

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Mouloud MAMMERY de TIZI-OUZOU



Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie civil

Mémoire de Fin d'Études

Master Académique en Génie Civil
Spécialité: Structure

Thème :

**Influence de la température sur le comportement
mécanique d'un béton à base de fibres de déchets
d'aluminium.**

Réalisé par :

Melle. BELKADI SARAH

Dirigé par :

Mme. TAUCHE-KHELOUI FATMA

Promotion 2022-2023

Remerciement

*Tout d'abord je remercie avant tous, **Dieu le tout puissant**, pour m'avoir accordé la santé, le courage, la patience et la volonté jusqu'à l'aboutissement de ce modeste travail.*

J'exprime mes sincères remerciements :

*A ma promotrice **Mme F. TAUCHE – KHELOUI** pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, sa modestie, et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens possibles pour travailler dans les meilleures conditions.*

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

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'études.

BELKADI SARAH.

Dédicaces

*Je tiens à remercier **ma chère MERE et mon cher PERE** pour leur soutien dans chaque travail que j'avais effectué. Je leurs présente toute ma Reconnaissance et mon profond amour et respect.*

*A mes chers frères **RAFIK et MAHDI** et ma chère sœur **SYRINE** pour leur soutien et amour.*

*A mes camarades : **OULD HAMMOU RAMDANE ; ISSABRE HAMADOUN ; BEKRI YANIS ; INGRACHENE AMIROUCHE.***

Résumé

Résumé :

La température élevée dans le béton entraîne la destruction des hydrates de la pâte de ciment. Cette destruction signifie la faiblesse des matériaux par la détérioration de leurs propriétés mécaniques : dureté, résistance... une température élevée génère également une pression de fluide élevée, pouvant endommager ce dernier. Les travaux de recherche dans ce domaine ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton sous haute température. L'objectif de cette recherche est d'étudier et de mieux comprendre le comportement mécanique des bétons, à base de fibres métalliques issues de l'industrie de récupération, sous haute température. La perte de masse résiduelle, la résistance en compression et en traction par flexion 3 points sont évaluées au fur et à mesure. Les bétons sont soumis à des cycles de chauffage et refroidissement différents jusqu'à une température maximale de 600°C et 800°C à l'âge de 28 jours. Cette étude a révélé que la résistance des bétons fibrés diminuait considérablement 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 de fibres en aluminium ont présenté une résistance supérieure par rapport au béton témoin.

Mots clés : Béton, fibres en aluminium, température, résistance mécanique.

Abstract

Abstract:

The high temperature in concrete leads to the destruction of the hydrates in the cement paste. This destruction means that the materials are weakened by the deterioration of their mechanical properties: hardness, strength, etc. A high temperature also generates high fluid pressure, which can damage the concrete. Degradation of concrete can be observed following tunnel or building fires. Research in this field has provided explanations for the phenomena observed in the behavior of heated concrete. The aim of this research is to study and better understand the mechanical behavior of concrete, based on aluminum fibers from the recovery industry, under high temperatures. The loss of residual mass, the resistance in compression and tension by flexion 3 points are evaluated progressively.

The concretes are subjected to different heating and cooling cycles up to a maximum temperature of 600°C and 800°C at the age of 28 days. This study revealed that the strength of fiber-reinforced concretes decreased considerably when exposed to high temperatures, compared with concretes not subjected to such conditions. For all temperatures examined, aluminum fiber concretes showed superior strength compared with control concrete.

Key words: Concrete, aluminum fibers, temperature, mechanical strength.

SOMMAIRE

CHAPITRE I : Béton a base de déchets

I.1 Introduction	3
I.2 l'historique du béton.....	3
I.2.1 les débuts du béton	3
I.2.2 le réveil du béton	4
I.2.3 un essor considérable	4
I.3 Définition du béton	5
I.4 le comportement mécanique du béton classique	6
I.5 Définition du déchet	7
I.6 Déchets utilisés comme granulats du béton	7
I.6.1 laitiers de haut fourneau	7
I.6.2 sous produit provenant des centrales thermique	8
a. les cendres volantes	8
b. mâchefer.....	8
I.6.3 Déchets de construction et de démolition.....	8
I.7 les fibres dans le béton	8
I.8 les différents types de fibres	11
I.8.1 fibres minérales	11
I.8.2 fibres végétales	11
I.8.3 fibres synthétiques	12
I.8.4 fibres de carbone.....	14
I.8.5 fibres d'amiante	14
I.8.6 fibres de cellulose.....	15
I.8.7 fibres de polypropylènes	16
I.8.7.1 influence des fibres de polypropylène sur la tenue au feu des bétons	17
I.8.8 fibres de verre	17
I.8.9 fibres métalliques	18

I.8.9.1 Influence des fibres métalliques dans les bétons structurels	19
I.9 comportement des bétons renforcés de fibres métalliques	20
I.10 Application des bétons de fibres	21
I.11 Conclusion	22

CHAPITRE II : Comportement thermique du béton

II.1 Introduction	23
II.2 Différents formes d'endommagement thermiques	23
II.3 Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton	24
a. Teneur en eau	24
b. les propriétés physico-mécaniques du matériau	24
c. taille des éprouvettes.....	25
d. la vitesse de chauffage	25
e. la nature des granulats	25
II.4 Déformations thermiques du béton	25
II.4.1 Déformation thermique de la pate cimentaire.....	25
II.4.2 Déformation thermique des granulats.....	26
II.4.3 Déformation thermique du béton	26
II.5 Evolution des propriétés mécanique du béton avec la température	27
II.5.1 résistances a la compression	28
II.5.2 résistances a la traction	29
II.6 Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis a une température élevée	30
II.6.1 Résistance en compression	31
II.6.2 Résistance en traction par flexion	32
II.7 Conclusion	33

CHAPITRE III : Présentation des matériaux et les essais réalisés

III.1 Introduction	34
III.2 Types d'éprouvettes utilisées	34

III.3 caractéristiques des matériaux.....	35
III.3.1 le ciment.....	35
III.3.2 le sable	35
III.3.3 les granulats	36
III.3.4 l'eau	37
III.3.5 les adjuvants	37
III.3.6 les renforts	38
III.3.6.1 caractéristiques des fibres	39
III.4 caractéristiques du sable	40
III.4.1 Essai équivalent du sable.....	40
III.4.2 Masse volumique absolue et apparente	43
III.5 Analyse granulométrique.....	44
III.5.1 Principe de l'essai	44
III.5.2 Description de l'essai	45
III.6 Essai d'affaissement	48
III.7 présentation du matériel	50
III.8 confection du béton	51
III.9 conservation des éprouvettes	52
III.10 Essai a l'état durci	54
III.10.1 Essai de compression uni-axiale	54
III.10.2 Essai de traction par flexion trois points	55
III.10.3 Essai thermique	56
III.11 Conclusion	57

CHAPITRE IV : Interprétation des résultats

IV .1 Introduction	58
IV.2 Formulation	58
IV .3 Perte de masse	58
IV .4 Essai mécanique de compression	60
IV .4.1 Essai de compression	60
IV .4.2 Influence de la température	61
IV .4.3 Influence des fibres métalliques dans le béton	62
IV.4.4 Etat de surface des spécimens.....	64
IV .5 Essai de flexion trois points	65
IV .5.1 Influence de types de fibres	67
IV .6 Conclusion	69
Conclusion générale	70

Références bibliographiques

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I.1 : Une voûte de la basilique de Maxence

Figure I.2 : L'église St Jean de Montmartre à Paris en France

Figure I.3 : Le pont de l'île de Ré Rivedoux –Plage France

Figure I.4 : Rôle des fibres dans la fissuration

Figure I.5: Les différents types de renfort

Figure I.6 : Fibres minérale

Figure I.7: Fibres végétales

Figure I.8 : Fibres synthétiques

Figure I.9 : Fibres de carbone

Figure I.10 : vue microscopique de fibres d'amiante

Figure I.11 : Molécule de cellulose

Figure I.12 :Structure de la microfibre de cellulose

Figure I.13 : Fibres de polypropylène

Figure I.14 : Fibres de verre

Figure I.15 : différentes formes de fibres

Figure I.16 : Fibres métalliques

Figure I.17 : propriétés physique et mécanique de certaines fibres

Figure I.18 : Exemples d'application de béton de fibres

Chapitre II

Figure II.1 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre 2001

Figure II.2 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid).

Figure II.3 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des bétons chauffés, (Kanema 2007) (vitesse de chauffage est de 1°C/min.

Chapitre III

Figure III.1 : le ciment utilisé 42.5R

Figure III.2 : Sable utilisé

Figure III.3 : Gravier 8 /15

Figure III.4 : gravier 3/8

Figure III.5 : Fluidifiants Sika Plast BV 40+.

Figure III.6 : la canette

Figure III.7 : Fibres métalliques ondulée 3 cm

Figure III.8 :Agitateur manuel

Figure III.9 : Eprouvette après agitation

Figure III.10 : Essai de l'équivalent de sable

Figure III.11 :Essai de masse volumique absolue

Figure III.12 : Essai de masse volumique apparente

Figure III.13 : Tamiseuse électrique

Figure III.14 : Courbe granulométrique

Figure III.15 : Détermination d'affaissement du béton à l'état frais

Figure III.16 : Malaxeur

Figure III.17 : Table vibrante

Figure III.18 : Eprouvettes après coulage

Figure III.19 : Eprouvettes en cure d'hydratation

Figure III.20 : Eprouvettes après la cure d'hydratation

Figure III.21 : presse hydraulique AUTO TEST

Figure III.22 : Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points

Figure III.23 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four

Chapitre IV

Figure IV.1 : Pertes de masses des différents bétons étudiés

Figure IV.2 : Résistance à la compression des différents bétons

Figure IV.3 : Courbes contraintes-déformations du béton témoin(BT)

Figure IV.4 : courbe contraintes déformations du béton fibres métalliques

Figure IV.5: Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 20 °C

Figure IV.6 : Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 600°C

Figure IV.7 : Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 800°C

Figure IV.8 : Aspect des éprouvettes BFM a 20°C avant et après écrasement

Figure IV.9 : Aspect des éprouvettes BFM a 600°C avant et après écrasement

Figure IV.10 : Aspect des éprouvettes BFM a 800°C avant et après écrasement

Figure IV.11 : Courbes forces-déplacement du béton témoin en flexion

Figure IV.12 : Courbes forces-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM)

Figure IV.13 : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 20 °C

Figure IV.14 : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 600°C

Figure IV.15 : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 800°C

Figure IV.16 : Aspect des éprouvettes prismatiques BFM a 20°C avant et après écrasement

Figure IV.17 : Aspect des éprouvettes prismatiques BFM a 600°C avant et après écrasement

Figure IV.18 : Aspect des éprouvettes prismatiques BFM a 800°C avant et après écrasement

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Ordre de grandeur en proportions

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone

Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre

Chapitre II

Tableau II.1 : Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques

Tableau II.2 : Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques

Chapitre III

Tableau III.1 : Dosage des constituants pour 1m^3 de béton

Tableau III.2 : Valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable

Tableau III.3 : Masses volumiques absolue et apparente des granulats

Tableau III.4 : Analyse granulométrique du sable (0/3)

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du gravier (3/8)

Tableau III.6 : Analyse granulométrique du gravier

Tableau III.7 : Les résultats d'affaissement du béton

Tableau III.8 : Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement NF-EN-206/CN

Introduction générale

Introduction générale

L'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de Génie Civil est le béton. Sa mise en œuvre nécessite peu de moyens. Composé de liants, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvant. Quand il s'agit de structures en béton, comme celui-ci résiste mal en traction, il est cousu par des armatures d'acier dans ses parties tendues par la flexion qui permet des contraintes de traction grandement supérieures à celles que peut supporter le béton seul. On a alors un comportement en section fissurée d'un matériau composite.

Au fil des années, le béton a connu des avancées significatives en termes de performances mécaniques grâce à l'incorporation de fibres métalliques, plastiques, et autres, basées sur des thèses et des théories. Ces bétons renforcés de fibres ont été utilisés dans diverses applications telles que les dallages industriels, la réparation de canalisations, les tunnels, les chaussées d'autoroutes ou de parkings aéronautiques,...

Objectif de l'étude :

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement mécanique et l'effet de la température d'un béton renforcé de fibres en aluminium issues de l'industrie de récupération. Des éprouvettes cylindriques et prismatiques sont réalisées pour des essais de traction et de compression afin d'évaluer le comportement à 28 jours. D'autres éprouvettes de mêmes formes sont aussi testées en compression et traction soumises au préalable à des températures de 600 °C et 800 °C. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, de courbes et d'histogrammes puis discutés.

Organisation du mémoire:

Après une introduction générale, ce présent travail est subdivisé en quatre (04) chapitres qui sont présentés comme suit :

Chapitre I: Il est consacré aux généralités sur les bétons et le comportement d'un béton classique, il porte aussi sur la présentation des déchets, et ainsi que les définitions des fibres métalliques et plastiques et leurs influences dans le béton.

Introduction générale

Chapitre II: ce chapitre porte sur les travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température (l'influence de la présence des fibres sur les propriétés physiques et mécaniques du béton ayant subi une hausse de température).

Chapitre III: Ce chapitre présente le matériel et les matériaux utilisés pour la réalisation du Protocol Expérimental. Toutes les étapes de confections des éprouvettes sont soigneusement reportées pour une bonne compréhension. Par la suite, une présentation des différents essais effectués au laboratoire, ainsi que les différents types des bétons étudiés sont présentés.

Chapitre IV: 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.

Pour finir, dans la conclusion générale nous avons résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en évidence les points essentiels de cette recherche.

Chapitre I

Béton à base de déchets

I.1 Introduction :

Le béton est le matériau de construction par excellence depuis presque un siècle. Constitué à l'origine de seulement quatre composants (gravillons, sable, ciment et eau), leurs méthodes de formulation ont évolué d'un savoir-faire empirique vers la science des matériaux. Ces constituants (composants) sont dosés, en fonction de leurs propriétés, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes. Plusieurs associations de matériaux ont été créées, l'un des résultats de ces associations est l'aboutissement à un béton renforcé par des fibres. Dans ce chapitre nous allons aborder les principales connaissances sur le béton ordinaire et son comportement mais aussi celles de béton à base de déchets.

I.2 L'histoire du béton:

I.2.1 Les débuts du béton :

Le béton sous sa forme actuelle est le fruit de plusieurs décennies d'études et d'expérimentations. Les Romains et les Égyptiens utilisaient déjà des matériaux semblables pour leurs constructions. D'ailleurs, l'architecture romaine doit beaucoup à l'opus caementicium (du latin caementum = moellon, pierre brute). Cet ancêtre du béton était formé de mortier et de pierres de toutes sortes. Par sa solidité et sa rapidité de mise en œuvre et associé à d'autres matériaux tels que la brique, il a permis les prouesses architecturales que l'on connaît aux romains. [1]

La basilique de Maxence est une preuve du progrès technique réalisé à cette époque :



Figure I.1 : Une voûte de la basilique de Maxence. [1]

I.2.2 le réveil du béton :

C'est au XIX^{ème} siècle que le béton connu les plus grandes avancées. Ces progrès furent amorcés par *John Smeaton* qui découvrit en 1756 que les chaux effectuant les meilleures prises sont obtenues à partir de calcaire et d'argile et pas seulement de calcaire comme on le pensait jusqu'alors. Puis, à partir de 1812, Louis Vicat commença à caractériser les propriétés des différents ciments en fonction de leur proportion calcaire/ argile. A partir de là, tout alla très vite. De nombreux scientifiques s'intéressèrent à ce nouveau matériau, ainsi en 1824, *John Aspdin* proposa la formule du ciment Portland.

La production industrielle du ciment fut rendue possible moins de 30 ans plus tard notamment grâce à *Demarle, Léopold et Augustin Pavin de Lafarge, Piquety et Vicat*. Premières constructions en béton ne tardèrent alors pas à arriver. L'église St Jean de Montmartre à Paris est l'une des premières constructions en béton. L'architecte *Anatole de Baudot* a eu l'audace de construire entre 1894 et 1904 l'un des premiers bâtiments sacrés en béton armé , il fut d'ailleurs sévèrement critiqué .[1]



Figure I.2 : L'église St Jean de Montmartre à Paris en France. [1]

I.2.3 Un essor considérable :

A partir de ce moment-là, on commença à s'intéresser aux propriétés des différents bétons. On innova dans le but de faciliter sa production et son utilisation mais aussi pour lui conférer de nouvelles caractéristiques. Les avancées scientifiques permirent de voir apparaître au début des années 1980 les premiers bétons à hautes performances. En effet, que ce soit grâce à l'ajout de plastifiants, de fibres ou de grains de plus en plus fins, le béton était devenu plus solide, plus fiable. Son utilisation dans des travaux de grande ampleur permit à ce matériau d'être mieux apprécié du public. Par exemple, le pont de l'Ile de Ré, achevé en 1988, est l'une des premières constructions à utiliser largement les BHP.[1]



Figure I.3 : Le pont de l'Ile de Ré Rivedoux –Plage France.[1]

I.3 Définition du béton :

Le béton est l'association de matériaux hétérogène constitués de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25% à 40% (voir le tableau I.1) du volume total du béton [2]. Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) est la source de la résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pâte pure (ciment, eau),
- D'un mélange granulaire,
- De produits additions

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier :(liant+sable+eau),
- De squelette solide ou granulaire : mélange de granulats.

	Eau %	Air %	Ciment %	Granulats %
Volume	14-22	1-6	7-14	60-75
poids	5-9	/	9-18	63-85

Tableau I.1: Ordre de grandeur en proportions.[2]

I.4 Comportement mécanique du béton:

La résistance mécanique du béton est évolutive, elle augmente beaucoup au cours du premier mois après coulage. On considère que cette valeur est stable et quasi-maximale à 28 jours. De plus le béton subit en générale un certain nombre de traitements chimiques après son séchage selon son utilisation, les contraintes et les intempéries auxquelles il devra faire face. Ces traitements influent sur ses valeurs de résistance.

La résistance des bétons dépend en grande partie du type de sollicitation auxquels ils sont soumis. Les bétons ont de très bonnes valeurs de résistance à la compression de l'ordre en générale de 20MPa à 40MPa mais cela peut être multiplié par dix pour certains types de béton à usage bien spécialisé. La résistance en traction est plutôt une des grandes faiblesses du béton et n'est égale qu'à 10% à 15% de la résistance en compression. La résistance en flexion est usuellement définie par une valeur légèrement inférieure à la racine carrée de la résistance en compression. La résistance en torsion du béton dépend d'une autre valeur appelée le module de rupture et de la dimension de l'élément. La résistance en cisaillement du béton est

d'environ 5% de la résistance en compression. Le module de Young pour le béton standard varie de 15 000 Pa à 42 000 Pa. Pour les autres types de béton, il augmente avec la valeur de la résistance à la compression.

I.5 Définition du déchet :

Le mot «*déchet*» désigne tout matériau rejeté comme n'ayant pas une valeur immédiate ou laissé comme résidu d'un processus ou d'une opération. On nomme “déchets industriels” ceux qui ne peuvent ni être admis en décharge ni être ramassés avec les ordures ménagères en raison de leur quantité ou de leur toxicité). Selon la loi cadre du 15 juillet 1975, est appelé déchets 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.[4]

I.6 Déchets utilisés comme granulats du béton:

I.6.1 Laitiers de haut fourneau :

Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers. [5]

I.6.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques [5]:

a. Les cendres volantes :

Les exigences relatives aux cendres volantes pour bétons sont régies par la norme NBN EN 450-1. Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40 MN/m² et une masse volumique d'environ 1100 à

1800 kg/m³. Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger.

b. Mâchefer :

Le mâchefer est le résidu de l'incinération du charbon ou des déchets dans les usines, étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé.

I.6.3 Déchets de construction et de démolition :

L'utilisation des granulats de béton recyclés issus de la démolition d'anciens ouvrages pour construire de nouveaux ouvrages est une solution intéressante pour préserver l'environnement. Elle permet de minimiser l'emploi des matériaux naturels et d'éviter la mise en décharge des déchets. De nombreux pays ont réalisé des études sur le sujet et ont fait évoluer leur réglementation en la matière [6]. Les déchets de construction et démolition sont principalement : Béton, brique, bois, plastique, métaux... etc.

I.7 Les fibres dans le béton :

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelques centimètres dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

La fibre a pour rôle d'accroître les propriétés mécaniques du composite comme la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Elle est souvent sous forme filamentaire [3]. En fonction des utilisations, les renforts peuvent être de diverses natures: végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Les fibres sont fortes généralement elles possèdent une bonne résistance à la traction mais une résistance faible à la compression, ce qui leur confère une grande souplesse.

Leur rôle principal est le renforcement des structures en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation (figure. I.5).Elles permettent:

- ✓ L'augmentation de la ductilité et le comportement post fissuration;

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

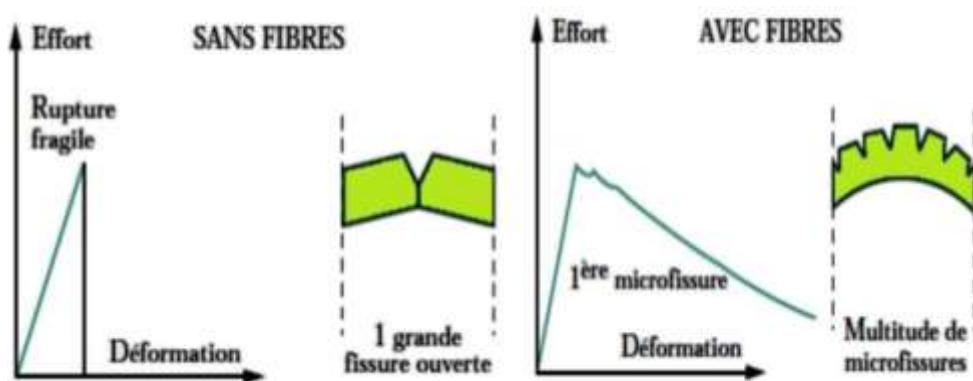


Figure. I.4 : Rôle des fibres dans la fissuration. [3]

Les fibres sont commercialisées essentiellement sous forme de fibres courtes (les feutres ou les mats) ou fibres longues (coupées au moment de la fabrication du matériau). Les fibres peuvent se présenter sous forme linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridimensionnelle). *Berreur* et al ont synthétisé les principaux renforts, par schéma suivant (figure I.6).

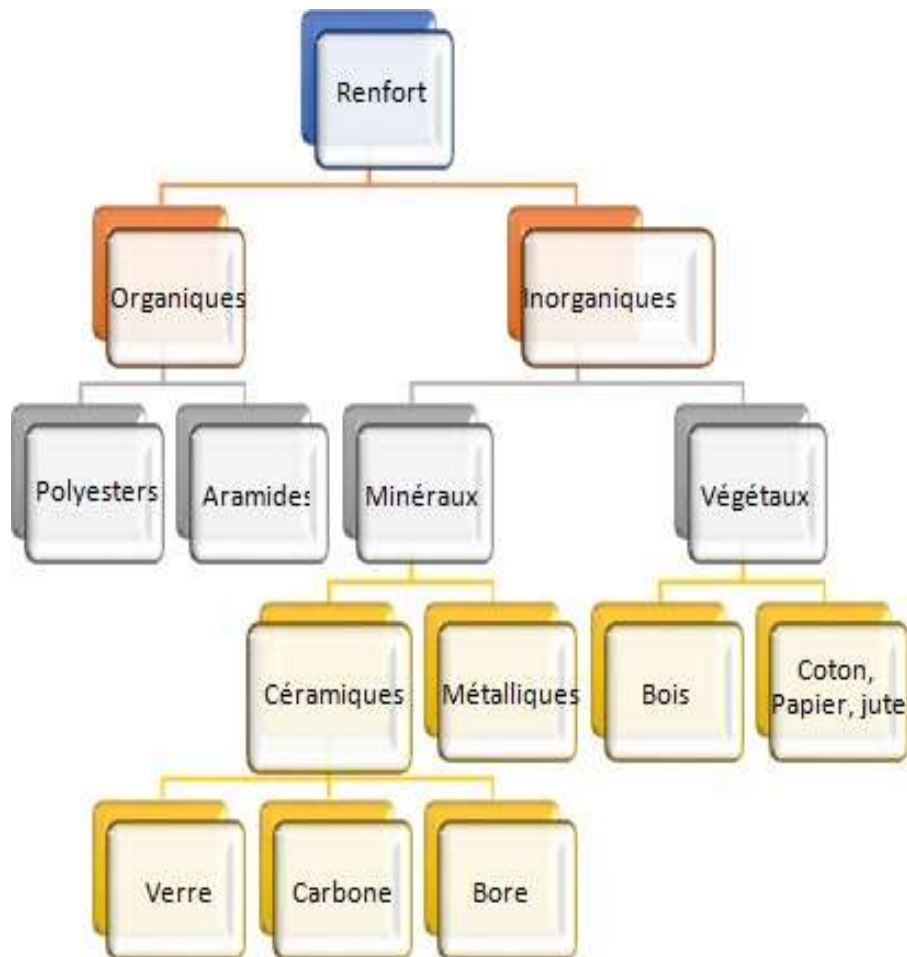


Figure I.5: Les différents types de renfort. [7]

Les renforts diffèrent par la forme (architecture) et la nature qui peut être organique ou inorganique.

I.8 Les différents types de fibres :

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont:

I.8.1 Fibres minérales :

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation et l'ignifugée, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes [8].



Figure I.6 : Fibres minérales

I.8.2 Fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales: les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois) [9].



Figure I.7 : Fibres végétales [10]

I.8.3 Fibres synthétiques :

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, acryle, polyester ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne.

Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acryliques, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balles, les fuselages et ailes d'avion [8].



Figure I.8 : Fibres synthétiques [8]

I.8.4 Fibres de carbone :

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre. Moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes. Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur. On distingue deux types de fibres : les types hauts modules soient les classes UHM (Ultra Haut Module) et HM (Haut Module).

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection. Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes [11].



Figure I.9 : Fibres de carbone [11]

Type de carbone	H.R.	H.M.
Diamètre D (mm)	8	8
Masse Volumique ? (g/cm ³)	1.75	1.81
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	3000 - 5000	2800
Module d'Young E (GP a)	220	400

Tableau I.2: Propriétés mécaniques des fibres de carbone [11]

I.8.5 Fibres d'amiante :

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bâchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes: voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur [12].

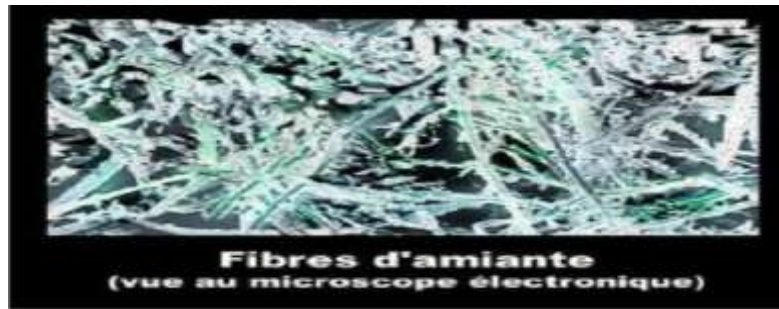


Figure I.10: Vue microscopique de fibres d'amiante [12].

I.8.6 Fibres de cellulose :

Les fibres de cellulose sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme un additif au ciment d'amiante et non pas comme un renfort. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments . Leurs propriétés physiques sont changeables selon les modes de fabrication de ce type de fibres. Les diamètres de ces fibres varient de 1 à 4 mm, tandis que leurs longueurs comprises entre 10 à 50 mm, alors que l'élanement peut être dans les environs de 100. Leurs résistances en traction varient entre 10 et 30 MPa. Elles sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance mécanique d'un composite. Cette amélioration est réalisée essentiellement par le freinage des fissures [8].

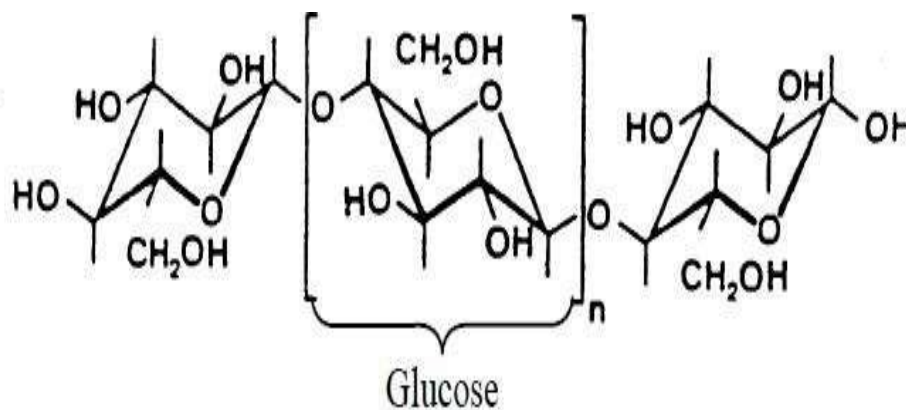


Figure I.11 : Molécule de la cellulose.[13]

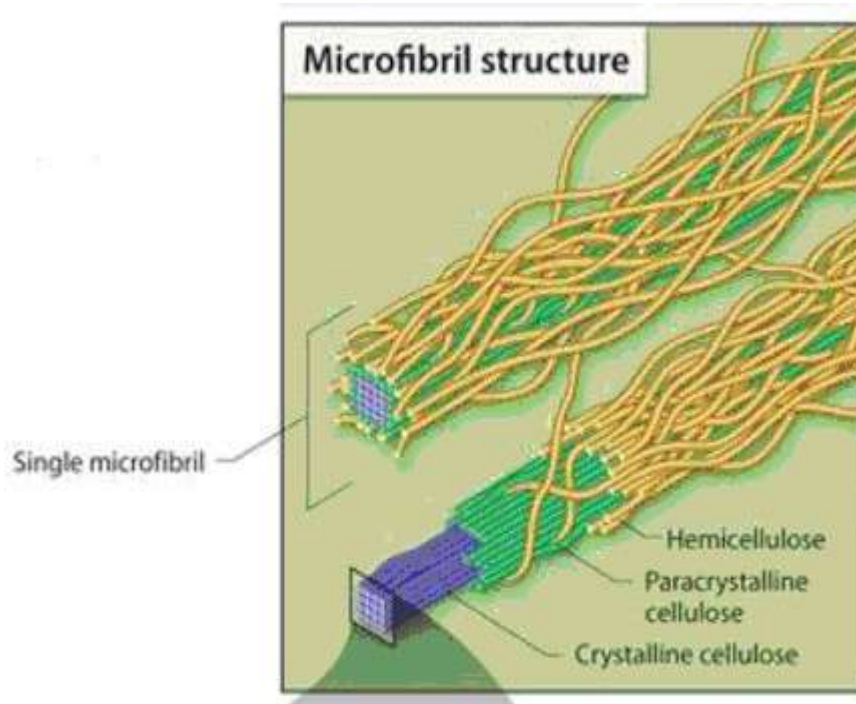


Figure I.12 : Structure de la microfibrille de cellulose [13]

I.8.7 Fibres de polypropylènes :

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants: bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée. Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux [8].



Figure I.13: Fibres de polypropylène [14]

I.8.8.1 Influence des fibres de polypropylène sur la tenue au feu des bétons :

Le béton est un matériau poreux qui renferme de l'eau dont une partie correspond à de l'eau excédentaire nécessaire à l'ouvrabilité à l'état frais. En cas d'élévation importante de la température, l'eau, restée prisonnière, se transforme en vapeur. Dans le cas des bétons particulièrement compacts, l'élévation de la température est susceptible de créer des contraintes internes pouvant entraîner un écaillage du béton en surface.

L'incorporation de fibres polypropylène (1 à 3 kg/m³) dans le béton dont la compacité est particulièrement élevée permet d'améliorer leur tenue au feu. Les observations montrent que les fibres fondent lorsque les températures atteignent 140 à 170 °C. Elles créent ainsi en fondant un réseau tridimensionnel constitué d'une multitude de petits capillaires connectés (réseaux de drains) susceptibles de permettre à la vapeur d'eau de s'échapper évitant ainsi les surpressions. Ce phénomène constitue un moyen efficace pour limiter l'écaillage de surface d'un béton soumis à une élévation de température excessive.

I.8.9 Fibres de verre :

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois

types: La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate [12].



Figure I.14: Fibre de verre [12].

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture s_{ra} (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique ρ (g/cm ³)	2.54	2.55	2,54

Tableau I.3: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [12].

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes:

- bonne adhérence avec la matrice,
- disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...),
- bonne résistance à l'humidité et à la corrosion,
- conductivité thermique relativement faible [12].

I.8.10 Fibres métalliques :

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du Génie Civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance

d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre, ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm [8].



Figure I.15: Différentes formes de fibres [15]

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont le plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1 mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celles commercialisées par la société Bekaert sous la marque "Dramix" ou des fibres ondulées telles que celles commercialisées par la société Trefil Arbed. Cette société fabrique également une fibre commercialisée sous la marque "Twin-set" qui possède un cône indéformable à chacune de ses extrémités. Ce type d'ancrage est beaucoup plus rigide que l'ancrage obtenu par des crochets ou des ondulations.

I.8.10.1 Influence des fibres métalliques dans les bétons structuraux :

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique d'un béton de structure. En effet, elles contribuent à la réduction de la largeur des fissures dans la matrice béton (limitation de l'ouverture des fissures et répartition de la microfissuration). Elles se substituent partiellement aux armatures traditionnelles. Dans certains cas, pour des

bétons subissant de faibles sollicitations, elles peuvent même remplacer complètement les armatures. Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture.



Figure I.16 : Fibres métalliques [16].

I.9 Comportement des bétons renforcés de fibres métalliques :

Si l'on applique un effet de traction au béton fibré, il se comporte avant rupture selon trois phases :

- les fibres et le béton agissent ensemble dans une phase élastique ;
- des microfissures se produisent, l'effort de traction est repris par les fibres qui limitent la propagation de la fissuration ;
- les fissures se développent, les fibres perdent leur adhérence avec la matrice.

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

des caractéristiques mécaniques post-fissurations au béton. Du fait de leurs propriétés, permettent de réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs, ainsi que l'amélioration de la résistance en traction.

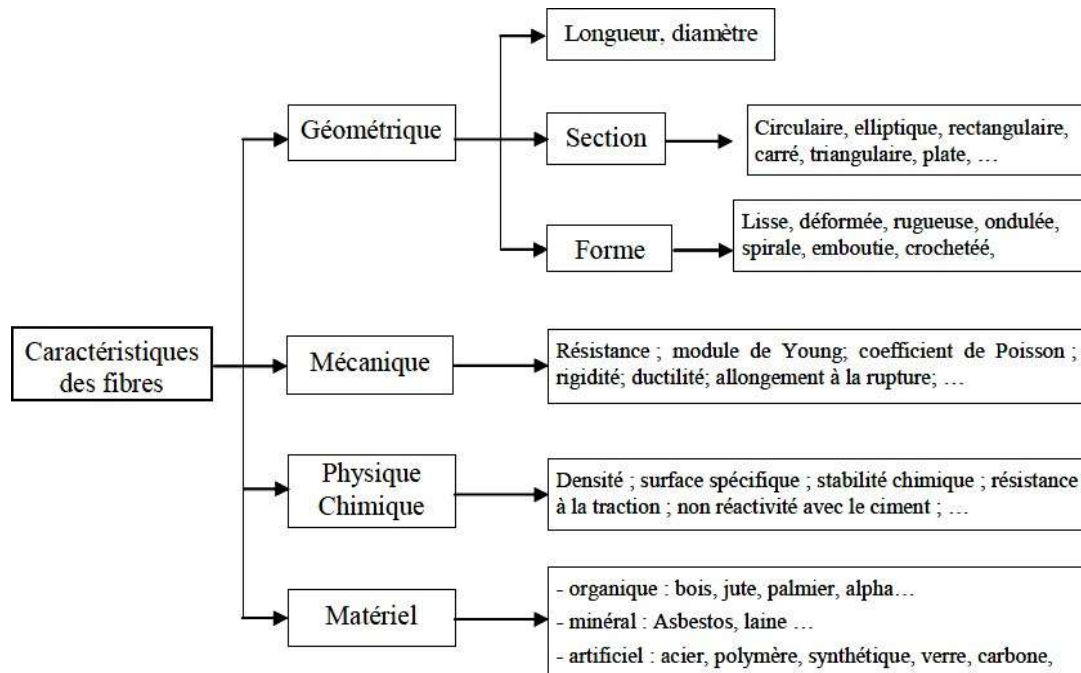


Figure I.17: Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres [17].

I.10 Applications des bétons de fibres :

Parmi les principales applications à base de béton de fibres on peut citer [18-19] :

- Les structures hydrauliques et portuaires, barrages, retenues d'eaux,
- Pistes d'atterrissage, revêtements de voies et parking, quais d'entrepôts,
- Bétons projetés (tunnels, pentes) et pieux forés, plates-formes de ponts,
- Panneaux de façades, corniches, cloisons...,
- Éléments préfabriqués de structure (voussoirs, pannes...),
- Plancher industriel, coque de coupole, chapes,
- les structures soumises à des explosions et les ouvrages parasismiques.



Figure I.18: Exemples d'applications du béton de fibres [18].

I.11 Conclusion :

Plusieurs types de fibre sont utilisés pour renforcer le béton dans le cadre de développement des matériaux de construction qui respecte l'environnement « eco-friendly » en raison des avantages prometteuses que prenante leur propriété (mécanique, chimique) ainsi que l'aspect écologique en plus de leur disponibilité, les fibres sont aujourd'hui de plus en plus utilisées .

Les fibres font par conséquent partie de la nouvelle génération de matériaux de renforcement de béton et peuvent être incorporées dans diverses matrices pour en faire des matériaux plus écologique, légers et faible coût.

Chapitre II :

Comportement thermique du béton

II.1 Introduction :

Le béton est un des matériaux très utilisés pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de génie civil. En situation d'incendie, malgré son meilleur comportement à la température ambiante, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. Les incendies de tunnels sous la Manche (1996 et 2008) en France, Tauern (1999) en Autriche ou Saint-Gothard (2001) en Suisse sont les exemples illustrant l'endommagement du béton soumis à une température élevée.

II.2 Différentes formes d'endommagements thermiques :

En cas d'incendie de bâtiments, de tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du Béton peut se présenter sous diverses formes [20].

- **Eclatement explosif:** ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.
- **Eclatement de surface :** couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats :** cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement d'angle :** il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats :** ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.



Figure II.1 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre 2001, thèse doctorat 2007 Annaba.

II.3 Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton :

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'éclatement du béton. Une des causes principales de l'instabilité thermique du béton est la pression de vapeur dans les pores [21].

- **Teneur en eau** : elle joue un rôle principal dans la formation de pression de vapeur. Des travaux de recherche de [22, 23], montrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement [24] ont montré, dans le cadre de travaux de l'influence de teneur en eau sur l'endommagement de BHP, une faible fissuration sur des échantillons de teneur en eau inférieure à 2.6%.
- **Propriétés physico-mécaniques du matériau (densité, perméabilité,**

résistances) :

Les travaux de [25, 21, 26, 27] montrent qu'un BHP caractérisé par un faible rapport Eau/Liant est plus sensible à l'éclatement. La faible perméabilité du BHP rend difficile le transfert de fluide engendrant de fortes pressions de vapeur lors de la montée en température .

- **Vitesse de chauffage** : plus elle est élevée, plus le risque d'instabilité thermique du béton est important. L'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'écaillage/ éclatement du béton. Des travaux de recherche de [28] sur l'instabilité thermique du BHP ont montré qu'à la vitesse de chauffage de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, des éprouvettes cylindriques (16x32cm) ont éclaté à une température de surface voisine de $300 - 350^{\circ}\text{C}$. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ n'ont pas éclaté. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement.
- **Taille des éprouvettes** : un effet d'échelle est remarqué sur le comportement de diverses sections d'éprouvettes de béton. Des tests de chauffage réalisés par [25] sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm et 11x22 cm, ont montré plus d'éclatement avec les éprouvettes 16x32cm. La mesure de la perte de masse des éprouvettes au cours du chauffage a conduit à un séchage plus rapide des échantillons 11x22cm. Cette perte de masse peut atténuer la pression de vapeur et limiter l'éclatement.
- **Nature des granulats** : le comportement des granulats est fortement lié à leur nature chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires [29, 30, 20]. En dehors de ces différents paramètres, la présence d'un chargement mécanique, surtout celle de la précontrainte, favorise dans certains cas le phénomène d'éclatement [31, 32].

II.4 Déformations thermiques du béton :

Le béton est composé d'une matrice cimentaire et de granulats. L'étude de la déformation thermique du béton nécessite de connaître comment se déforme chacun de ces composants.

II.4.1 Déformation thermique de la pâte cimentaire :

L'analyse de la déformation thermique de la pâte de ciment montre que celle-ci se décompose en une phase d'expansion et une phase de retrait. Les travaux menés par [31] sur la

déformation thermique de différentes pâtes de ciment ont montré que le comportement n'est pas lié à la nature de la pâte. L'expansion thermique est observée jusqu'à la température 150°C pour les trois pâtes utilisées. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements et à la dilatation volumique des molécules d'eau ainsi qu'à la réduction des forces capillaires de l'eau du fait que la température augmente (32, rapporté par [33] ; [34], rapporté par [30]). Au-delà de la température de 150°C, la pâte de ciment subit un retrait qui devient très important au-delà de la température de 300°C. Le retrait est lié au départ de l'eau contenue dans le matériau.

II.4.2 Déformation thermique des granulats :

Les granulats ont un comportement différent de celui de la pâte de ciment. Au cours du chauffage, les granulats se dilatent. Cette expansion thermique dépend de la nature minéralogique des roches notamment de leur teneur en silice. Le granulats calcaire a un coefficient d'expansion thermique plus faible que celui du granulats de nature siliceuse mais plus haute que le granulats de basalte [35, 36, 37].

les évolutions de l'expansion thermique de différents granulats (des granulats contenant principalement des minéraux quartzites : gneiss, granite, granodiorite ; granulats de basalte). Tous les granulats se dilatent avec la montée de la température. Durant la phase de refroidissement, leur expansion thermique est irréversible. Les granulats contenant principalement des minéraux quartzites présentent une accélération rapide d'expansion thermique après 570°C. Ce phénomène a été attribué à la transformation de structure du quartz α en quartz β entraînant un gonflement [37]. Schneider constate qu'avec le granulats de basalte, grâce à sa structure cristalline fine par rapport à la structure cristalline plus importante du granulats quartzite, sa déformation thermique est plus faible.

II.4.3 Déformation thermique du béton :

Le béton est composé majoritairement de granulats. Les travaux de [38] sur une étude comparée de déformation thermique de la pâte de ciment par rapport à celle du béton contenant des granulats d'origines diverses, montrent que la déformation thermique du béton est fortement liée à la nature des granulats qui constituent son squelette. La dilatation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéairement dépendante de la température. D'autres études menées par [39] et [30] sur les bétons de granulats calcaire et

silico-calcaire ont montré une forte dilatation thermique des bétons de granulats silico-calcaire au delà de la température 300°C. Autour de 600°C, il y a une accélération de la dilatation thermique des bétons de granulats calcaire liée à la transformation du quartz du sable. Néanmoins, la dilatation thermique du béton de granulats silico-calcaire est approximativement 2,5 fois plus élevée que celle des bétons de granulats calcaire. Le granulats silico-calcaire possède un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui de granulats calcaire .

Après refroidissement, le béton de granulats silico-calcaire présente une déformation résiduelle trois fois plus élevée que celle des autres bétons étudiés. Ce phénomène est attribué à la fissuration générée au sein du matériau du fait de l'incompatibilité de déformation entre la pâte cimentaire (retrait) et les granulats (dilatation) au delà de la température 400°C. L'ouverture de ces fissures pendant le cycle de chauffe est maintenue après refroidissement jusqu'à la température ambiante. Ceci explique la déformation résiduelle liée à la phase de refroidissement [30, 39].

L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment génère à l'interface pâte – granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. Ce comportement opposé granulats – pâte de ciment pourrait donc engendrer l'endommagement du matériau béton.

II.5 EVOLUTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON AVEC LA TEMPÉRATURE :

La sollicitation thermique sur le béton provoque une diminution graduelle des propriétés mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou à froid. Les pertes de résistance varient en fonction de la température, de la vitesse de montée en température et du type de béton. Les principales caractéristiques mécaniques présentées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité.

Résistance à la compression :

Pour caractériser un béton, il est nécessaire de connaître sa résistance à la compression. Généralement, une baisse de la résistance à la compression est observée au cours du chauffage.

De nombreux essais montrent une diminution de la résistance à la compression du béton entre 20 et 80°C. Khoury (40) suppose que cette baisse de résistance résulte de la réduction des forces de cohésion Van der Waals entre les feuillets de CSH qui conduirait à la formation de groupes silanol (Si-OH--HO-Si). Ces groupes présentent des forces de liaison plus faibles que les groupements siloxane (Si-O-Si). Ensuite, à partir de 80°C, le processus de séchage induit la réaction suivante : $\text{Si-OH--HO-Si} \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}$ et provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment. En dépassant le seuil de 300°C, le béton ne contient plus d'eau et la résistance baisse progressivement sous l'effet de la température.

Plusieurs études regroupent en deux zones le comportement résiduel du béton à la compression : De la température ambiante à 250°C (400°C) : une légère baisse, un maintien

- ou une augmentation de résistance est observée (41, 42, and 43), (25), (44). De 250°C (400°C) à 600°C : une chute de la résistance à la compression est notée

- (39), (45). La variation des propriétés mécaniques des bétons évolue différemment selon que l'essai soit

La variation des propriétés mécaniques des bétons évolue différemment selon que l'essai soit réalisé à chaud ou à froid (essai résiduel). La Figure .2 présente une évolution de la résistance à la compression relative du même béton à chaud et à froid. Nous constatons que la résistance à chaud est supérieure à la résistance résiduelle pour toutes les températures après 150°C. Ceci peut être expliqué par un endommagement supplémentaire du béton au cours du refroidissement (réhydratation de la chaux, décomposition des granulats, changement du signe de gradient thermique) (46).

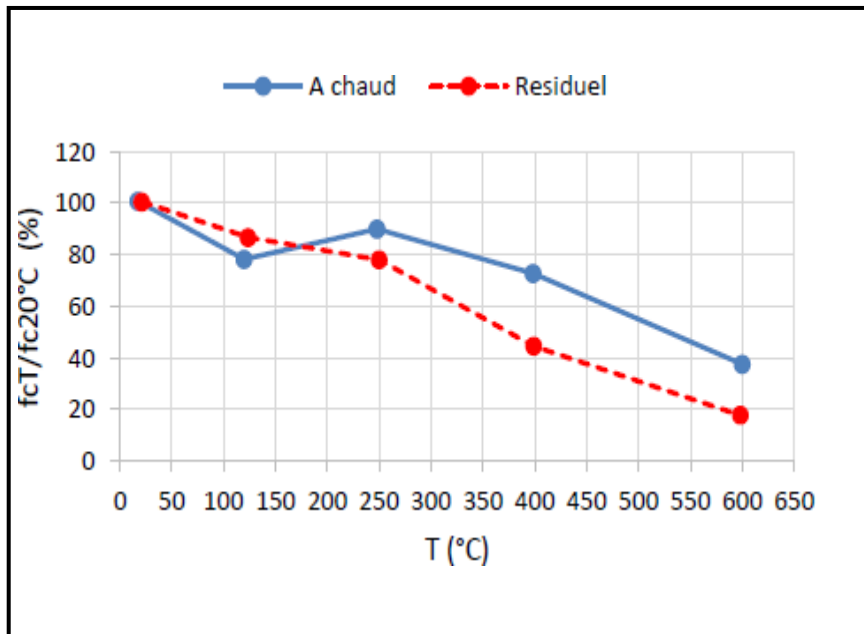


Figure II.2 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid), (46).

Résistance à la traction :

Lors des incendies, des microfissurations apparaissent sur les parties sous tension de la structure. Une résistance élevée à la traction permet de limiter les dommages structurels de l'élément en limitant la propagation des fissurations notamment lorsque le processus d'écaillage est entamé. Comme dans le cas de la résistance à la compression, les résultats de la littérature affirment que la résistance à la traction résiduelle des bétons diminue sous le traitement thermique (28), (47), (48), (49), (50), (51). Kanema (25) a étudié l'évolution de la résistance à la traction résiduelle sur des bétons de différents dosages en ciment (B325 ($f_c = 39$ MPa), B350 ($f_c = 45$ MPa), B400 ($f_c = 53$ MPa), B450 ($f_c = 60$ MPa) et B500 ($f_c = 72$ MPa) (Figure 19) . Les bétons à faible rapport E/C (B450 et B500) présentent une réduction plus importante de leur résistance à la traction comparativement au béton à fort rapport E/C (B325). La diminution de la résistance résulte d'une déstructuration de la matrice cimentaire et plus particulièrement de la déshydratation de l'auréole de transition avec l'augmentation de la température. L'auteur conclut que la baisse de la résistance à la traction résiduelle des bétons dépend du rapport E/C initial et de la sollicitation thermique imposée .

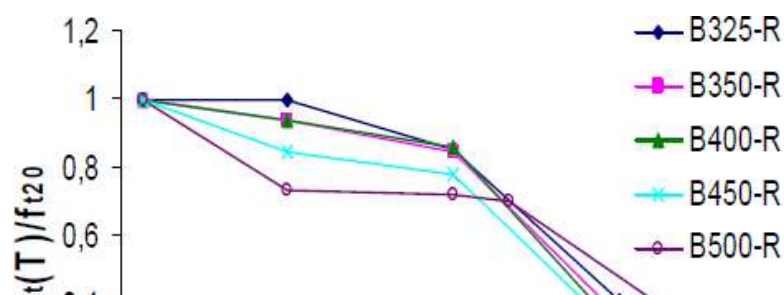


Figure II.3 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des bétons chauffés, (Kanema 2007) (vitesse de chauffage est de 1°C/min.

II.6 Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée :

L'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton porté à une haute température montre pour certains auteurs une instabilité thermique à une température peu élevée (inférieure à 200°C) ou une instabilité retardée (à partir de 800°C). Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine des différences observées : le mode de cure des éprouvettes (éprouvettes sèches ou saturées), la vitesse de chauffage, la teneur en fibres qui semble être un facteur prépondérant. Plus la teneur en fibres métalliques est élevée, plus il y aura un risque de répartition hétérogène des fibres voire la floculation des fibres. La forte quantité de fibres peut aussi générer un gradient thermique supplémentaire qui engendrerait le phénomène d'instabilité thermique. Les résultats des travaux de [52] montrent que l'ajout de 0.25% et 0.5% de fibres métalliques ne permet pas d'améliorer de façon significative les propriétés mécaniques résiduelles du béton chauffé jusqu'à 400°C. L'influence positive des fibres métalliques est observée. Cette amélioration peut être retardée et disparaître à partir d'un seuil de température. Les résultats notamment sur l'amplitude du gain apporté par les fibres métalliques varient suivant les auteurs. Une convergence des résultats de l'influence des fibres métalliques sur le comportement résiduel du béton n'apparaît pas encore à travers la littérature.

Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres. On observe une diminution plus importante après le chauffage à 150°C ; la perte de masse des bétons C2 et CS2-20 est respectivement 2.5% et 1.3%. Cette variation peut

être due à la précision de la température de chauffage du four (au palier de 150°C).

Au-delà de la température 150°C, on remarque toujours une diminution de perte de masse des bétons de fibres métalliques mais moins importante. Après le chauffage à 600°C, les pertes de masse des bétons C2, CS2-20, C3 et CS3-20 sont respectivement 8.1%, 8.3%, 7.2% et 6.9%. Cette variation de perte de masse semble être liée à la quantité de fibres. La composition des bétons de fibres métalliques est obtenue par substitution volumique d'une partie des granulats. Les granulats sont humides au moment de la fabrication du béton. Le remplacement d'une partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée. La quantité d'eau pouvant être absorbée par les granulats substitués varie de 0.1 à 0.2% pour le béton C2 et de 0.2 à 0.4% pour le béton C3. La baisse de perte de masse au-delà du chauffage à 150°C se retrouve dans cet ordre de grandeur. La perte de masse des bétons CS3 est inférieure à celle des bétons CS2. À la température 600°C, la perte de masse du béton CS3-30 est de 6.8% et celle du béton CS2-30 est de 8.2%.

II.6.1 Résistance en compression :

Le tableau II.1 résume les valeurs des résistances résiduelles et relatives en compression des différents bétons de fibres métalliques CS2 et CS3. Chaque valeur est la moyenne réalisée sur trois éprouvettes. Les figures 5.6 et 5.7 montrent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température de chauffage des bétons CS2 et CS3. La résistance en compression des bétons de fibres métalliques baisse avec l'augmentation de la température de la même manière que pour les bétons sans fibres et avec les fibres de polypropylène : peu de perte, voire un gain de résistance avant 300°C, puis une chute rapide de résistance.

Les bétons de fibres métalliques présentent de meilleures résistances résiduelles en compression à la température ambiante que le béton sans fibres. Ce gain de résistance est plus remarquable avec les bétons CS3. On note une influence de la variation de la proportion de fibres. Cette amélioration de la résistance en compression des bétons de fibres métalliques est observée pour tous les cycles de chauffage-refroidissement. Les résistances des bétons C2 et C3 restent toujours inférieures à celles des bétons CS2 et CS3 (tableau II.1) Après chauffage à 450°C, contrairement aux bétons sans fibres ou avec les fibres de polypropylène, les bétons de fibres métalliques conservent plus de 50% de leur résistance initiale. La résistance résiduelle relative moyenne des bétons CS2 est de 65% et celle des bétons CS3 est de 57% (C2

: 44% et C3 : 38%). Le gain de résistance résiduelle en compression est quasiment du même ordre de grandeur pour les deux familles de bétons de rapports E/C différents. Le gain de résistance relative est de 21% pour le béton CS2 et 18% pour le béton CS3 après chauffage à 450°C.

Après chauffage à 600°C, la résistance relative des bétons CS2-20 et CS3-20 est respectivement de 16% et 19%. Avec un dosage minimum de 20 kg/m³ de fibres métalliques, la résistance résiduelle s'améliore (C2 : 12% et C3 : 13%). La résistance résiduelle augmente avec le dosage en fibres. La résistance résiduelle relative des bétons CS2-40 à la même température est de 25% .

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	48.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	Ecart type	57.9	51.2	56.0	38.3	9.0
CS2-20	Ecart type	2.0	1.8	3.9	2.8	0.5
	(%)	100	89	97	63	16
CS2-30	MPa	57.7	46.8	54.8	37.5	10.2
	Ecart type	3.3	1.5	0.9	0.4	0.1
CS2-40	(%)	100	81	95	65	18
	MPa	55.9	44.8	52.1	37.7	13.9
CS2-40	Ecart type	0.4	1.8	1.4	0.8	0.3
	(%)	100	80	93	67	25
C3	MPa	70.2	62.6	59.6	26.9	9.3
	Ecart type	69.7	69.9	71.3	43.5	13.4
CS3-20	Ecart type	4.9	3.4	3.1	2.7	0.3
	(%)	100	100	102	62	19
CS3-30	MPa	74.7	67.8	73.8	36.8	13.1
	Ecart type	1.6	0.8	0.5	2.4	1.1
CS3-40	(%)	100	91	99	49	20
	MPa	77.9	69.4	79.1	46.5	14.6
CS3-40	Ecart type	2.0	1.7	1.9	2.6	0.3
	(%)	100	89	102	60	19

Tableau II.1 : Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques [22].

II.6.2 Résistance en traction par flexion :

Le tableau II.2 rassemble les valeurs moyennes des résistances résiduelles et relatives en traction par flexion mesurées sur des éprouvettes prismatiques de section 10x10x40 cm.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	MPa	5.1	4.3	4.6	2.6	1.4
CS2-20	Ecart type	0.7	0.2	0.7	0.3	0.2
	(%)	100	84	91	52	28
CS2-30	MPa	6.4	4.4	4.8	4.0	1.7
	Ecart type	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
CS2-40	MPa	5.8	5.3	5.3	3.5	2.4
	Ecart type	0.8	0.9	1.7	0.1	0.4
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	MPa	7.2	5.6	6.2	3.8	2.5
CS3-20	Ecart type	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4
	(%)	100	77	86	52	35
CS3-30	MPa	6.7	6.9	5.4	3.1	2.4
	Ecart type	0.1	0.4	0.2	0.0	0.4
CS3-40	MPa	7.2	7.9	5.9	5.2	2.7
	Ecart type	0.1	0.9	0.9	0.7	0.3
CS3-40	(%)	100	109	83	73	38

Tableau II.2: Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques [53].

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les travaux de recherche réalisés sur l'influence de la présence des fibres métalliques dans le béton sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton soumis à haute température.

Chapitre III

Présentation des matériaux et
essais réalisés

III.1 Introduction :

Ce chapitre concerne le protocole expérimental élaboré dans le but d'évaluer le comportement mécanique d'un béton de fibres, issues de déchets en aluminium. Les essais sont réalisés au sein laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Toutes les étapes sont présentées dans un ordre chronologique bien précis. Les différents matériaux nécessaires pour la confection de ce béton ainsi que leurs caractéristiques sont soigneusement déterminées. Les techniques expérimentales mises en œuvre pour caractériser leurs performances mécaniques ainsi que les appareillages sont aussi illustrés sous forme de figures et images. Pour évaluer l'influence de la température sur ce type de béton, des essais de flexion par trois points et des essais de compression sur les différents spécimens sont réalisés après soumission des éprouvettes sous haute température dans un four à 600⁰C et 800⁰C.

La démarche entreprise dans cette étude représente une des perspectives des essais expérimentaux de *ABDELMADJID Bilal [53]* sous la direction de *Prof. KHELOUI Fatma*, elle concerne l'évaluation du comportement mécanique d'un béton fibré soumis à de hautes températures. En effet pour les besoins des ses essais mécaniques de compression et de traction, il a étudié l'influence de la forme (droite et ondulée), du pourcentage (0.3% et 1%) et de la longueur (3cm et 5cm) de ces même fibres en aluminium sur le comportement mécanique de ce béton. Les résultats des essais de résistance sur ce type de béton ont montré que la meilleure variante est l'utilisation de fibres de 3 cm de forme ondulée avec un pourcentage de à 0.3% [53].

III.2 Types d'éprouvettes utilisées :

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

- Des éprouvettes de forme cylindriques normalisées de dimensions (10×20) cm², la norme NF P 18-400, NA 2600 utilisée pour la détermination des résistances à la compression.
- Des éprouvettes prismatiques normalisées (NF P18-400, NA2600) de dimensions (7x7x28) cm³ pour la détermination des résistances à la flexion trois (03) points.

III.3 Caractéristiques des matériaux :

III.3.1 Le ciment :

Nous avons utilisé un seul type de ciment dans tous nos essais qui est un ciment de type CEMII de classe de résistance 42,5, il provient de la cimenterie SPA BISKRIA CIMENT.



Figure III.1 : Le ciment utilisé 42.5 R

III.3.2 Le sable :

Le sable utilisé pour tous les mélanges provient de l'oued Sebaou, 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.

Sable lavé

sable séché à l'étuve

sable sec



Figure III.2 : sable utilisé

III.3.3 Les granulats :

Les granulats sont de natures concassées à (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 à l'intérieur du laboratoire (granulats sec et propres).



Figure III.3: Gravier 8/15

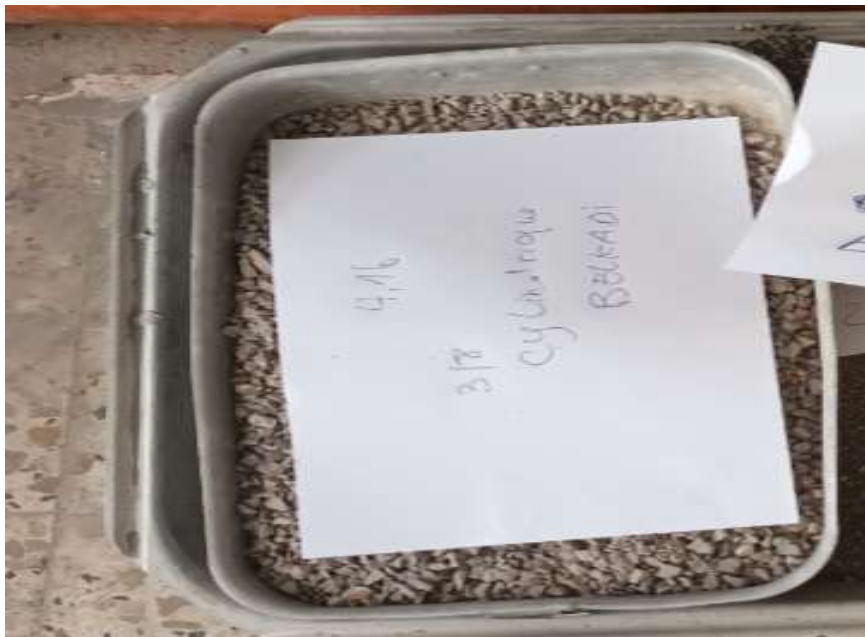


Figure III.4 : Gravier 3/8

III.3.4 L'eau :

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet, cette eau doit être très propres (eau potable). Le tableau III.1, résume les fractions massiques calculées par la méthode DREUX-GORISSE, pour les différents constituants du béton utilisé dans notre expérience.

Composants	Masse en Kg
Ciment	400
Sable	677.6
Gravier 3/8	225.86
Gravier 8/15	903.49
Eau	200

Tableau III.1: Dosage des constituants pour 1m³ de béton.

III.3.5 Les adjuvants :

Les adjuvants pour béton sont des substances ajoutées au mélange de béton pour améliorer certaines propriétés du matériau. Les adjuvants peuvent aider à optimiser la dispersion et l'ancrage des renforts 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 fluidifiant permet d'augmenter l'ouvrabilité du béton en diminuant la porosité du matériau.
- Pour les essais de laboratoire nous avons utilisé un fluidifiant commercialisé sous le nom Sika Plast BV 40+.



Figure III.5 : Fluidifiants Sika Plast BV 40+.

III.3.6 Les renforts :

Les renforts utilisés dans notre recherche sont les fibres en aluminium , issues de l'industrie de récupération. Ces fibres utilisées, pour la confection du béton, sont des fibres en aluminium provenant de la récupération de canettes en aluminium. Ces déchets sont collectés dans la nature, lavées, séchées puis coupées à l'aide d'une cisaille en forme de fibres de géométrie ondulées avec une longueur de 3 cm.



Figure III. 6: La canette



Figure III.7: Fibres en aluminium ondulées 3cm.

III.3.6.1 Caractéristiques des fibres :

La valeur de la masse volumique a été déterminée au laboratoire comme suite :

$$\rho = M / V_2 - V_1$$

Avec :

- M : masse d'une quantité de fibres(g).
- V_2 : volume d'eau après l'ajout de fibre dans le tube (cm^3).
- V_1 : volume d'eau initial (cm^3).

$$\rho = 50 / (131-100) = 1.61 \text{ g/cm}^3$$

➤ Dosage des fibres :

➤ éprouvettes cylindriques:

Le volume de l'éprouvette est :

$$V_C = \pi * r^2 * h = 3.14 * 5^2 * 20 = 1570 \text{ cm}^3$$

Le volume pour 0.3% :

$$1570 * 0.3 / 100 = 4.71 \text{ cm}^3$$

$$\rho = M/V \quad \text{donc} \quad M = \rho * v$$

$$M = 1.61 * 4.71 = 7.5831 \text{ g}$$

Pour 9 cylindres :

$$9 * 7.5831 = 68.248 \text{ g}$$

➤ **éprouvettes prismatiques:**

Le volume de l'éprouvette est :

$$V_C = L * l * h = 7 * 7 * 28 = 1372 \text{ cm}^3$$

Le volume pour 0.3% :

$$1372 * 0.3 / 100 = 4.116 \text{ cm}^3$$

$$M = 1.61 * 4.116 = 6.627 \text{ g}$$

Pour 9 prismes :

$$9 * 6.627 = 59.64 \text{ g}$$

III.4 Caractérisation du sable :

III.4 .1 Essai équivalent de sable :

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable, le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier ; L'essai d'équivalent de sable est déterminé selon la norme NFP 18-598.

- **Principe de l'essai :**

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer le coefficient d'équivalence du sable qui quantifie sa propreté. Pour cet essai on a besoin d'une éprouvette graduée munie d'un bouchon en caoutchouc, d'un agitateur manuel et d'un piston avec un poids bien défini.



Figure III.8 : Agitateur manuel.

On pèse un échantillon de sable de 120g. Entre-temps, on remplit l'éprouvette graduée avec de l'eau jusqu'au trait repère inférieur figurant sur l'éprouvette puis on verse les 120 g du sable dans cette dernière et on attend quelques minutes. On ferme avec le bouchon et on fixe sur la machine d'agitation de façon horizontale, en théorie 90 fois en 1min. On finit par remplir l'éprouvette d'eau jusqu'au trait supérieure puis on laisse reposer pendant 20 min sans perturbation. A l'issue de ce délai, on mesure la hauteur totale (sable+fines) qu'on appellera h_1 et la hauteur du sable seul sans fine qu'on appellera h_2 .

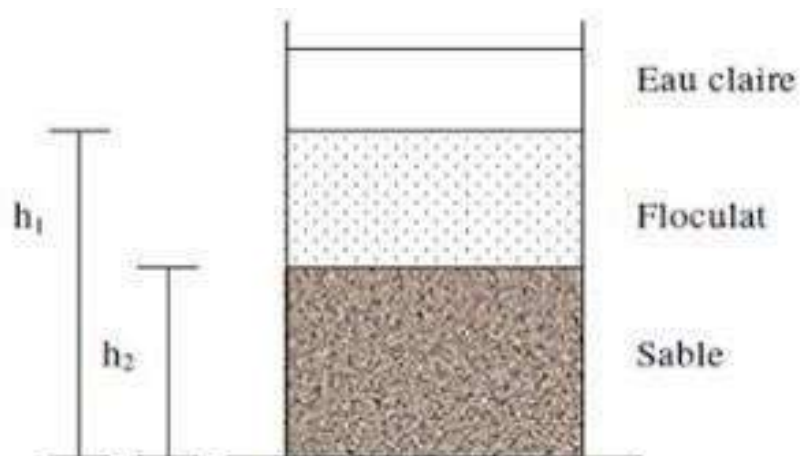


Figure III.9 : Éprouvette après agitation.

L'équivalent de sable est alors calculé par la formule suivante :

$$E_s = h_2/h_1 * 100$$

Dans notre cas, nous avons :

Essai n° 01 :

$h_1 = 10,6\text{cm}$ et $h_2 = 9,1\text{cm}$

$E_s = 0,85 = 85 \%$.

Essai n° 02 :

$h_1 = 10,6\text{cm}$ et $h_2 = 9,2\text{cm}$

$E_s = 0,85 = 85 \%$.



Figure III.10 : Essai de l'équivalent de sable.

Es au piston	Nature et qualité du sable
Es < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
60% ≤ Es < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
70% ≤ Es < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
Es ≥ 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau III.2 : Valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.

D'après les résultats obtenus ($Es = 85\% > 80\%$), on constate que le sable utilisé est trèspropre.

III.4 .2 Masse volumique absolue et apparente :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent (figure III.11 et figure III.12).

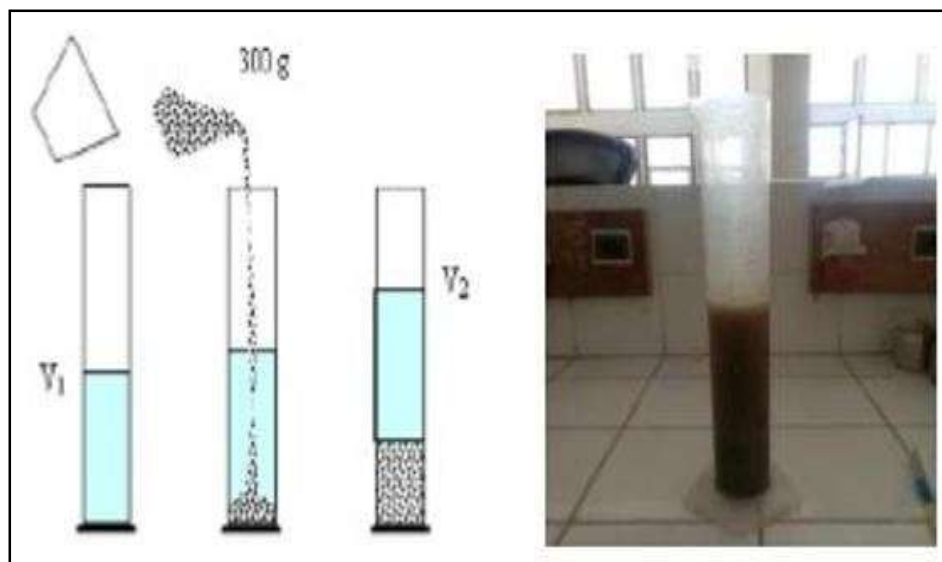


Figure III.11 : Essai de masse volumique absolue.



Figure III.12 : Essai de masse volumique apparente

Les résultats sont représentés dans le tableau III.4 :

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
Masse volumique Absolue (g/cm^3)	2.56	2.66	2.66
Masse volumique Apparente (g/cm^3)	1.86	1.54	1.50

Tableau III.3: Masses volumiques absolue et apparente des granulats.

III.5 Analyse granulométrique (NF P18-560) :

La composition d'un béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable, graviers) donnant un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistance mécanique, faible retrait, bonne durabilité...) possible.

La définition de ces proportions passe d'abord par l'essai de l'analyse granulométrique pour en choisir une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Joisel...etc.

III.5.1 Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs catégories de grains décroissantes.



Figure III.13 : Tamiseuse électrique.

III.5.2 Description de l'essai :

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme concassée, leur diamètre est de 0/3, 3/8 et de 8/15. Une fois lavés, ces matériaux sont séchés. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du haut de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 , la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 , la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n , aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé. Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (III.5, III.6, III.7).

- 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 III.4 : Analyse granulométrique du sable (0/3).

- Analyse granulométrique du gravier (3/8)

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulés[g]	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
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 III.5: Analyse granulométrique du gravier (3/8)

• Analyse granulométrique du gravier (8 /15)

Dimension des Tamis [mm]	Refus [g]	Refus Cumulés [g]	Refus Cumulés [%]	Tamisât [%]
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

Tableau III.6: Analyse granulométrique du gravier (8/15)

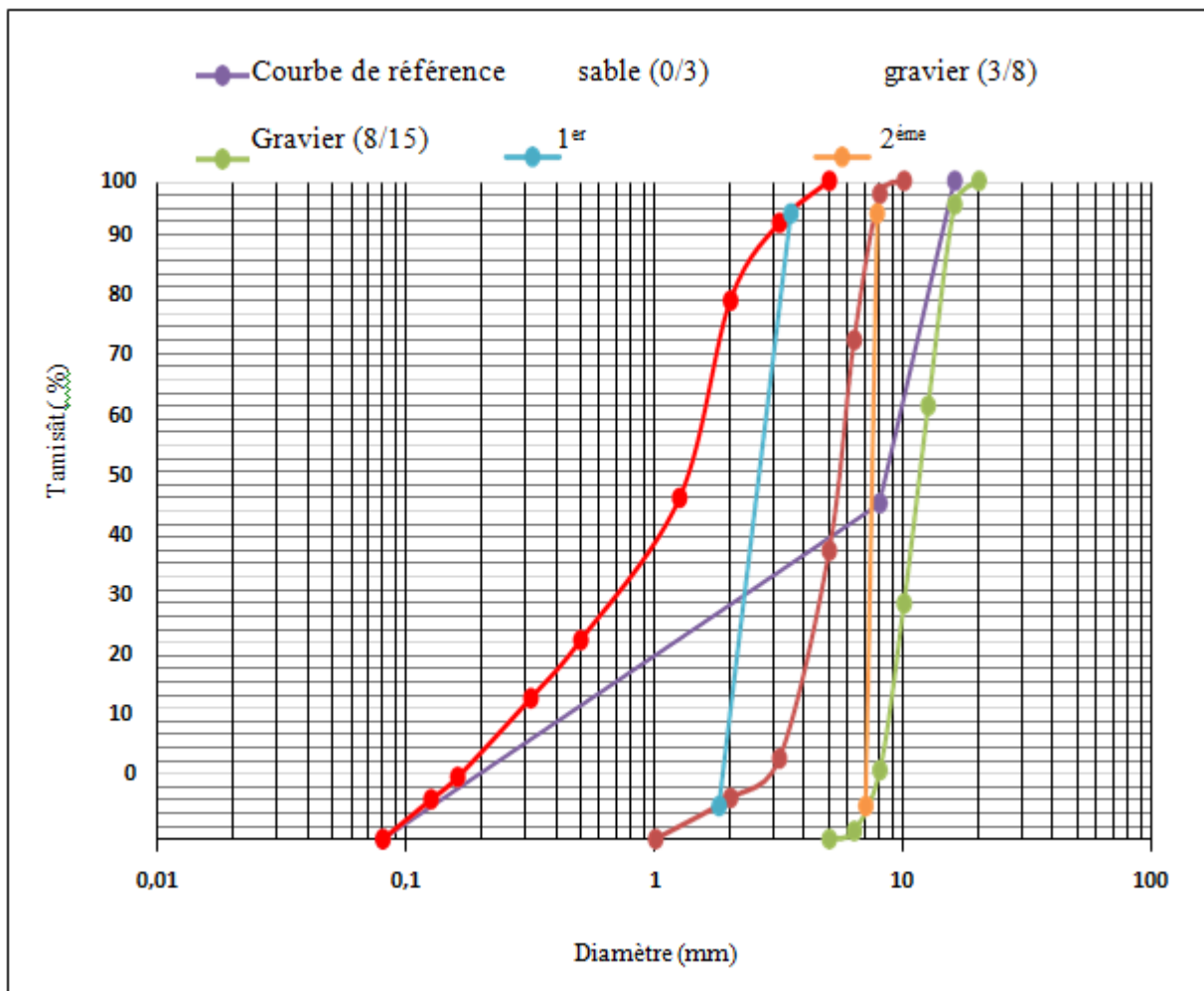


Figure III.14 : Courbes Granulométriques .

- **Module de finesse :**

Par définition le module de finesse représente le centième de la somme des refus (exprimé en pourcentage de poids) aux tamis de 0.125; 0.16; 0.315; 0.5; 1.25; 2; 3.15 mm.

- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier: $2,8 < \mathbf{Mf} < 3,2$
- Un module de finesse moyen correspond à un sable préférentielle $2,2 < \mathbf{Mf} < 2,8$
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin $1,8 < \mathbf{Mf} < 2,2$

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

Dans notre cas le résultat obtenu :

$\mathbf{Mf= 2,92}$ Donc notre sable est grossier.

III.6 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. Cet essai est réalisé à l'aide d'un tronc de cône en acier galvanisé de 10 et 20 cm de diamètres intérieurs sur une hauteur de 30 cm, d'une plaque en acier à la surface dure et non absorbante et d'une tige d'acier de 16mm diamètre dont l'extrémité est arrondie.



Figure III.15 : Détermination d'affaissement du béton à l'état frais.

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

Les composants du béton	Affaissement
Béton témoin	7cm
Béton fibres M	3cm

Tableau III.7: Les résultats d'affaissement du béton.

Connaissant sa classe, son ouvrabilité est évaluée à partir du tableau suivant :

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	6à 9	S3
Béton mou	Piquage	10à13	S4
Béton liquide	Léger piquage	≥14	S3/S4/S5

Tableau III.8 : Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement NF-EN-206/CN.

Selon la valeur de l'affaissement trouvé dans l'essai, la classe de maniabilité du béton est S1/S2 c'est un béton ferme sans serrage, bonne vibration.

III.7 Présentation du matériel :

- **Le malaxeur :**

Le béton a été réalisé dans un malaxeur à axe verticale avec des mouvements planétaires. Un temps minimum est recommandé pour assurer l'homogénéité du mélange.



Figure III.16: Malaxeur.

- **La table vibrante :**

L'usage d'une table vibrante est indispensable pour éliminer une certaine quantité de bulles d'air contenu dans le béton qui pourraient par leur présence affecté les propriétés mécaniques des bétons réalisés.



Figure III.17 : Table vibrante

III.8 Confection du béton :

Dans ce programme expérimental, un type de mélange de béton a été utilisé pour la fabrication des différents spécimens cylindriques et prismatiques. La formulation de ce béton a été déterminée à partir de la méthode de Dreux-Gorisse. 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) utilisées pour la détermination des résistances à la compression et à la traction.

Le mode opératoire est réalisé 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 adjuvant et malaxage pendant 2 min.
- L'incorporation aléatoire des fibres se fait dans cette dernière phase. Cela permet d'assurer une meilleure dispersion des fibres 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.

Pour assurer une bonne répartition des particules de sable et de ciment ainsi qu'une meilleure

distribution des ajouts minéraux, nous avons réalisé de petites gâchées, suivant les étapes suivantes:

- Préparation des moules prévus pour les éprouvettes de béton. Les moules devront être huilés pour faciliter le décoffrage
- Préparation des matériaux
- Le malaxeur à axe vertical pour la fabrication du béton
- Humidification de tout le matériel
- Introduction des différents composants sable, gravier et ciment dans le malaxeur
- Mise en marche du malaxeur pour homogénéiser le mélange sec pendant 1 min
- Ajout progressif de l'eau de pré-humidification pendant 30s
- Malaxage pendant 60s avec ajout graduel de la quantité d'eau restante et adjuvant
- Mesure à l'état frais de l'affaissement avec l'essai au Cône d'Abrams
- Remplissage des moules en trois couches et vibration pendant 20 secondes pour chaque couche pour compacter le béton et éliminer les bulles d'air à l'intérieur.
- Pour le béton à base de fibres, ces dernières sont introduites en fin de processus. Cette étape permet d'assurer une bonne dispersion des fibres dans le béton pour avoir un béton bien homogène.
- Démoulage après 24 heures
- Mise en cure des échantillons dans de l'eau.

III.9 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. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans des bacs remplis d'eau à 20 degrés pendant 28 jours. 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 essais de compression et essai de flexion trois points.



Figure III.18 : Éprouvettes après coulage.



Figure III.19 : Éprouvettes en cure d'hydratation.



Figure III.20 : Éprouvettes après la cure d'hydratation.

III.10 Essai à l'état durci :

III.10.1 Essai de compression uni-axial :

Les essais sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques ($\phi 10 \times 20$) cm² pour tous les cycles de chauffage. 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.21). 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 III.21 : Presse hydraulique AUTO TEST.

III.10.2 Essai de traction par flexion trois points :

Les essais sont menés sur des éprouvettes prismatiques de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. 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 (Figure III.22). Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs distancés de l ($l = 18 \text{ cm}$) 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 0.25 mm/mn jusqu'à la rupture. La charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que la courbe contrainte-déplacement. La résistance en traction est obtenue par la formule suivante:

$$\sigma_t = 3Fl / 2bh$$

Avec :

F: désignant la valeur de la charge maximale appliquée à la rupture. l : distance entre axe d'appuis, $l = 180 \text{ mm}$

b : largeur de la poutre, $b = 70 \text{ mm}$

h : hauteur de la poutre, $h = 70 \text{ mm}$.

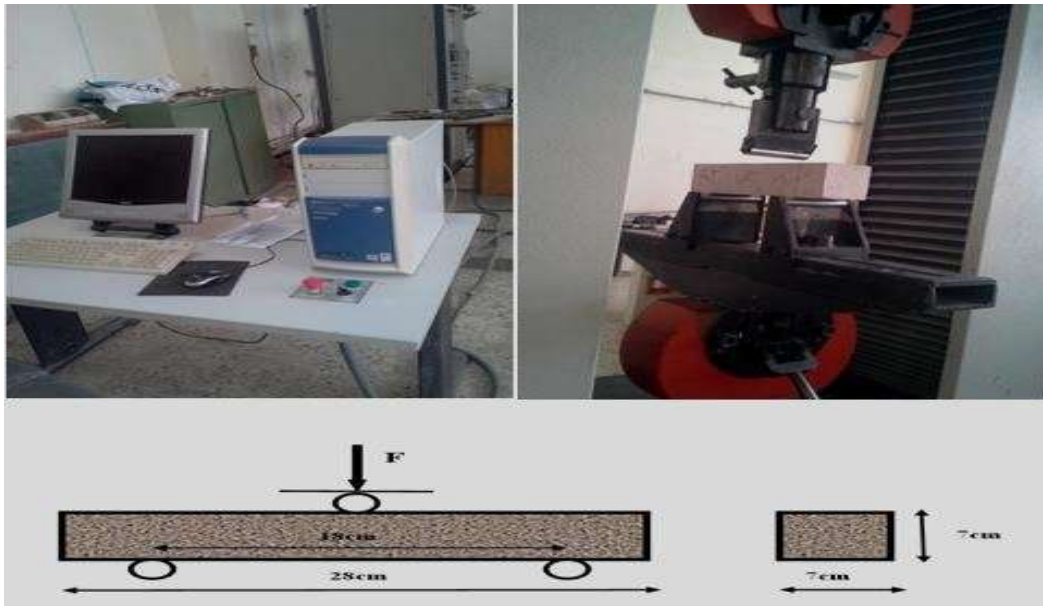


Figure III.22 : Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.

III.10.3 Essais thermiques :

Chaque cycle (chauffage-refroidissement) se compose de trois étapes. Le premier constitue une rampe de réchauffement à une vitesse de $1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$. La seconde est une étape de température constante dans le four pour uniformiser la température dans l'échantillon, dure quatre heures. La dernière étape est celle où la température chute à une vitesse moyenne de $-1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$ jusqu'à atteindre la valeur ambiante. La phase de refroidissement de l'échantillon n'est pas contrôlée. Ça se fait naturellement en fonction de la température interne du four maintenue éteinte. On veut vraiment être sûr que les dommages induits dans le béton ne sont dus qu'aux effets de la température.

Les éprouvettes sont disposées dans le four afin que la chaleur soit uniformément répartie. Cette répartition de la chaleur est obtenue grâce au système de ventilation du four. Le four est piloté par un régulateur programmeur connecté à thermocouple.



Figure III.23 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.

III.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche suivie pour la confection des différents spécimens de la provenance des matériaux à la caractérisation et enfin au coulage et murissement des bétons témoins et bétons de fibres. Les détails des essais ainsi que les différents appareillages sont aussi présentés sous forme de figures et images.

Chapitre IV

Interprétation des résultats

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudions le comportement mécanique du béton à base de déchets recyclés. Deux cures des éprouvettes sont considérées telles que:

- Des éprouvettes soumises directement aux essais de compression et de traction par flexion, après 28 jours de cure dans l'eau à 20⁰C
- Une autre série d'éprouvettes soumises aussi à une compression et traction par flexion mais après cure sous température de 600°C et 800°C

Pour rappel le béton est formulé avec des fibres en aluminium . Le test de compression a été fait sur des échantillons cylindriques ($\varphi 10 \times 20$) cm² et des échantillons sont aussi réalisés de forme prismatique de dimensions (7×7×28) cm³, pour la caractérisation sous chargement de traction par flexion trois points. Pour chaque mode opératoire, au moins trois tests ont été effectués pour caractériser la reproductibilité et la dispersion des résultats obtenus. Les courbes, les histogrammes et tableaux sont présentées et analysées pour chaque variante.

IV.2 Formulation :

Nous avons confectionné deux gâchés de béton:

- **BT**: béton témoin (béton sans fibres),
- **BFM**: béton avec des fibres en aluminium (0.3%). Le choix du pourcentage 0.3 % de fibres en aluminium ondulée est motivé par les résultats d'un protocole expérimental (Voir chapitre 3 de ce présent mémoire).

IV.3 Perte de masse :

La perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement représente cette quantité de matière perdue au cours de ce cycle par à son état brute. Les éprouvettes, après chaque cycle, sont pesées tour à tour pour en évaluer cette perte de masse si elle existe. Ces dernières sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant. La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue par :

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

Avec:

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

M_T : Masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage refroidissement.

A noter que toutes les éprouvettes sont refroidies dans le four pour éviter tout choc thermique susceptible de provoquer des désordres dans la masse béton (fissures, effritement et autres). Elles sont ensuite, une fois totalement refroidies, pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g. Les résultats sont présentés sur la figure (IV.1).

Le calcul de la perte de masse est la moyenne des trois valeurs effectuées sur l'échantillon cylindrique.

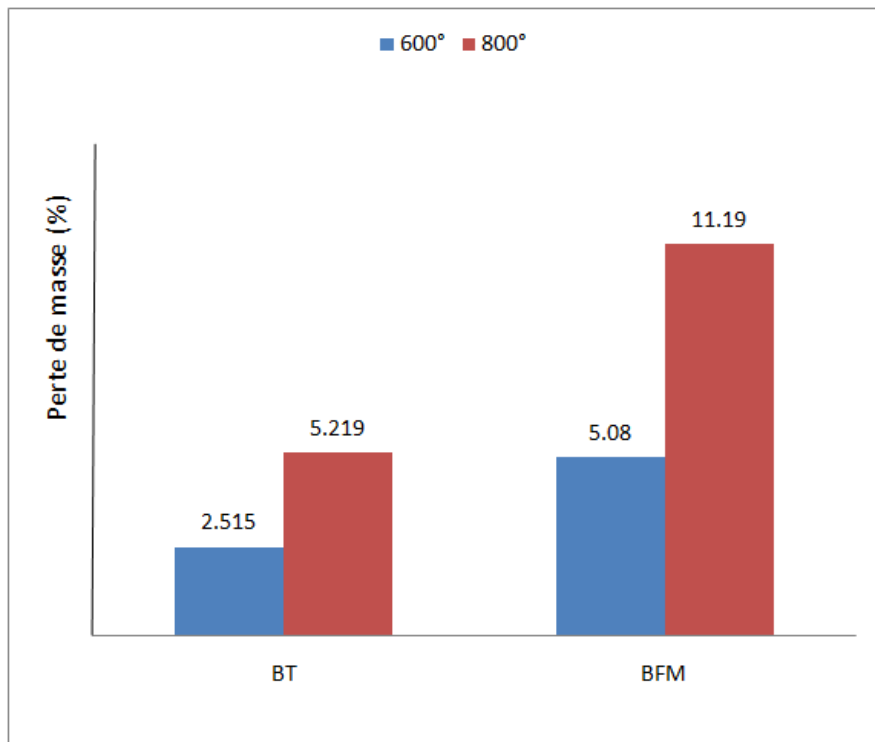


Figure IV.1 : Pertes de masse des différents bétons étudiés.

Le calcul de la perte de masse représente la moyenne de calcul effectuée sur trois éprouvettes cylindriques. Il est à remarquer que l'effet de la température est prépondérant, on note une augmentation de cette perte de masse du fait de l'augmentation de la température. Le passage de la température de 600⁰C à une température de 800⁰C provoque une chute de masse plus conséquente. Cette chute dans la masse des différents spécimens s'explique au début de l'augmentation de la température par l'évaporation de toute eau résiduelle après la cure. Au fur et à mesure que la température augmente des désordres importants sont forts probable dans la matrice béton sont produits et ceci est dû au passage des fibres en aluminium d'un état solide à un état de changement de forme.

IV.4 Essai mécanique de compression :

IV.4.1 Essai de compression :

Les essais de compression ont été réalisés sur des cylindres ($\phi 10 \times 20$) cm². Les différents résultats sont représentés sur l'Histogramme ci-dessous :

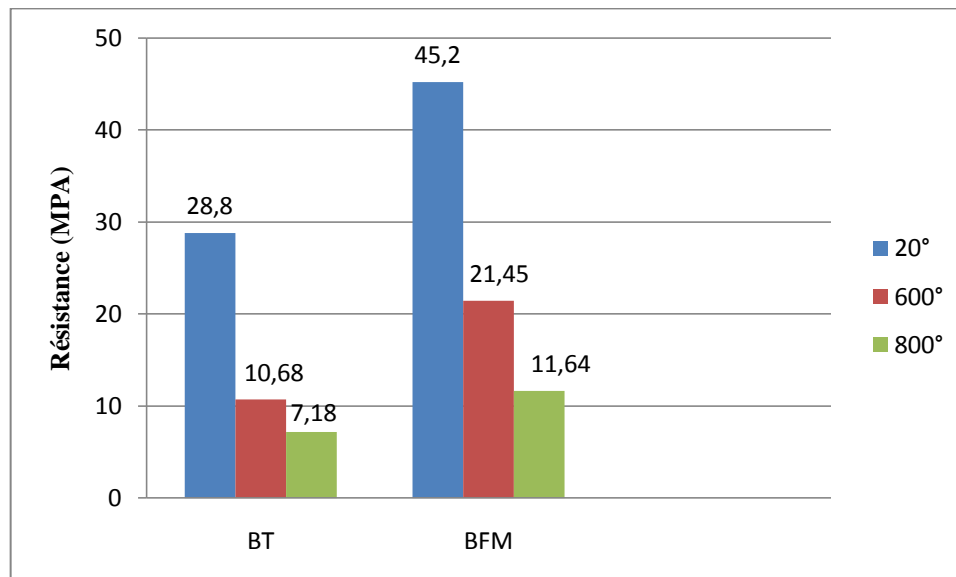


Figure IV.2 : Résistance à la compression des différents bétons.

A la température 20°C, le béton à base de fibres en aluminium , présente une résistance à la compression supérieure à celle du béton témoin (BT). En effet, la présence de ces fibres à l'intérieur de la masse béton confère à ce dernier un supplément de résistance. Pour les températures 600 °C et 800⁰C, on remarque que les résistances des deux bétons diminue mais la résistance du béton de fibres en aluminium reste toujours supérieure à celle du béton témoin. Au seuil de température de 800⁰C, les résistances présentent une chute importante. Les résistances des deux bétons se rapprochent ceci peut être expliqué sûrement par le changement de l'état du renfort fibres en

aluminium. Cette chute de résistance est de l'ordre de 7.18MPa pour le béton témoin contre une chute de résistance de 11.64 MPA pour le béton de fibres en aluminium.

IV.4.2Influence de la température :

Les courbes contraintes-déformations à la compression ont été tracées pour les différents bétons étudiés, voir figure(IV.3), (IV.4).

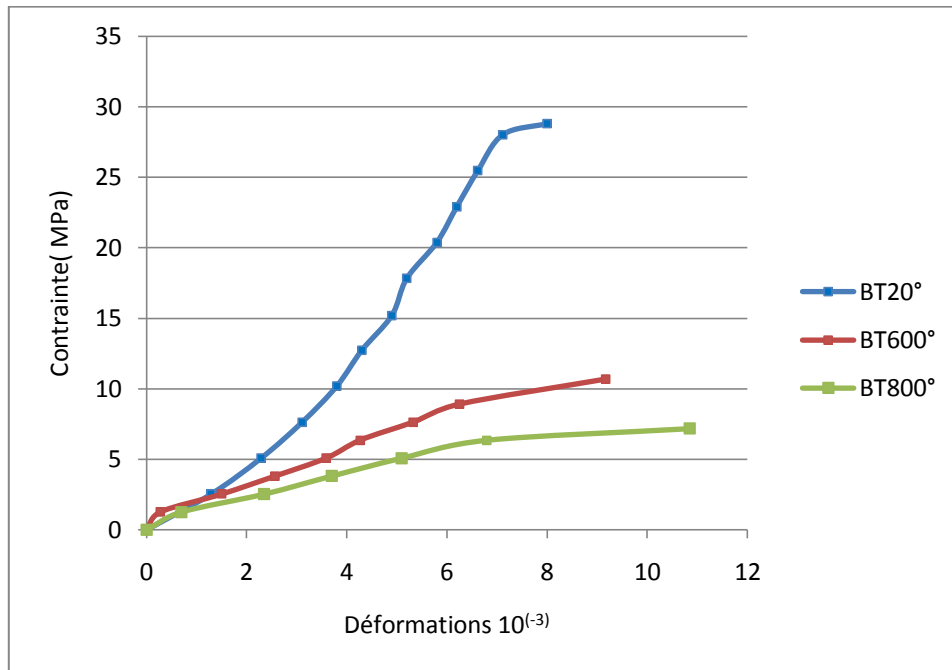


Figure IV.3: Courbes contraintes-déformations du béton témoin (BT).

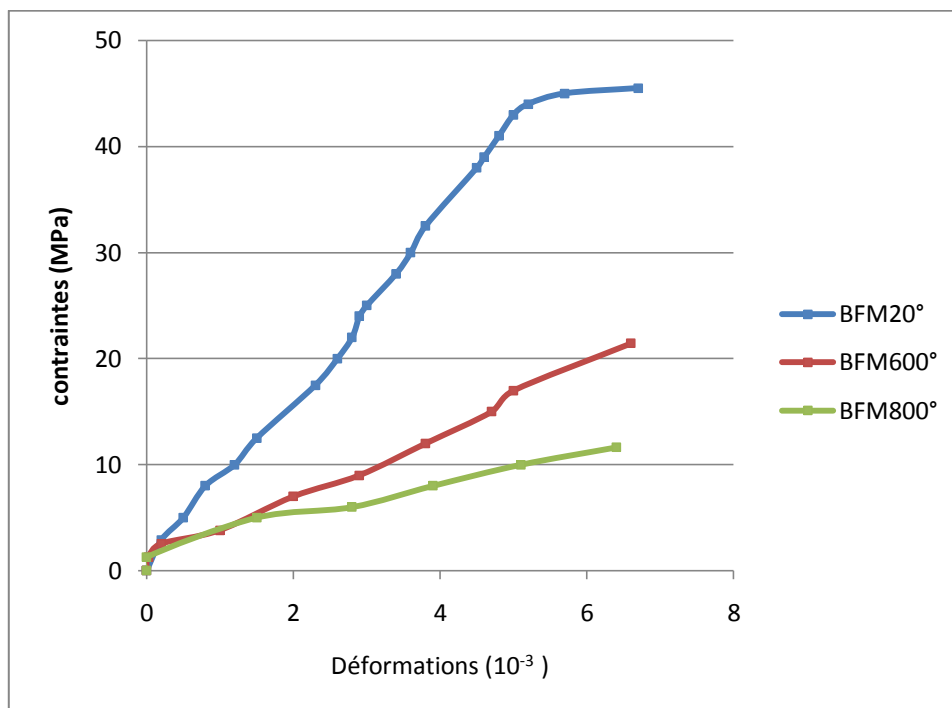


Figure IV.4: Courbe contraintes déformations du béton fibres en aluminium .

Pour le béton à base de fibres en aluminium, il a été constaté que le béton soumis au cycle Chauffage-refroidissement pour des températures de 600°C et 800° a présenté une diminution de la résistance et diminution de la pente de la courbe contrainte-déformation par rapport au béton soumis à température ambiante du laboratoire.

IV.4.3 Influence des fibres en aluminium :

Les courbes contraintes-déformations sont données dans les figures (IV.5), (IV.6) et (IV.7) ci-dessous :

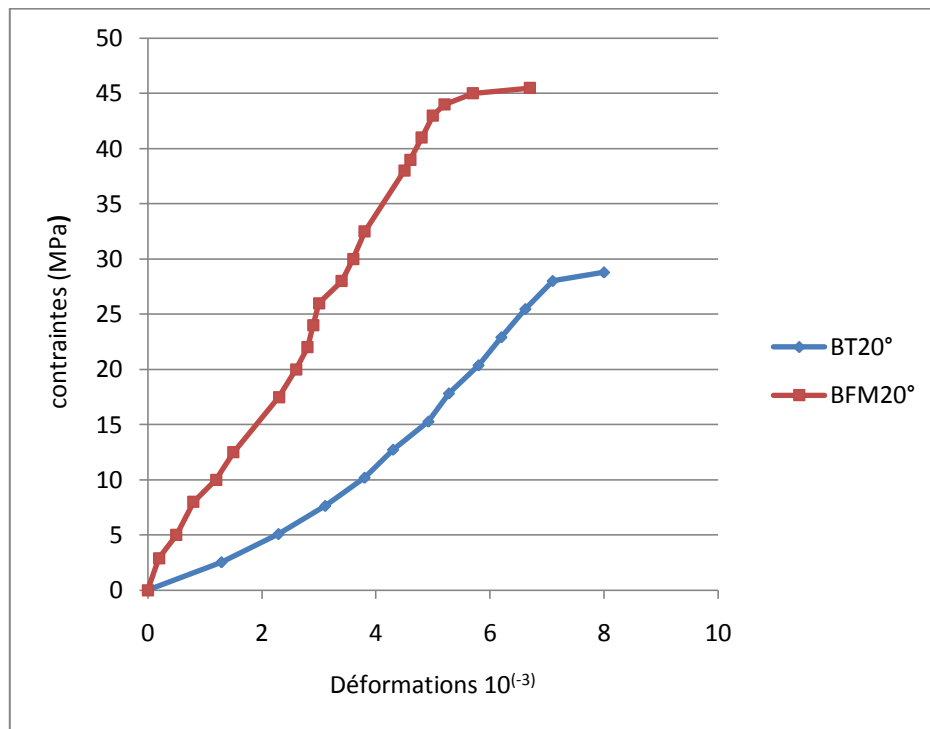


Figure IV.5: Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 20°C.

Sur la figure ci-dessus, on constate que le comportement du béton de fibres en aluminium, avant la cure sous haute température (20°C), indique une résistance en compression bien meilleure que le béton de référence (Témoin). La présence de fibres améliore cette résistance, elle est de l'ordre de 45.5 MPa contre une résistance du béton témoin 28.8 MPa. Le palier dans le domaine linéaire (élastique) se distingue fortement dans le cas du béton à base de fibres en aluminium. L'écart entre les deux résistances est de l'ordre de 16.7 MPa, ce qui est très prometteur pour l'utilisation de ces fibres, issues de l'industrie de récupération, dans notre matrice béton.

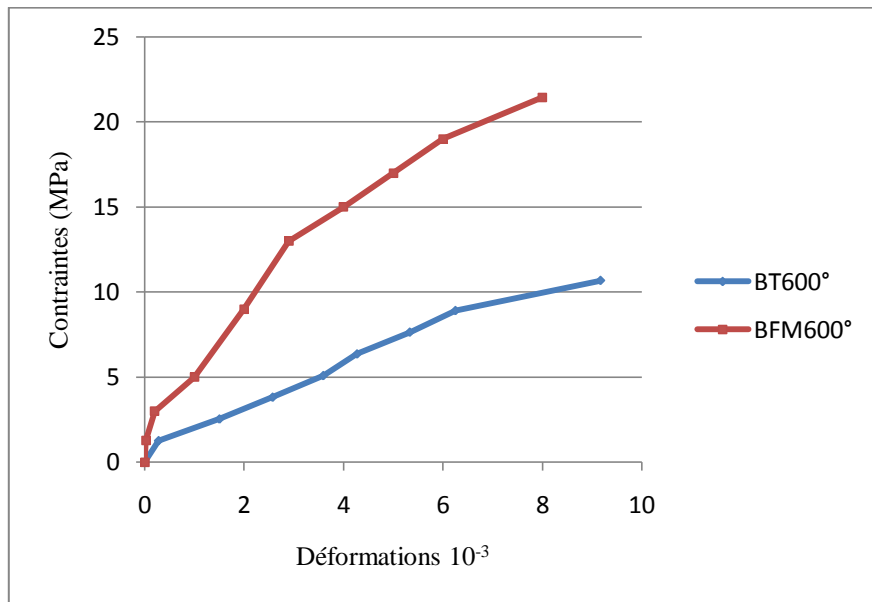


Figure IV.6: Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 600°C.

A la température de 600°C, le constat est le même que pour la température de 20°C c'est-à-dire que le béton de fibres en aluminium présente toujours une meilleure résistance comparativement à celle du béton témoin. Par contre une chute de résistance est constatée dans les deux de types de bétons. On note une chute de résistance d'environ 18.12 MPa pour le béton de fibres et une chute de 23.75 MPa pour le béton non renforcé.

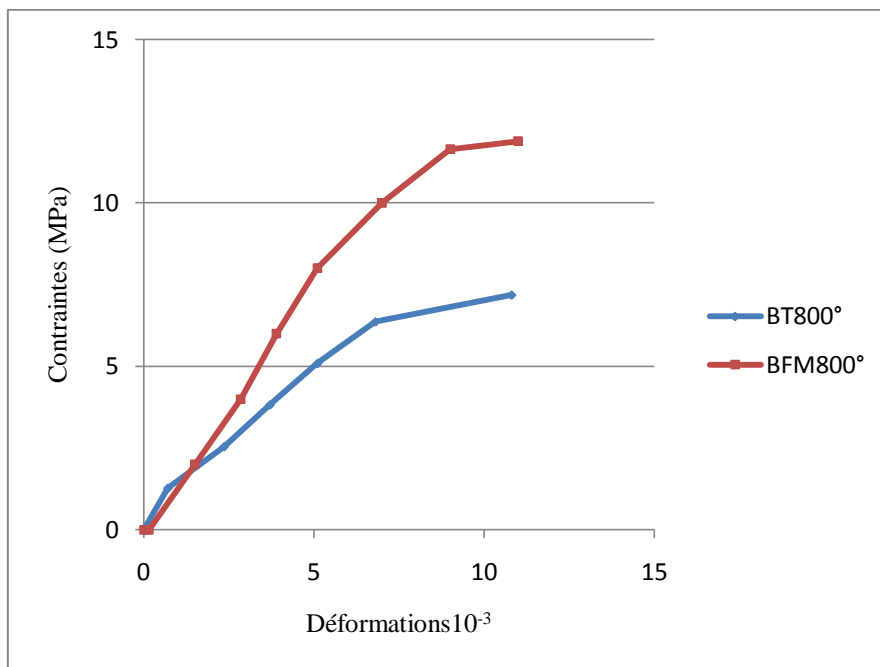


Figure IV.7: Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 800°C.

Dans la figure IV.7, l'effet de la température se fait plus ressentir vu que les résistances en compression des différents bétons subissent une forte chute. La température provoque des désordres plus importants au fur et à mesure qu'elle augmente. Le béton de fibres en aluminium, présente toujours une résistance légèrement supérieure à celle du béton témoin.

IV.4.4 État de surface des spécimens :

a. État de surface des spécimens à 20°C :



Figure IV.8: Aspect des éprouvettes BFA à 20°C avant et après écrasement.

b. État de surface des spécimens à 600°C :



Figure IV.9: Aspect des éprouvettes BFA à 600°C avant et après écrasement.

c. État de surfaces des spécimens à 800°C :



Figure IV.10: Aspect des éprouvettes BFA à 800°C avant et après écrasement.

On remarque sur les différentes figures que l'apparence extérieure des éprouvettes de béton de fibres en aluminium, exposées aux différentes températures, n'a subi aucun changement de l'état de surface. Par contre pour la température de 800°C, quelques spécimens présentent sur une surface réduite, apparition de quelques microfissures. Le béton de fibres en aluminium soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié inférieure du cylindre.

IV.4 Essai de flexion trois points :

La résistance en traction par flexion 3 points a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm³. Les courbes forces-déplacements ont été tracées pour chaque type de béton et pour chaque température étudiée.

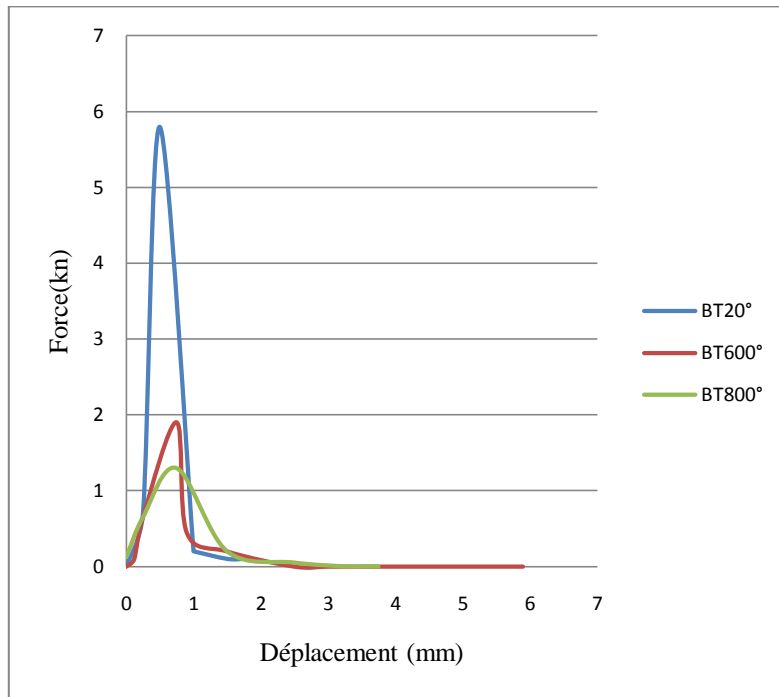


Figure IV.11: Courbes forces-déplacement du béton témoin en flexion.

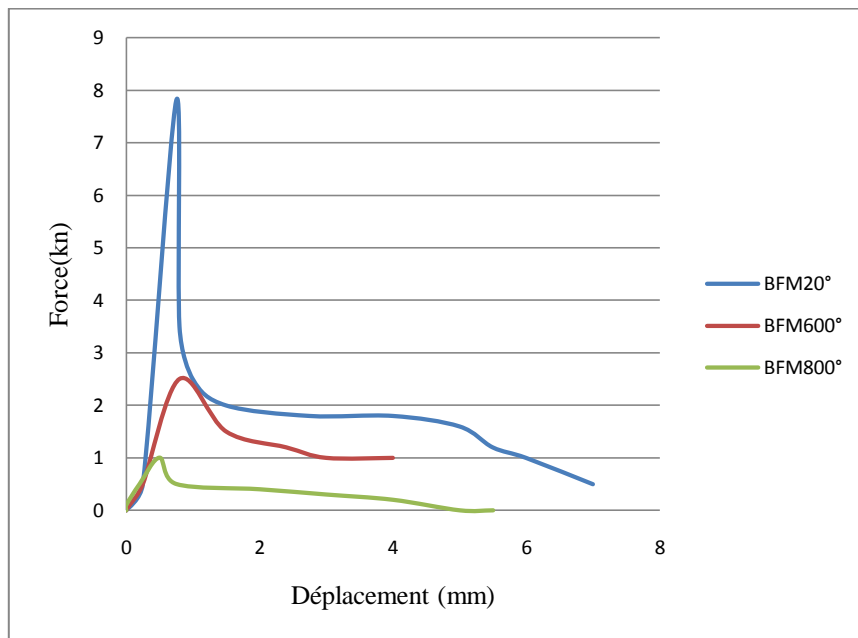


Figure IV.12: Courbes forces-déplacement du béton de fibres en aluminium .

Comme dans le cas de la compression, une chute de résistance est constatée pour les deux types de bétons. À une température de 800°C, une diminution très significative des résistances est constatée.

IV.4.1 Influence du type de fibres :

On s'intéresse dans cette partie à l'apport positif ou non des fibres métalliques en flexion.

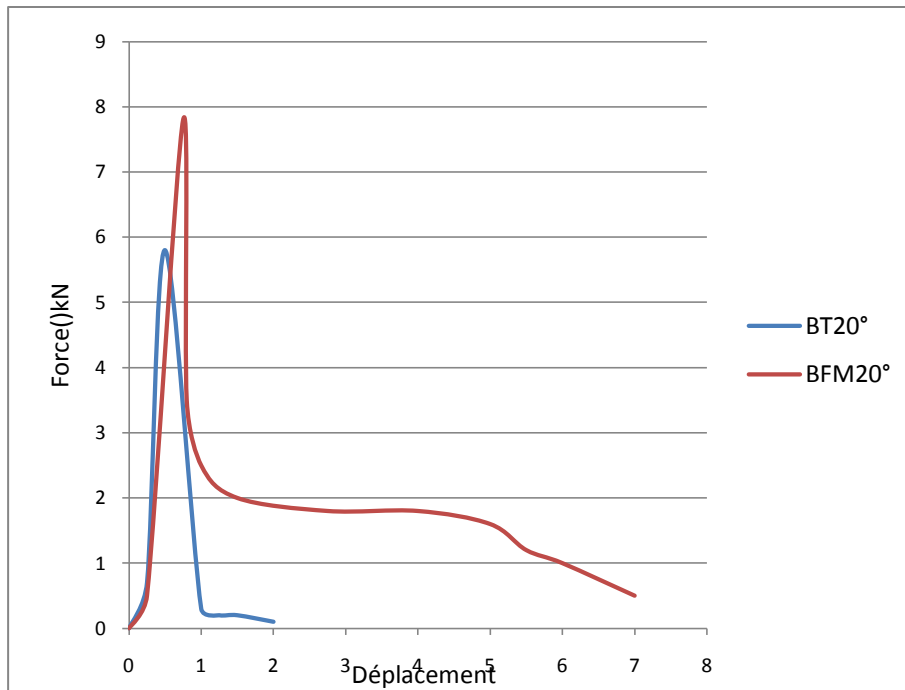


Figure IV.13: Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 20 °C.

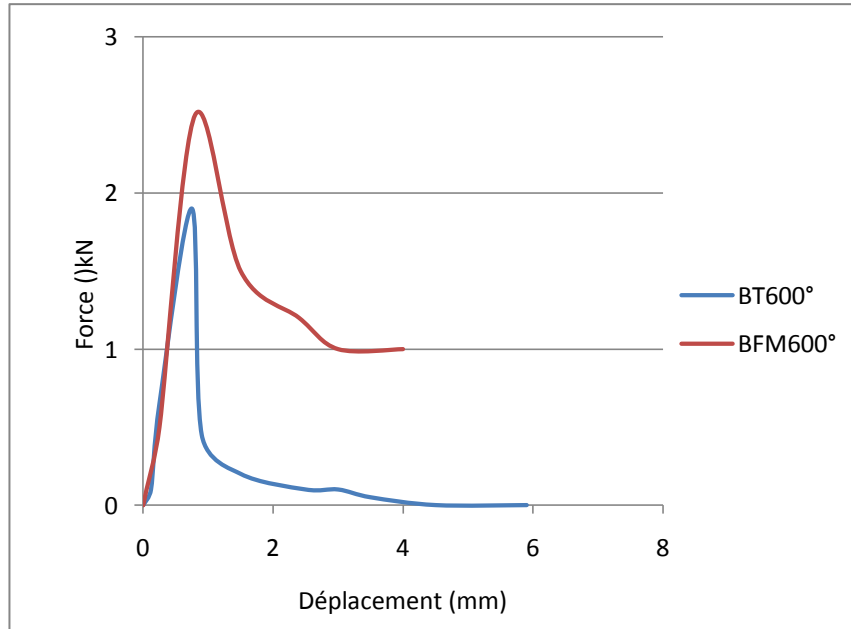


Figure IV.14: Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 600°C.

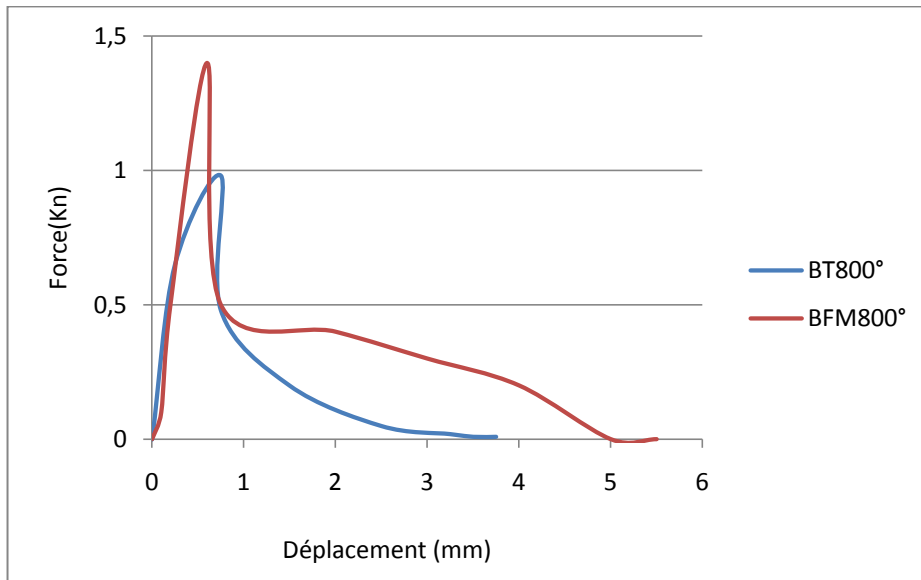


Figure IV.15: Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 800°C.

Les courbes forces-déplacements des bétons de fibres en aluminium ont montré un comportement meilleur en flexion trois points par rapport au béton témoin pour toutes les températures étudiées. Les bétons de fibres en aluminium se distinguent des bétons sans renforcement par un palier de ductilité meilleur. Néanmoins au fur et à mesure que la température augmente, une chute significative de la résistance est observée pour les bétons.

IV.4.2 État de surface des spécimens :

a. État de surface des spécimens à 20°C :



Figure IV.16: Aspect des éprouvettes prismatiques BFA à 20 °C avant et après écrasement.

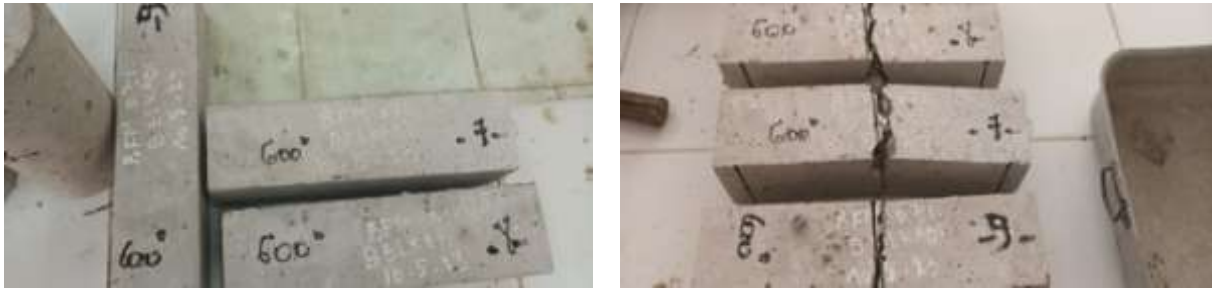
b. État de surface des spécimens à 600°C :

Figure IV.17: Aspect des éprouvettes prismatiques BFA à 600 °C avant et après écrasement.

a. État de surface des spécimens à 800°C :

Figure IV.18: Aspect des éprouvettes prismatiques BFA à 800 °C avant et après écrasement.

Aucun détachement de matière n'a été observé pour les échantillons prismatiques à 600°C mais pour les prismes soumis à une température de 800°C on observe un détachement de matière qui n'est pas assez important. Pour les fissures observées à la surface des prismes elles ne sont pas assez importantes et sont presque invisibles.

Conclusion :

Les résultats des essais de résistance des bétons à base de fibres en aluminium montrent que l'utilisation de 0.3% de ce type de fibres donne de bons résultats à la fois en compression et en flexion par traction non seulement à température ambiante, mais également après les cycles de chauffage-refroidissement.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

L'idée essentielle de cette démarche est une contribution à une recherche expérimentale au vu de la possibilité d'utiliser un béton à base de déchets de récupération. En effet, des canettes de boissons de différentes natures, en masse très importante dans la nature, engendre un état paysager très agressif à l'œil et surtout elles représentent un danger pour notre environnement.

Le comportement étudié est la caractérisation mécanique en compression et en traction par flexion 03 points d'une série d'éprouvettes avec un dosage en fibres qui représente la meilleure variante d'une procédure expérimentale déjà réalisée sous la direction de Professeur KHELOUI Fatma. Cette contribution nous a permis d'avoir une meilleure compréhension du comportement de ce type de béton soumis à de fortes températures. Des conclusions sont énumérées ci-dessous :

- La perte de masse augmente avec l'augmentation de la température pour tous les types de bétons étudiés. Une température de 600°C a provoqué une forte perte de masse, correspondant à l'évaporation de l'eau emprisonnée dans la matrice béton. À 800°C, la perte de masse est due à la dégradation de la matrice cimentaire.
- Pour toutes les températures, les bétons de fibres métalliques ont présenté une résistance à la compression supérieure à celle des bétons témoins. L'association des fibres métalliques dans la matrice béton permet d'assurer une bonne résistance en compression et en traction par flexion. D'après les différentes courbes à un certain de seuil de contraintes, ces fibres reprennent les efforts et assurent ainsi une bonne ductilité du béton à base de fibres métalliques. À 800°C, une chute de résistance a été observée pour tous les types de béton par rapport aux échantillons à 20°C. L'amélioration de la résistance en traction est plus prononcée que celle de la résistance en compression. Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour améliorer sa ductilité. Les essais de compression et de traction ont montré un bon comportement ductile du béton de fibres métalliques, non seulement à température ambiante, mais également après les cycles de chauffage-refroidissement.
- L'état de surfaces des échantillons, sous haute température, se manifeste par des fissures le long des surfaces des différents spécimens. Ces fissures sont très superficielles ce qui est rassurant, aucun écaillage n'a été constaté. Le béton de fibres métalliques (BFM), bien qu'il présente une résistance moindre mais il a présenté une meilleure ductilité.

- [1] Cours de l'histoire du béton et innovation architecturales (**d'IFIPS** Institut de la formation de l'ingénieur Université de Paris –Sud 11).
- [2] **George Dreux et Jean Festa**, "Nouveau guide du béton et de ses constituants" ; édition Eyrolle 2002.
- [3] Merdas Abde-ELGHANI, « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA » Université Des frères Mentouri-Constantine, Thèse de Magister 2005.
- [4] <https://www.actu-environnement.com/>
- [5] RAMACHANDRAN V-S : utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.
- [6] BOURMATE N : granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, thèse de magister, université de Constantine, 2004.
- [7] BERREUR, Louis, DE MAILLARD, Bertrand, et NÖSPERGER, Stanislas. L'industrie française des matériaux composites. Etude stratégique (Rapport de synthèse) réalisée par Nodal consultants pour le compte de la Digitip/SIM, 2002, vol. 14.
- [8] **Mme MAKHLOUFI Née CHERGUI Nadia** : « caractérisation en statique du comportement en traction direct du béton armé de fibres en copeaux » thèse magister, université mouloud MAMRI de Tizi-Ouzou le 30/11/2010.
- [9] **SACLR**; Présent compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton, mémoire de magistère, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2004.
- [10] **Ann de Rodegain** digne dingue donc - Canalblog / Les fibres végétales
- [11] **AITAMEUR**, Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales. Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.
- [12] **LAFARGE**; Le béton et la démarche HQE.
- [13] Gilberto Siqueira, Julien Bras, Alain Dufresne, 2010; Cellulosic Bionano composites: A Review of Preparation, Properties and Applications; Polymers 2,728-765
- [14] **Soso Stocks** entreprise appartenant à Groupe Intercom

- [15] **BOUZEROURA.M** .Etude du comportement du béton de fibres ondulées .Proposition d'une relation simplifiée contrainte-déformation, Magistère en génie civil, Université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [16] Diamond S., « *The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer* », *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, p. 919-933, 2004.
- [17] Agostini F., Lafhaj Z., Skoczylas F., and Loosveldt H., « *Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar* », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, p. 71–78, 2007.
- [18] INERIS, « *Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)* », Rapport intermédiaire Comportement de structures soumises à un incendie, Premières Réflexions Direction des Risques Accidentels, 2001
- [19] Billard Y., « *Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton* », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003.
- [20] **Arupfire**. "HSE : Fire resistance of concrete enclosures -Work Package 1: data collection - Work Package 2:spalling categories", 0001 Report Work Package 1 an London, 2005.
- [21] **L. T. Phan et N. J. Carino**. "Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures", Report NISTIR 6726, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2001.
- [22] **F. Robert, H. Colina et G. Debicki**. "La durabilité des bétons face aux incendies", Paris, *Ed. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées*, 2008.
- [23] **K. D. Hertz**. "Limits of spalling of fire-exposed concrete", *Fire Safety Journal*, vol. 38, n°2, p. 103-116, 2003.
- [24] **M. Li, C. Qian et W. Sun**. "Mechanical properties of-strength concrete after fire", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°6, p. 1001-1005, 2004.
- [25] **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.
- [26] **Y. Anderberg**. "Spalling phenomena of HPC and OC", *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, p. 69-73, 1997.

[27] **G. R. Consolazio, M. C. Mcvay et J. W. Rish.**

"Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature", *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, p. 125-148, 1997.

[28] **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.

[29] **Z. Xing.** "Influence de la nature minéralogique desgranulats sur leur comportement et celui du béton à haute température", *Thèse de Doctorat*, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[30] **J.-C. Mindeguia.** "Contribution expérimentale à lacompréhension des risques d'instabilité thermique des bétons.", *Thèse de Doctorat*, Génie Civil, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.