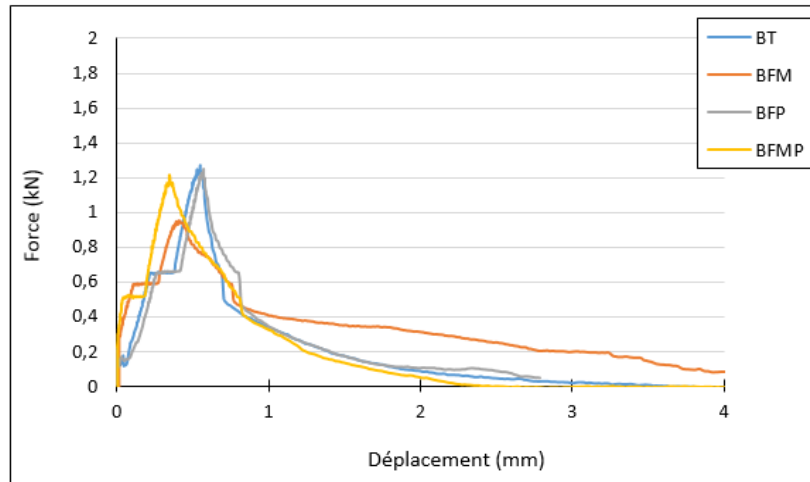
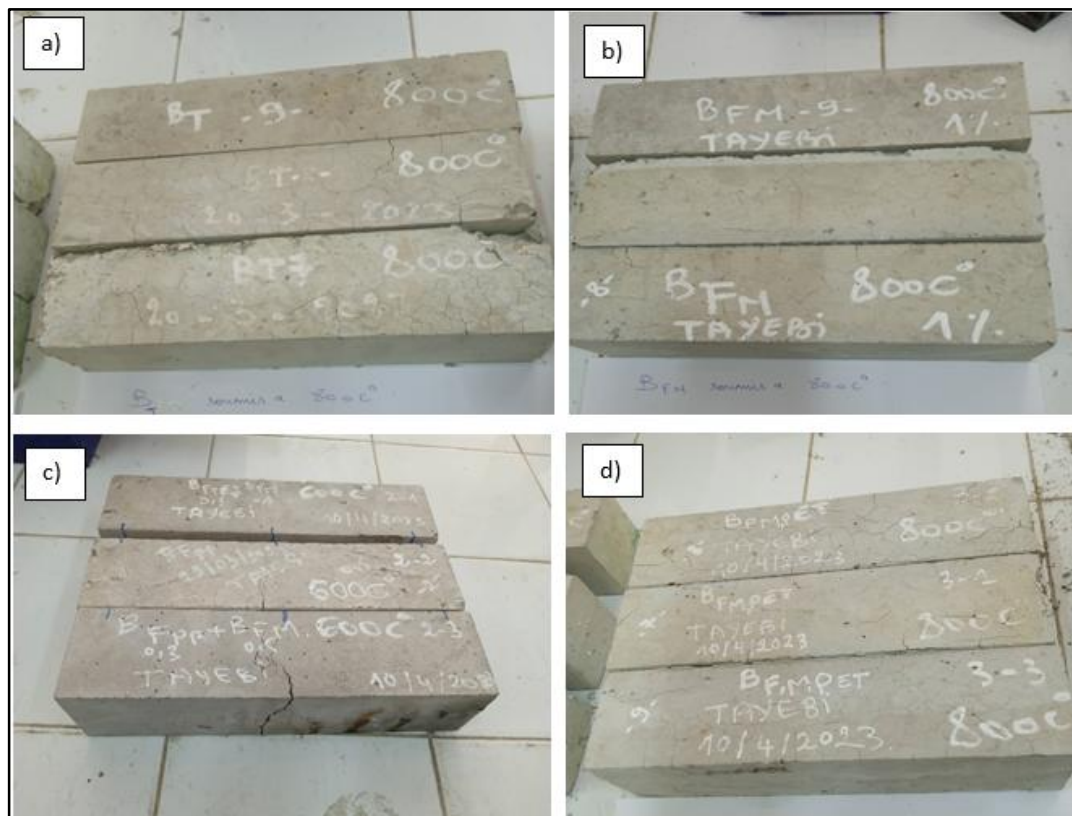


Figure II.B.20 : Courbes force – déplacement en flexion des bétons étudiés à 600°C.



**Figure II.B.21** : Courbes force – déplacement en flexion des bétons étudiés à 800°C.

Pour toutes les températures étudiées, les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté un meilleur comportement à la flexion trois points. Leurs comportements post-pic est meilleur par rapport aux autres bétons (BT), (BFP) et (BFMP). En augmentant la température, les bétons étudiés ont présenté une chute de résistance assez importante.



**Figure (II.B.22)** : L'aspect des éprouvettes prismatiques des bétons étudiés à la sortie du four,

a) BT (800°C), b) BFM (800°C), c) BFMP (600°C), d) BFP (800°C).

A la sortie du four, les différents bétons étudiés ont présenté des fissures bien visibles à la surface des éprouvettes. A 800°C, le béton témoin a présenté un détachement de matière. Cela n'a pas été observé sur les bétons fibrés.

## Conclusion Générale

Le but de ce travail de recherche était d'étudier l'influence des fibres plastique (PET) et/ou métalliques sur le comportement des bétons fibrés soumis à de hautes températures. Nous avons confectionné quatre types de béton : BT, BFM, BFP et BFMP.

Sur la base des résultats obtenus nous avons établi les conclusions suivantes :

On remarque que plus la température augmente, plus la perte de masse augmente. A 600°C, le béton de fibres métalliques et béton de fibres plastiques ont présenté une perte de masse presque de même grandeur et légèrement inférieur à celle du béton témoin. Alors que le béton de fibres cocktail (BFMP) a présenté une perte de masse légèrement supérieure à tous les autres types de bétons. A 800°C, tous les bétons ont présenté une perte de masse légèrement supérieure à celle du béton témoin.

Pour toutes les températures, on remarque que les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté des résistances à la compression supérieure par rapport aux bétons de fibres plastique (BFP) et au béton de fibres cocktail (BFMP). A 600°C et 800°C, on a une importante chute de résistance pour tous les types des bétons étudiés comparés aux bétons à 20°C.

La pente des courbes contrainte – déformation en compression de tous les bétons étudiés diminue lorsque la température augmente. Les bétons soumis à des cycles chauffage – refroidissement à 600°C et 800°C ont présenté des résistances inférieures comparés aux bétons qui n'ont pas été soumis aux cycles de chauffage – refroidissement.

Pour toutes les températures étudiées, les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté un meilleur comportement à la flexion trois points. Leurs comportement post-pic est meilleur par rapport aux autres bétons (BT), (BFP) et (BFMP). En augmentant la température, les bétons étudiés ont présenté une chute de résistance assez importante.

A la sortie du four, les différents bétons étudiés (cylindriques et prismatiques) ont présenté sur leurs surfaces des fissures sous forme de faïençage. Ces fissures sont très visibles pour les éprouvettes soumises à la température de 800°C. On constate aussi un détachement de matière qui est très visible sur les éprouvettes du béton témoin.

## REFERENCE

- [1] AND, « Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie, » AGENCE NATIONAL DE DECHETS, Exercices 2020.
- [2] Ben alouche Nadia, « Etude expérimentale d'un béton à base de déchets de verre non coloré Confiné avec des matériaux composites ». Mémoire de Master spécialité : Génie Civil Option : Structure. Promotion 2020
- [3] Source : la direction de l'environnement de Tizi-Ouzou
- [4] (Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie) Source AND, Année 2018/2019)
- [5] D. A. (2006), Guide du traitement des déchets. Paris : Dunod., 2006
- [6] A. Carles-Gibergues et M. Pigeon. "La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse", Paris, Ed. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [7] C. Alonso et L. Fernandez. "Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments", Journal of Materials Science, vol. 39, n°9, p. 3015-3024, 2004.
- [8] M. Castellotea, C. Alonsoa, C. Andradea, X. Turrillasa, and J. Campoc. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. Cement and Concrete Research, 34 (2004) 1633–1644.
- [9] Piasta 1984] J. Piasta. "Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste", Materials and Structures, vol. 17, n°6, p. 415-420, 1984.
- [10] A. Noumowé. "Effet de hautes températures (20-6000C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de Doctorat, Génie civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995.
- [11] G. A. Houry. "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment", Magazine of Concrete Research, vol. 44, n°161, p. 291-309, 1992.
- [12][Xing 2011] Z. Xing. "Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température", Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [13] Laneyrie, 2014) Laneyrie, C. (2014). Valorisations des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclées (Ph.D Expérimentale), Université de Cergy-Pontoise, Cergy – France.
- [14] [Menou 2004] A. Menou. "Étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: Approche multi échelles de l'endommagement thermique", Thèse de Doctorat, Mécanique des solides, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.

- [15] U. Diederichs, U.M. Jumppanen, V. Penttala, Behaviour of high strength concrete at high temperatures. Espoo, 1989, Helsinki University of Technology, Department of structural engineering, report 92, 1989.
- [16] Hager I.G. (2004) Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris et Ecole Polytechnique de Cracovie, novembre, 183p.
- [17] G. A. Khoury. "Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle", Nuclear Engineering and Design, vol. 156, n°1-2, p. 313-321, 1995.
- [18] G. A. Khoury, B. N. Grainger et P. J. E. Sullivan. "Transient Thermal Strain of Concrete: Literature Review, Condition Within Specimen and Behaviour of Individual Constituent.", Magazine of Concrete Research, vol. 37, n°132, p. 131-144, 1985.
- [19] [Schneider et al. 1982] U. Schneider, U. Diederichs et C. Ehm. "Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's", Nuclear Engineering and Design, vol. 67, n°2, p. 245-258, 1982.
- [20] M. Kanema. "Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons", Thèse de Doctorat, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- [21] Li et al. 2004] M. Li, C. Qian et W. Sun. "Mechanical properties of high-strength concrete after fire", Cement and Concrete Research, vol. 34, n°6, p. 1001-1005, 2004.
- [22] V.T. NGYEN. « Comportement des béton ordinaire et hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions », thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise France, 2013.
- [23] R. Haniche. "Contribution à l'étude des bétons portés en température / Évolution des propriétés de transfert : Étude de l'éclatement", Thèse de doctorat, Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [24] F. Cheng, V. Kodur et T. Wang. "Stress-Strain Curves for High Strength Concrete at Elevated Temperatures", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 16, n°1, p. 84-90, 2004.
- [25][Suhaendi et al. 2006] S. L. Suhaendi et T. Horiguchi. "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition", Cement and Concrete Research, vol. 36, n°9, p. 1672-1678, 2006.
- [26] A. Noumowé. "Effet de hautes températures (20-6000C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de Doctorat, Génie civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995
- [27][73][Toumi 2010] B. Toumi. "Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton", Thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [28] BENMEKIDECHE-GOUISSEM, L. Etude de l'effet des paramètres de transformation et des extenseurs de chaînes sur les propriétés du poly (éthylène téréphtalate). mémoire de master, Setif , 2015.

[29] BENAYACHE.H, et GHELLAF. F. Caractérisation du poly (éthylène téréphtalate) (PET) recyclé utilisé par l'entreprise RETPLAST pour la fabrication des fibres. mémoire de master, Université A. Mira - Béjaia , 2016.

## RESUME

Cette étude vise à étudier et à mieux comprendre le comportement des bétons fibrés à haute température, ainsi que l'effet de l'évolution de la température sur leurs propriétés mécaniques. Des cycles de chauffage – refroidissement ont été appliqués aux bétons jusqu'à une température maximale de 600°C et 800°C. Cette étude a montré une diminution significative de la résistance des bétons fibrés lorsqu'ils étaient exposés à des températures élevées, par rapport aux bétons non soumis à de telles conditions. Pour toutes les températures examinées, les bétons contenant des fibres métalliques ont montré une résistance nettement supérieure par rapport aux bétons contenant des fibres plastique PET et aux bétons contenant des fibres mixtes. À 600°C, les différents bétons étudiés n'ont pas présenté de dégradation visible à l'œil nu comme détachement de matière. Par contre à 800°C, les bétons de fibres mixtes ont présenté des petites zones écaillées, tandis que les bétons contenant des fibres métalliques et fibres plastique (PET) ont développé des réseaux de microfissures sans détachement de matière. Cette étude a mis en évidence l'impact négatif des températures élevées sur la résistance des bétons de fibres. Les bétons contenant des fibres métalliques se sont révélés être les plus performants en termes de résistance à haute température, tandis que les bétons de fibres mixtes ont montré des signes de détérioration plus prononcés. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour l'amélioration de la durabilité des bétons fibrés dans des environnements soumis à des conditions de haute température.

**Mots clés :** Béton, fibres plastique PET, fibres métalliques, haute température, résistance.

## ABSTRACT

This study aims to study and better understand the behavior of fiber-reinforced concretes at high temperature, as well as the effect of the evolution of temperature on their mechanical properties. Heating-cooling cycles were applied to the concretes up to a maximum temperature of 600°C and 800°C. This study showed a significant decrease in the strength of fiber-reinforced concretes when exposed to high temperatures, compared to concretes not subjected to such conditions. For all the temperatures examined, the concretes containing metal fibers showed a significantly higher resistance compared to the concretes containing PET plastic fibers and to the concretes containing mixed fibers. At 600°C, the various concretes studied did not show any degradation visible to the naked eye as detachment of material. On the other hand, at 800°C, the mixed fiber concretes presented small spalled areas, while the concretes containing metal fibers and plastic fibers (PET) developed networks of microcracks without detachment of material. This study highlighted the negative impact of high temperatures on the strength of fiber concretes. Concretes containing metal fibers were found to perform best in terms of high temperature resistance, while mixed fiber concretes showed more pronounced signs of deterioration. These results provide valuable information for improving the durability of fiber-reinforced concretes in environments subject to high temperature conditions.

**Keywords:** Concrete, PET plastic fibers, metal fibers, high temperature, strength.