

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la
Construction Département de
Génie civil



Mémoire de Fin d'Étude

Master Académique en Génie Civil
Spécialité: Structure

Thème

*Comportement mécanique et thermique d'un béton
à base de déchets de recyclage.*

Réalisé par : Melle. Sara Chermak

Membres de Jury :

M. Dj. ATTLAOUI	UMMTO	Président
M. K. GHOULEM	UMMTO	Examineur
Mme. F. KHELOUI	UMMTO	Promotrice
Mme. O. AKMOUSSI	UMMTO	Co-Promotrice
M. S. BOUKAIS	UMMTO	Invité

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 mes **PARENTS** pour leur soutien dans chaque travail que j'avais effectué.*

*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.*

*A ma co-promotrice **Mme O. AKMOUSSI** pour sa disponibilité, ses orientations et son aide précieuse à la réussite de ce travail*

*A mes chers camarades : **FAREZ MOHAMED ; DEHBI FOUZIA; HAMLIL DYHIA ; AMARA YANIS ; TAYEBI MERIEM.***

*Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du laboratoire Génie Civil, Université Mouloud **MAMMERI** de **TIZI OUZOU**, en particulier à Monsieur **BOUHERRAOUA Rachid**, et Madame **BEN AHMED FADILA** pour leur précieuse aide à la réalisation de la partie expérimentale.*

A l'ensemble des enseignants du département de Génie-Civil.

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.

CHERMAK SARA.

Résumé

Les bétons de fibres possèdent des propriétés mécaniques intrinsèques très satisfaisantes à température ambiante. Cependant, leur comportement face à des conditions extrêmes telles que les incendies soulève encore plusieurs interrogations. L'objectif de cette recherche est d'étudier et de mieux comprendre le comportement des bétons fibrés à haute température, ainsi que l'impact de l'évolution de la température sur leurs propriétés mécaniques, en évaluant la perte de masse résiduelle, la résistance résiduelle en compression et en traction.

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 résiduelle 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 métalliques ont présenté une résistance nettement supérieure par rapport aux bétons de fibres en polypropylène et aux bétons mixtes. À 800°C, les bétons de fibres mixtes ont montré des zones écaillées, tandis que les bétons de fibres métalliques et en polypropylène ont développé des réseaux de microfissures sans écaillage.

Mots clés : Béton, fibres de polypropylène, fibres métalliques, Température, résistance.

Abstract

Fiber concretes have very satisfactory intrinsic mechanical properties at room temperature. However, their behavior in the face of extreme conditions such as fires still raises several questions. The objective of this research is to study and better understand the behavior of fiber-reinforced concretes at high temperature, as well as the impact of the evolution of temperature on their mechanical properties, by evaluating the loss of residual mass, the resistance residual in compression and tension.

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 residual strength of fiber-reinforced concretes decreased significantly when exposed to high temperatures compared to concretes not subjected to such conditions. For all the temperatures examined, the metal fiber concretes showed a significantly higher resistance compared to the polypropylene fiber concretes and the mixed concretes. At 800°C, the mixed fiber concretes showed spalled areas, while the metal fiber and polypropylene concretes developed microcrack networks without spalling.

Keywords: Concrete, polypropylene fibers, metal fibers, Temperature, resistance.

SOMMAIRE

CHAPITRE I

I.1.Introduction.....	5
I.2.Historique du béton.....	5
I.3.Composition du béton	5
I.4.1. Le dosage du béton	6
I.4.2. Les composants du béton	6
I.4.3. Différents types de béton	9
I.4.4. Le comportement mécanique du béton classique	11
I.5. Les Fibres dans le béton.....	12
I.5.1. Historique des fibres	12
I.5.2. Les renforts	14
1.6. Différents types de fibres	19
I.6.1. Les fibres organiques	19
I.6.2. Les fibres non organiques	20
I.7.Les principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et les bétons	20
Conclusion.....	22

CHAPITRE II

II.1. Introduction	23
II.2. Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction	23
II.2.1. Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le génie civil	23
II.2.1.1. Définition.....	23
II.2.1.2. Valorisation	23
II.2.1.3. Méthodes de valorisation.....	24
II.3. Origine de la production de déchets	24
II.4. Types de déchets.....	25
II.4.1. Les déchets biodégradables	25
II.4.2. Les déchets ultimes.....	25
II.4.3. Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux	26
II.4.4. Les déchets recyclables.....	26
II.4.4.1. Déchets usuels inertes.....	27

II.4.4.2. Déchets usuels non inertes.....	27
II.4.4.3. Déchets industriels dangereux	27
II.4.4.4. Déchets toxiques en quantités dispersées	27
II.5. Déchets organiques.....	28
II.6. Différents déchets utilisés en génie civil	28
II.6.1. Déchets industriels dangereux mais non toxiques	28
II.6.2. Déchets inertes.....	29
II.6.3. Déchets toxiques.....	29
II.6.4. Déchets industriels dans des conditions spécifiques	29
II.6.5. Déchets ménager et assimilés	30
II.6.6. Les déchets industriels banals (D.I.B)	30
II.7. Activité du recyclage des déchets en construction	30
II.7.1. Recyclage des déchets	30
II.7.2. Technique de recyclage	31
II.7.2.1. Procédés du recyclage.....	31
II.7.2.2. La chaîne du recyclage a collecte de déchets	31
II.7.3. Type de recyclage	32
II.7.4. Impacts du recyclage sur l'environnement.....	33
II.8. Plastiques et Déchets plastiques	33
II.8.1. Les matériaux plastiques.....	33
II.8.1.1. Définition.....	33
II.8.1.2. Les différentes étapes de recyclage du plastique	34
II.9. Types de matière plastique	36
II.9.1. Les thermoplastiques	36
II.9.2. Les thermodurcissables.....	36
II.9.2. Les élastomères	36
II.10. Déchets métalliques.....	36
II.10.1. Les fibres métalliques.....	37
II.11. Le comportement thermique du béton	39
II.11.1. Effets des variations de Température sur le Béton.....	40
II.11.2. Revues sur l'étude du comportement thermique du Béton	41
Conclusion.....	42

CHAPITRE III

III.1.Introduction.....	43
III.2. Caractéristiques des matériaux.....	43
III.2.1. Le ciment.....	43
III.2.2. Eau de gâchage.....	44
III.2.3. Le sable	45
III.2.4. Les granulats	46
III.2.5. Les adjuvants	46
III.2.6. Les renforts	47
III.2.6.1. Les fibres métalliques.....	47
III.2.6.2. Fibres polypropylène.....	49
III.3. Caractérisation du sable.....	50
III.3.1. Essai équivalent de sable.....	50
III.3.2. Masse volumique absolue	52
III.3.3. Masse volumique apparente	54
III.4. Analyse granulométrique (NF P18-560).....	55
III.5. Essai d'affaissement	58
III.6. Confection du béton	60
III.7. Conservation des éprouvettes.....	61
III.8. Essai à l'état durci	62
III.8.1. Essai de compression uni-axial	62
III.8.2. Essai de traction par flexion trois points	63
III.8. 3. Essais thermiques	64

CHAPITRE IV

IV.1. Introduction.....	67
IV.2. Formulation.....	67
IV.3. Perte de masse	67
IV.4. Essai de compression	69
IV.4.1. résistance à la compression.....	69

IV.4.2. Influence de la température	70
IV.4.3. Influence du type de fibres	72
IV.5. essai de flexion trois points	75
IV.5.1. Influence de la température	75
IV.5.2. Influence du type de fibres	77
IV.5.3. État de surface des spécimens	78
CONCLUSION GENERALE	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

Listes des figures

Chapitre I

N°	Désignation	Page
01	Le béton	6
02	Composants du béton	7
03	Diagrammes compression et traction	12
04	Rôle des fibres dans la fissuration	15
05	Les différents types de renfort	16
06	Fibres courtes et fibres longues	17
07	Forme linéique d'un renfort	17
08	Chaine et trame d'un tissu	18
09	Types d'armure de tissage d'un tissu	18
10	Tissage cylindro-conique	19

Chapitre II

N°	Désignation	Page
01	Les déchets biodégradables	25
02	Les déchets ultimes (non susceptibles d'être traités)	26
03	Les déchets dangereux	26
04	Les déchets recyclables	27
05	Classification de déchets	28
06	Composition de base des déchets de démolition en Europe (2004)	29
07	Quelques exemples de déchets à recycler	31
08	Les déchets plastiques	34
09	Décharge de déchets métalliques ferreux et non ferreux	37
10	Fibres métalliques	38
11	Géométrie des fibres métalliques	38
12	Illustration du mécanisme d'éclatement	42

Chapitre III

N°	Désignation	Page
01	Le ciment utilisé 42.5 R	43
02	Sable utilisés	45
03	Les granulats utilisés.	46
04	Plastifiant Sika Plast BV 40+.	47
05	Fibres métalliques	47
06	Fibres polypropylène	49
07	Agitateur manuel.	50
08	Éprouvette après agitation.	51
09	Essai de l'équivalent de sable.	52
10	Essai de masse volumique absolue.	53
11	Les granulats	54
12	Le Tamiseur électrique utilisé avec la série de tamis.	55
13	courbe granulométrique	57
14	Détermination d'affaissement du béton à l'état frais.	59
15	Fabrication du béton dans un malaxeur à axe vertical	61
16	Éprouvettes en cure d'hydratation.	61
17	Éprouvettes après la cure d'hydratation.	62
18	Presse hydraulique AUTOTEST	62
19	Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.	64
20	Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes	65
21	Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four	65

Chapitre IV

N°	Désignation	Page
01	Pertes de masse des différents bétons étudiés	68
02	Résistance à la compression des différents bétons.	69
03	Courbes contrainte-déformation du béton témoin(BT).	70
04	Courbes contrainte-déformation du béton de fibres métalliques (BFM)	70
05	Courbes contrainte-déformation du béton de fibres de polypropylène (BFP).	71
06	Courbes contrainte-déformation du béton de fibres mixtes de (BFM,PP).	71
07	Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 20 °C.	72
08	Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 600°C.	72
09	Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 800°C.	73
10	L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.	73
11	L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres métalliques à la sortie du four.	74
12	L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres mixtes	74
13	Courbes forces-déplacement du béton témoin	75
14	Courbes forces-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM).	75
15	Courbes forces-déplacement du béton de fibres polypropylène (BFPP)	76
16	Courbes forces-déplacement du béton de fibres mixtes (BFM-PP)	76
17	Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 20 °C.	77
18	Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 600 °C.	77
19	Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 800 °C.	78
20	L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.	78
21	L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton mixte (BFM,PP) à la sortie du four	79

Listes des tableaux:

Chapitre I

N°	Désignation	Page
01	Dosage de béton pour 1m ³	6
02	: Différents granulats	7
03	Différents types d'adjuvants	9
04	Types et caractéristiques des fibres couramment utilisées	22

Chapitre III

N°	Désignation	Page
01	Les caractéristiques physiques du ciment.	44
02	Composition chimique du ciment.	44
03	Composition minéralogique du ciment.	44
04	Dosage des constituants pour 1m ³ de béton.	45
05	Caractéristiques des fibres métalliques	48
06	Dosage des constituants pour 1m ³ de béton	49
07	Valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.	52
08	Masses volumiques absolue et apparente des granulats.	55
09	Analyse granulométrique du sable (0/3)	56
10	Analyse granulométrique du gravier (3/8)	56
11	Analyse granulométrique du gravier (8/15)	57
12	Les résultats d'affaissement du béton	59
13	Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement NF-EN-206/CN.	59

Introduction générale

Introduction générale

Les structures en génie civil sont soumises à différentes contraintes de nature et d'intensité. Les contraintes de traction et de compression sont causées par le moment de flexion, tandis que les contraintes de cisaillement sont dues à l'effort tranchant lié au moment de flexion.

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil. Sa mise en œuvre est relativement simple, car il est composé de liants, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Cependant, en raison de sa faible résistance à la traction, des armatures en acier sont ajoutées dans les parties tendues du béton pour permettre une résistance à la traction beaucoup plus élevée. Cela lui confère un comportement de matériau composite fissuré en section.

Au fil des années, le béton a connu des avancées significatives en termes de performances mécaniques grâce à l'incorporation de fibres métalliques et plastiques, entre 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.

Cependant, les fibres peuvent également être utilisées dans des zones moins sollicitées, telles que celles soumises à des efforts tranchants de cisaillement. Dans ces zones, les fibres peuvent jouer deux rôles : retarder la fissuration du béton au-delà des conditions de service de la structure, ce qui évite le recours à des armatures coûteuses, et limiter l'ouverture des fissures pour préserver la durabilité du béton, qu'il y ait ou non des armatures transversales.

Objectif de l'étude :

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'un béton renforcé de fibres métalliques et fibres de polypropylène issues de l'industrie de récupération. Des éprouvettes cylindriques et prismatiques sont utilisées pour des essais de traction et de compression. D'autres éprouvettes de mêmes formes sont aussi testées en compression et traction après une cure sous température de 600 °C et 800 °C. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, de courbes et d'histogrammes.

Organisation du mémoire:

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

Introduction générale

Chapitre I: il est consacré aux généralités sur les bétons avec quelques rappels et définitions sur les Fibres.

Chapitre II: ce chapitre porte sur la présentation des déchets d'une manière générale et ceux existants dans notre environnement. L'intérêt de la valorisation et recyclage de ces déchets sont plus que nécessaire au vu de leur abondance dans la nature. En deuxième partie, définition des fibres plastiques et fibres métalliques.

Chapitre III: Ce chapitre présente le matériel et les matériaux utilisés pour la réalisation du Protocol Expérimental. Présentation des différents essais effectués au laboratoire, ainsi que les différents types des bétons étudiés.

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 II

Les Déchets

II.1. Introduction

La valorisation des déchets est une attitude positive plus économe, plus responsable qui œuvre dans le but de la protection de l'environnement et la santé de l'Homme. De nos jours les déchets constituent un produit qu'il faut exploiter au mieux afin de tirer meilleur profit. La valorisation est non seulement utile, mais aussi souhaitable. Toute l'activité humaine consiste à créer des richesses en partant d'un produit pour en fabriquer un autre, en transformant les choses pour en créer de nouvelles, dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le déchet peut être ce produit qu'il faut savoir utiliser et transformer pour en faire un matériau utile, une véritable matière première ou secondaire surtout dans le domaine de la construction et spécialement dans le ciment ou béton comme poudre, fibres ou agrégats (Ademe, 1996).

Ce travail s'intéresse à la valorisation des déchets qui sont nuisible pour l'environnement vu leurs caractères encombrants et inesthétiques. Il s'agit du déchet plastique et du déchet métallique.

II.2. Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction

Le recyclage n'est pas un luxe ou une mode mais une nécessité, qui provient d'une Constatation forte et simple : nous vivons dans un monde limité. S'il n'est pas possible de supprimer la production de déchets, sous produits ou résidus industriels ou urbains, il convient alors de définir les meilleures conditions de valorisation. Presque toutes l'activité industrielle portant atteinte aux ressources naturelles et dégradant l'environnement, le recyclage et la valorisation des déchets est un devoir autant qu'une nécessité. En effet, pour des raisons économiques, règlementaires, commerciales et environnementales, la valorisation des déchets (industriels, municipaux et de l'industrie de construction) dans le béton, est en cours de développement ces dernières années dans plusieurs pays développés.

II.2.1. Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le génie civil**II.2.1.1. Définition**

Un déchet se définit simplement par un objet en fin de vie ou une substance issue d'un processus, jugés devenus inutiles, dangereux ou encombrants, et dont on veut se débarrasser. Tout objet qui doit être jeté car il est cassé, usé, contaminé, ou abimé d'une manière ou d'une autre, pour certains, sera qualifié de déchet, mais ne sera pas nécessairement considéré comme tel par les autres [6].

II.2.1.2. Valorisation

La valorisation est définie comme "L'élimination des déchets qui comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux

réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances." [7].

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer son traitement. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir». L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

II.2.1.3. Méthodes de valorisation

➤ Valorisation matière

Elle est appelée également, recyclage mécanique, il s'agit de l'opération globale consistant à la production d'une nouvelle matière à partir d'un déchet [7].

➤ Valorisation énergétique

Elle est appelée également, recyclage énergétique, elle vise la production d'énergie calorifique. Plusieurs techniques permettent d'atteindre cet objectif dont les plus connus sont l'incinération, la pyrolyse ou la thermolyse. Cette énergie calorifique peut être utilisée sur place ou transformée par la suite en énergie électrique, en fonction des besoins du moment ou du lieu de traitement [7].

➤ Valorisation chimique

Il s'agit de tout processus chimique permettant la transformation d'un déchet en des produits chimiques utilisables comme intermédiaires réactionnels dans l'industrie chimique

II.3. Origine de la production de déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes:

- biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- économiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- accidentelles: les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

II.4. Types de déchets

On distingue plusieurs types des déchets :

II.4.1. Les déchets biodégradables

Résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires..., qui s'assimilent en première approche à la biomasse. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation), laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par des résidus de pesticides, de métaux, dioxines, etc. , selon leur origine. Ils peuvent être revalorisés par différentes filières (bioénergie, biocarburants, Compostage / amendements / engrais...)



Figure II.1 : Les déchets biodégradables [8].

II.4.2. Les déchets ultimes

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

Outre les déchets ultimes : « ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment». Eux seuls devraient encore pouvoir être mis en décharge [6].

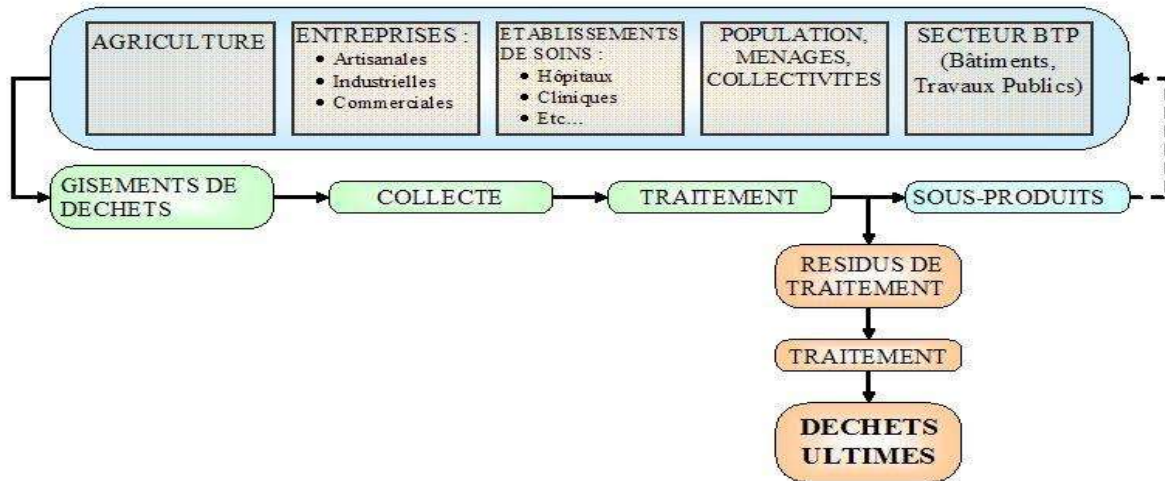


Figure II.2 : Les déchets ultimes (non susceptibles d’être traités) [9]

II.4.3. Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux

À la différence du déchet banal peuvent entrer dans la catégorie des déchets dangereux, dont font partie les déchets toxiques et les déchets radioactifs qui doivent faire l’objet d’un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité. Parmi les déchets nucléaires, on distingue les déchets radioactifs ultimes [6].



Figure II.3 : Les déchets dangereux [3] [10]

II.4.4. Les déchets recyclables

Matériaux de construction, métaux, matières plastiques : ces matériaux peuvent être réutilisés tels quels dans d’autres domaines ou recyclés : par exemple, les métaux sont refondus et réintégrés dans de nouvelles pièces, les plastiques sont hachés et servent de rembourrage ou de combustible ...

On s’intéresse sur les déchets de métaux (fer, aluminium, plomb,...) qui possèdent une valeur marchande et qui se présentent sous trois formes:

- les objets métalliques en fin de vie (moteurs, outils, canalisations, câblages...)
- les composés métalliques destinés à être traités pour en extraire le métal contenu (catalyseurs de pots d'échappement,.....).



Figure II.4 : Les déchets recyclables [11]

II.4.4.1. Déchets usuels inertes

Les déchets usuels inertes sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peu dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

II.4.4.2. Déchets usuels non inertes

Les plus connus de ces déchets sont les huiles et les peintures. L'incinération avec valorisation énergétique est un des procédés employés pour les recycler. Elle permet la production d'énergie et la destruction des déchets peu combustibles [6].

II.4.4.3. Déchets industriels dangereux

L'industrie produit une grande quantité de déchets dangereux. Ce sont pour la plupart des produits comprenant des substances chimiques toxiques ou instables. Les déchets toxiques sont dangereux pour la santé et pour l'environnement. La manipulation de déchets instables entraîne des risques d'accidents graves [1].

II.4.4.4. Déchets toxiques en quantités dispersées

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques.

II.5. Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : bio déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts).
- déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc....)

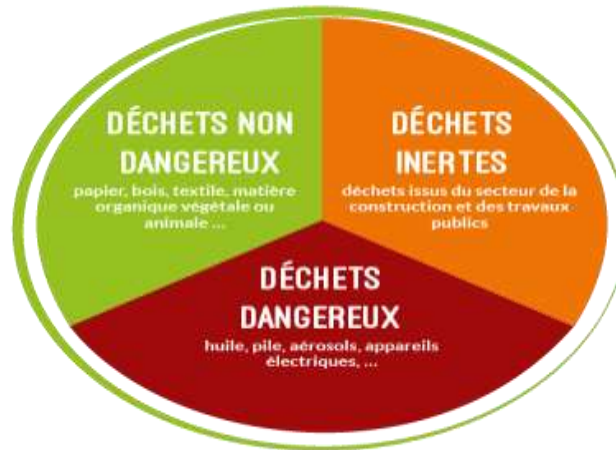


Figure. II.5 : Classification de déchets [04] [12]

II.6. Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci-dessous; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous produits industriels dans des conditions spécifiques [7].

II.6.1. Déchets industriels dangereux mais non toxiques

Ce type de déchets regroupe généralement :

- Des déchets de fer, de cuivre, de plomb,
- Des déchets contenant des fibres d'amiante,
- Des produits de préservation du bois,
- Des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment à caractère industriel.

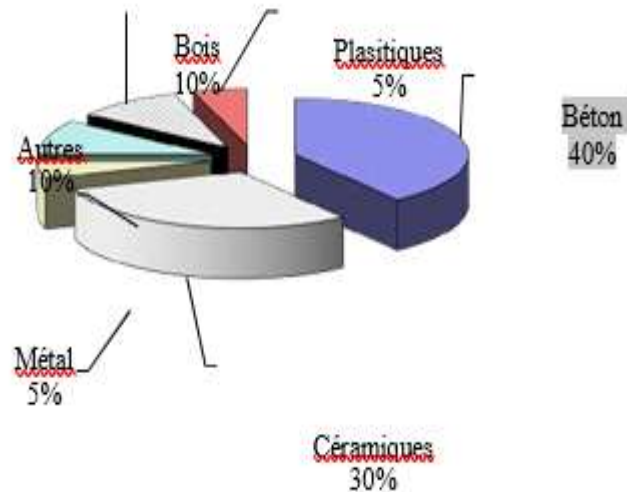


Figure. II.6 : Composition de base des déchets de démolition en Europe (2004) [4] [13].

II.6.2. Déchets inertes

Ce sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets. Les dépôts de déchets inertes sont souvent à l'origine de décharges sauvages [6].

Ce type de déchets regroupe :

- Des déchets solides de construction et de démolition des bâtiments à caractère d'habitation situé ou non sur un site industriel.
- Des déchets solides et inertes de travaux routiers,
- Des éléments en béton, mortier de ciment et béton,
- Des terres de déblais non contaminées.

II.6.3. Déchets toxiques

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques.

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques [7].

II.6.4. Déchets industriels dans des conditions spécifiques

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes les scories d'aciéries, le

laitier, les cendre volante, etc.) [7].

II.6.5. Déchets ménager et assimilés

Ce type de déchets regroupe :

- Des déchets en matériaux de synthèse,
- Des déchets solides non dangereux de construction ou de démolition de bâtiment à caractère industriel.
- Déchets volumineux ou "encombrants" soit collectés en porte à porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménages.
- Déblais et gravats produits par les ménages réceptionnés dans des déchetteries ou des dépôts réservés aux seuls déchets inertes.
- Déchets ménagers spéciaux (DMS), ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.
- Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.
- Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, ...).
- Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales comme les déchets plastiques.

II.6.6. Les déchets industriels banals (D.I.B)

Appelés quelquefois déchets industriels assimilés aux déchets ménagers, sont constitués de déchets non dangereux et non inertes. Ils contiennent effectivement les mêmes composants que les déchets ménagers mais en proportions différentes.

II.7. Activité du recyclage des déchets en construction

II.7.1. Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient.

Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés [11] [14] .

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.



Figure II.7 : Quelques exemples de déchets à recycler [15]

II.7.2. Technique de recyclage

II.7.2.1. Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

II.7.2.2. La chaîne du recyclage a collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement technique. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et

souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations [11] [16] .

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

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

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

II.7.3. Type de recyclage

On peut distinguer trois types de recyclage [12] [17] :

- le recyclage in situ : les installations de recyclage sont mobiles et il s'effectue sur le chantier de démolition ;
- le recyclage sélectif : il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ;
- le recyclage en site fixe : les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site.

L'avantage du premier type de recyclage consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

Le deuxième type de recyclage nécessite que les quantités stockées soient suffisantes. Le troisième type de recyclage s'effectue dans des conditions industrielles.

La nature spécifique des matériaux de démolition et de construction, un certain nombre d'opérations sont ajoutées aux fonctions traditionnelles de concassage-criblage :

- stockage sélectif des matériaux réceptionnés ;
- prétraitement : réduction des gros éléments, cisailage des ferraillasses ;
- déferrailasse (magnétique) : il peut être effectué en deux phases, l'une à la sortie du premier broyeur et la seconde après le criblage ;
- des tris manuels et mécaniques pour la récupération des papiers, des bois, des plastiques, etc. : il existe différents systèmes de séparation et de tri, en fonction des éléments à

retirer (épuration par flottaison, tables densimétriques, séparation au moyen d'un courant d'air, etc.)

II.7.4. Impacts du recyclage sur l'environnement

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [12].

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

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

II.8. Plastiques et Déchets plastiques

II.8.1. Les matériaux plastiques

II.8.1.1. Définition

« Une matière plastique ou familièrement un plastique désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un produit semi-fini ou à un objet. Le mot « plastique » dérive de malléabilité ou de plasticité qui est la propriété de la matière de se laisser former (ou déformer) d'une manière durable (par opposition à élasticité : possibilité de déformation temporaire) sous l'action d'une contrainte ou dans certaines conditions de températures [13] [18].



Figure II.8 : Les déchets plastiques [08] [19].

II.8.1.2. Les différentes étapes de recyclage du plastique

a. La collecte des plastiques

La collecte est une étape décisive dans le processus de recyclage des déchets plastiques. Elle est effectuée par les simples utilisateurs du plastique qui font le tri de leurs déchets plastiques à la maison et les déposent dans les bacs ou conteneurs de tri prévus à cet effet. Il peut s'agir des bouteilles et flacons en plastique, des sacs et films en plastique ou des pots ou récipients en plastique. Toutefois, certains types de plastiques ne sont pas recyclables, comme les plastiques ayant contenu des substances ou liquides extrêmement toxiques, dont les insecticides et les poisons. Il est donc conseillé de ne pas les mélanger aux déchets plastiques recyclables. Après cette étape, les plastiques ainsi collectés sont convoyés vers un centre spécialisé de tri.

b. Le centre de tri

C'est la grande étape de sélection minutieuse. En effet, tous les déchets plastiques ne possèdent pas les mêmes composantes. L'objectif ici est de regrouper par famille, les différents plastiques collectés. On trouvera par exemple :

- Le polyéthylène téréphtalate (PET) utilisé dans la fabrication des bouteilles d'eau, des boissons gazeuses, des flacons alimentaires ou d'huiles de cuisson ;
- Le polyéthylène haute densité (HDPE) utilisé dans la fabrication des bouteilles de lait, des pots de yaourt, des sacs en plastique ou des sachets pour céréales ;
- Le polystyrène (PS) utilisé dans la fabrication des boîtiers de CD, d'assiettes et gobelets jetables ou des boîtes pour les œufs ;

- Le polypropylène (PP) utilisé pour fabriquer les flacons de pilules, les couvercles de bouteilles ou les pots de ketchup.

Nombre parmi ces différents plastiques ne sont pas recyclés. Les plastiques recyclés ou recyclables sont reconnus grâce à un symbole en forme de triangle dessiné avec trois flèches de direction, retrouvé généralement en dessous de ces plastiques. Cette phase de regroupage minutieux par famille achevée, les déchets plastiques passent à une étape de compactage. Celle-ci consiste à ramollir et aplatir le plus possible, les déchets plastiques grâce à des machines spéciales. Les différentes étiquettes ou autres affichages collés sur les plastiques sont retirés grâce à la vapeur d'eau. On obtient par la suite d'énormes blocs cubiques appelés balles de plastiques. Celles-ci sont ensuite convoyées vers un autre centre pour la troisième étape : celle du broyage et du nettoyage.

c. Le broyage et le nettoyage

À cette étape, les balles de plastiques sont envoyées dans une machine où chaque plastique est soigneusement nettoyé. Cela permet de débarrasser l'ensemble de toutes les impuretés qui pourraient s'y retrouver. Une fois nettoyés, les plastiques sont envoyés dans des broyeurs de grande capacité où ils sont minutieusement broyés et déchiquetés grâce à des lames rotatives. Généralement après cette phase, on obtient des paillettes de différentes couleurs. Le résultat obtenu est introduit dans des laveuses industrielles pour un deuxième nettoyage. Au cours de ce nettoyage, les plastiques de type PET ou HDPE coulent, ceux provenant des bouchons et couvercles restent en surface. S'en suit, l'étape de séchage des paillettes.

d. Le séchage

Les paillettes obtenues ayant été nettoyées à l'eau et donc mouillées, cette étape consiste à les débarrasser de toute cette eau. Pour ce faire, diverses techniques peuvent être utilisées. Par exemple, les centrifugeuses sont utilisées pour sécher toute l'humidité contenue dans les paillettes. Elles servent également à débarrasser ces paillettes des dernières impuretés. Cela est nécessaire pour obtenir un mélange homogène.

e. L'homogénéisation

Après l'étape de séchage, le résultat obtenu est entièrement du plastique à l'état pur. Suivant différents procédés techniques très précis, cet ensemble de plastiques est envoyé dans un silo où il est chauffé à très forte température. Le chauffage continue jusqu'à l'obtention d'un ensemble homogène sur le plan couleur, comportement et texture. Tout ceci s'effectue en prenant en compte les consignes des clients ou la nature des objets finaux à fabriquer sur la base du plastique recyclé.

II.9. Types de matière plastique

Il existe trois grandes familles de matière plastiques: Les **thermoplastiques**, les **thermodurcissables** et les **élastomères**.

II.9.1. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires qui peuvent glisser les unes par rapport aux autres sous l'effet de la chaleur, ou de fortes contraintes

Les thermo plastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables.

II.9.2. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont constitués de réseaux macromoléculaires tridimensionnels, où des pontages entre chaînes empêchent tout glissement. Sous l'effet de la chaleur, le réseau renforce ses liaisons et se rigidifie. Sous de trop fortes températures, le thermodurcissable se dégrade (carbonisation).

II.9.2. Les élastomères

Polymère synthétique possédant les propriétés du caoutchouc naturel, telles qu'une grande capacité d'extensibilité et de reprise élastique. Exemples d'élastomères

- Le polychloropène (néoprène).
- Le caoutchouc.
- Pneumatique.

II.10. Déchets métalliques

Depuis quelques années, les cours des métaux en général ont fortement augmenté, poussés par la demande mondiale croissante. C'est ainsi que de nombreuses entreprises se sont lancées ou ont accentué leurs activités de récupération et recyclage des métaux en tous genres

En pratique, lorsqu'on évoque le recyclage des métaux, il est fait référence le plus souvent au recyclage de l'acier et de l'aluminium; ce sont les deux produits généralement collectés auprès des habitants: les boîtes de conserve en acier (ou fer blanc) et canettes en aluminium. Si l'on sort des collectes traditionnelles auprès des habitants, et que l'on se trouve vers l'industrie, il est possible de collecter d'autres produits métalliques qu'il est possible de recycler. Du plus commun comme le cuivre, il existe aussi des récupérations d'inox, de matériaux rares principalement issus des DEEE (déchet d'équipement électrique et électronique.). Les terres rares (groupes de 17 métaux aux propriétés convoités comme le terbium, le néodyme ou l'erbium) deviennent aujourd'hui un enjeu

stratégique d'avenir : la fabrication de produits des nouvelles technologies en nécessite de plus en plus. Par exemple, le gallium est utilisé pour les LED, l'indium entre dans la fabrication des écrans LCD (L'écran à cristaux liquides ou LCD). Avec peu de gisements propres, le recyclage peut être un nouveau gisement secondaire de ces métaux. Quelques chiffres

- ✓ 670 canettes d'aluminium pour fabriquer un vélo
- ✓ 19000 boîtes de conserve pour réaliser la carrosserie d'une voiture
- ✓ 50 kg de boîtes de conserve en acier sont produites par personne et par an
- ✓ Recycler 1 tonne de boîtes de conserve permet d'économiser : 2 tonnes de matières premières non renouvelables (minéral de fer, coke), 4 mois de consommation d'eau d'un habitant, 1 année de consommation d'énergie d'un habitant.



Figure II.9 : Décharge de déchets métalliques ferreux et non ferreux [15].

II.10.1. Les fibres métalliques

La fibre métallique est parmi les fibres les plus commercialisées vendues, et bien sûr disponibles sous des formes et dimensions les plus variées (figure. II .5). Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210 (GPa), une masse volumique de 7.85t/m^3 et une résistance à la traction de 1 à 2 (GPa). Elles existent sous diverses formes et longueurs. L'élanement est souvent compris entre 30 et 150 pour une longueur allant de 6.4 à 76 mm. Le pourcentage volumique de fibres métalliques dans le béton varie de 0.3 à 3%. L'optimisation du pourcentage de fibres, de la longueur et de la forme a donné lieu à de nombreuses études [16]



Figure II.10. Fibres métalliques [17]

Pour des usages particuliers, certaines fibres utilisées sont inoxydables ou traitées contre la corrosion. Leur principal avantage est une amélioration de la résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure [18].

De ces avantages découlent les principaux domaines d'utilisation: en particulier les dallages industriels, les ouvrages coulés en place tels que les pieux, piste d'aéroport, revêtement de tunnel, soutènement; ces deux dernières applications font appel à la technique des bétons projetés, les voussoirs de tunnel préfabriqués sur site, les produits en béton manufacturé tels que pannes, panneaux de façade, pré cadre de baies [19]. La recherche de l'adhérence et d'une bonne compatibilité avec le béton a donné naissance à une grande variété de fibres métalliques susceptibles, par leurs formes ou leurs états de surfaces de mieux s'ancrer dans le béton. A ce propos nous citons les fibres métalliques les plus utilisées :

- ✓ fils étirés et coupés, ondulés crantés, torsadés, avec crochets
- ✓ fibres usinées à surface rugueuse
- ✓ fibre de fonderie, la fibre de fonte se présente sous forme d'un mince ruban de 30 µm d'épaisseur










<u>Bouts ondulés</u>	<u>Bouts plats</u>	<u>Bouts en crochets</u>
		
<u>Crêpé</u>	<u>Tôle ondulée déformée</u>	<u>Tôle ondulée déformée</u>
		
<u>Tôle ondulée déformée</u>	<u>Amorphe</u>	<u>Autre machinage</u>
		

Figure II.11. Géométrie des fibres métalliques [20]

II.11. Le comportement thermique du béton

Bien que le béton soit l'un des matériaux les plus couramment utilisés en raison de sa durabilité, de sa polyvalence et de sa résistance aux charges mécaniques. Cependant, il est essentiel de comprendre et de gérer le comportement thermique de ce dernier, car les variations de température peuvent entraîner un impact négatif sur ses propriétés et sa performance. Les fluctuations de température engendrent des contraintes internes, des fissures, des déformations, et même des dégradations potentielles dans les structures en béton.

Le comportement thermique du béton est un aspect important à considérer lors de la conception et de la construction de structures, en particulier celles exposées à des variations de températures significatives, il est influencé par plusieurs propriétés thermiques essentielles :

- **Coefficient de dilatation thermique** : Le béton a un coefficient de dilatation thermique relativement faible par rapport à d'autres matériaux comme l'acier. Cela signifie qu'il se dilate et se contracte moins en réponse aux variations de température. Cependant, ces variations peuvent entraîner des contraintes internes dans le béton, ce qui nécessite une conception appropriée pour éviter des problèmes tels que les fissures.
- **Conductivité thermique** : Il s'agit de la capacité du béton à conduire la chaleur. La conductivité thermique de la composition du béton, du rapport eau-ciment, de la densité, et de la teneur en air. Les bétons légers, caractérisés par une densité plus faible, ont généralement une conductivité thermique plus basse que les bétons plus denses. La composition du béton, y compris les types de ciment et d'agrégats, peut également influencer cette propriété.
- **Capacité thermique** : La capacité thermique du béton représente sa capacité à stocker la chaleur. Elle dépend de la masse volumique du béton. En d'autres termes, les bétons les plus denses ont une plus grande capacité thermique. Cela signifie qu'ils peuvent stocker davantage de chaleur par unité de volume, ce qui peut influencer leur réponse aux variations de température.
- **Diffusivité thermique** : La diffusivité thermique est un paramètre qui combine la capacité thermique et la conductivité thermique du matériau. Le béton a une diffusivité thermique modérée, ce qui signifie qu'il peut réagir relativement rapidement aux variations de température.
- **Réponse à la chaleur à long terme** : Le béton peut subir des modifications de ses propriétés mécaniques en raison de l'exposition prolongée à des températures élevées. Des études de

durabilité et de stabilité sont essentielles pour comprendre comment le béton se comporte dans de telles conditions.

II.11.1 Effets des Variations de Température sur le Béton

Les variations de température peuvent provoquer divers effets sur le béton et les structures en béton, ce qui nécessite une compréhension approfondie pour garantir la durabilité et la performance des ouvrages de génie civil. Parmi les effets les plus courants, on peut citer :

- **Sur la résistance** : Des températures extrêmes, en particulier le gel et le dégel, peuvent avoir un impact sur la résistance mécanique du béton. Le béton doit être formulé et entretenu correctement pour résister à ces conditions.
- **Sur le retrait et le fluage** : Les variations de température peuvent influencer le retrait et le fluage du béton. Des mesures doivent être prises pour minimiser ces effets et garantir la durabilité de la structure.
- **Protection contre le gel et le dégel** : Dans les régions où le gel et le dégel sont courants, des mesures spéciales doivent être prises pour protéger le béton contre les dommages causés par l'expansion de l'eau lorsqu'elle gèle.
- **Protection contre la chaleur extrême** : Dans les régions où les températures peuvent devenir extrêmement élevées, des mesures doivent être prises pour éviter la dégradation du béton due à la chaleur.
- **Dilatation et Contraction Thermique** : Lorsque la température augmente, le béton a tendance à se dilater, c'est-à-dire à prendre plus de place. À l'inverse, lorsqu'il refroidit, il a tendance à se contracter. Ces variations dimensionnelles peuvent créer des contraintes internes dans la structure, qui, si elles ne sont pas correctement gérées, peuvent entraîner des fissures et des déformations. Les contraintes thermiques peuvent être particulièrement préoccupantes dans les zones soumises à des variations de température significatives.
- **Fissuration Potentielle** : Les contraintes thermiques résultant de variations de température peuvent provoquer des fissures dans le béton. Ces fissures peuvent être superficielles et esthétiques, ou plus profondes et structurellement problématiques. Les fissures permettent

l'infiltration d'eau et d'autres agents agressifs, ce qui peut entraîner une détérioration accélérée du béton.

- **Déformations Structurelles** : Les variations de température peuvent également provoquer des déformations structurelles non souhaitées, telles que le gauchissement des éléments en béton. Cela peut affecter l'alignement des éléments préfabriqués ou des éléments de structure et peut nuire à la sécurité et à l'apparence des bâtiments et des ponts.
- **Fragilité du Béton à Basse Température** : À des températures très basses, le béton peut devenir plus fragile et susceptible de se fissurer ou de perdre de sa résistance. Cela est particulièrement préoccupant.

II.11.2 Revues sur l'étude du comportement thermique du béton

D'après [Kalifa *et al.* 2000, Consolazio *et al.* 1997], le phénomène de L'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus Thermomécanique et le processus thermo-hydrique.

- **Le processus thermomécanique** : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée [Bazant *et al.* 1996] . De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent [Bazant *et al.* 1996, Khoury 1995, Khoury 1992, Schneider *et al.* 1982], tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation [Diederichs *et al.* 1989]. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire [Kalifa *et al.* 2000, Consolazio *et al.* 1997].
- **Le processus thermo-hydrique** : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure I-1 montre le mécanisme d'éclatement [Consolazio *et al.* 1997] lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer.

Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud.

Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du

phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement.

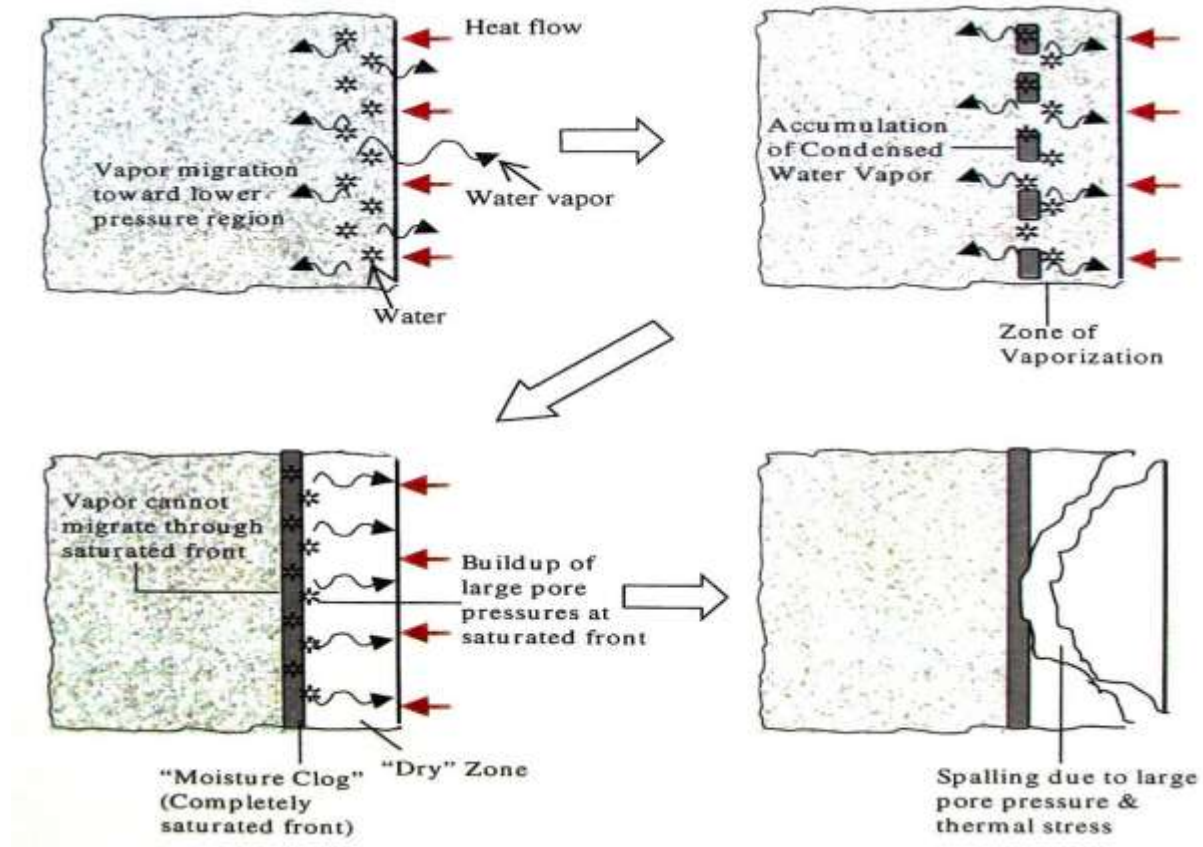


Figure II.12: Illustration du mécanisme d'éclatement [Consolazio et al. 1997]

Conclusion

Avec le développement rapide de ces dernières années, l'élimination des ordures est devenue primordial vue que les déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique.

Au niveau environnemental, le concept à retenir est celui de "trier" afin de réduire la quantité de déchets et l'impact qui en résulte sur l'environnement.

Au niveau économique, il est primordial de valoriser les déchets et leurs avantages. Il ne faut donc pas les détruire sans valorisation mais les utiliser pour fabriquer et créer des recyclant Cette approche peut apporter de multiples avantages économiques.

Donc le recyclage, par opposition à l'élimination, apporte une nouvelle valeur aux déchets tout en respectant la planète et son développement durable.

Il devient nécessaire de trouver des méthodes durables et innovantes de collectes sélectives et de traitement des déchets, dans l'espoir de préserver l'environnement, la santé de l'Homme, la qualité de vie et l'économie.

Chapitre III

Protocol expérimental

III.1. Introduction

Ce chapitre, présente les différentes caractéristiques des matériaux utilisés lors de la confection du béton, ainsi que les techniques expérimentales mises en œuvre pour caractériser leurs performances mécaniques. Nous avons aussi présenté les essais de flexion trois points et les essais de compression sur les différents spécimens étudiés.

III.2. Caractéristiques des matériaux

III.2.1. Le ciment

Nous avons utilisé un seul type du 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

➤ **Caractéristiques physiques du ciment**

Les caractéristiques physiques du ciment sont données dans le tableau(III.1).

Tableau.III.1 : Les caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques	Résultats	Norme
Consistance normale (%)	27.8	NFEN196-3
Début de prise (min)	190	NFEN196-3
Fin de prise (min)	265	NFEN196-3
SSB (cm ² /g)	4410	NFEN196-6
Masse spécifique (g/cm ³)	2.99	NFEN196-5
Retrait à 28 jours (µm/mm)	<1000	NFEN196-7

➤ **Caractéristiques chimiques du ciment**

Les caractéristiques chimiques du ciment sont données dans le tableau(III.2).

Tableau.III.2 : Composition chimique du ciment.

CaO	SiO₂	Al₂O₃	FeO₃	SO₃	Na₂O	K₂O	MgO	Chlorures	PAF	insoluble
60.4	20.71	5.45	3.63	2.37	0.23	0.65	2.15	0.007	4.28	-

➤ **Caractéristiques minéralogiques du ciment**

Les caractéristiques minéralogiques du ciment sont données dans le tableau(III.3).

Tableau.III.3 : Composition minéralogique du ciment.

Éléments	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaO	gypse	Calcaire	Pouzzolane
(%)	58	18	05	13	01	05	05	07

III.2.2. Eau de gâchage

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer qui contient environ 30 g/l de chlorures de sodium, pour la fabrication des bétons armés ou précontraints. L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet.

Le tableau III.4, résume les fractions massiques calculées par la méthode DREUX-GORISSE, pour les différents constituants du béton utilisé dans notre expérience.

Tableau.III.4: Dosage des constituants pour 1m³ de béton.

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

III.2.3. Le sable

Le sable utilisé pour le mélange provient de l'oued De 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 séché

Figure. III.2 :Sable utilisés

III.2.4. Les granulats

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



Gravier 8 /15

Gravier 3 /8

Figure.III.3 : Les granulats utilisés.

III.2.5. 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 Fluidifiants commercialisé sous le nom Sika Plast BV 40+.



Figure. III.4: Fluidifiants Sika Plast BV 40+.

III.2.6. Les renforts

Les renforts utilisés dans notre recherche sont les fibres métalliques et fibres polypropylène

III.2.6.1. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques utilisées sont des fibres Sika RC-80/50-BN qui est une fibre structurale métallique fabriquée à partir de fils d'acier tréfilés en forme de baïonnette pour permettre un meilleur ancrage dans le béton. Selon le dosage employé et l'application, les Fibres RC-80/50-BN permet la réduction ou la suppression des armatures structurales. Le conditionnement sous forme de plaquettes de fibres encollées permet d'assurer une bonne répartition dans le béton.



Figure.III.5 : Fibres métalliques

Les caractéristiques des fibres métalliques sont présentées dans le tableau III.5 suivant :

Tableau.III.5 : Caractéristiques des fibres métalliques

Longueur (mm)	50
Diamètre (mm)	0,62
Module d'élasticité	20 000
Résistance à la traction (Mpa)	1270
Densité	7,8

➤ **Avantage des fibres métalliques SIKA**

Les fibres se dispersent très facilement et créent un réseau fibré haute densité qui a pour conséquence :

- Une amélioration de la ductilité grâce à la capacité des fibres à se déformer pour des efforts élevés
- Une augmentation de la ténacité liée à la redistribution des contraintes et l'amélioration de l'absorption d'énergie nécessaire à la rupture
- Un meilleur contrôle de la fissuration grâce à la reprise des contraintes qui permettent de maîtriser l'ouverture des fissures en s'opposant à leur propagation

III.2.6.2. Fibres polypropylène

Les fibres de polypropylène sont des fibres synthétiques fabriquées à partir de polymères de propylène. Le polypropylène est un type de plastique dont les principales caractéristiques sont sa légèreté, sa résistance à la déchirure, son imperméabilité à l'eau et sa durabilité. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines, notamment dans l'industrie textile, la construction, l'automobile et l'emballage. Elles sont souvent utilisées comme renfort dans les tissus et les matériaux composites en raison de leur résistance et de leur légèreté. Elles sont également utilisées pour fabriquer des cordes, des tapis, des filtres et des géotextiles.



Figure. III.6 : Fibres polypropylène

Les caractéristiques des fibres métalliques sont présentées dans le tableau III.6 suivants :

Tableau.III.6: Caractéristiques des fibres polypropylène

Longueur (mm)	50
Largeur (mm)	2
Epaisseur (mm)	2
Densité (gr/cm ³)	0.91

III.3. Caractérisation du sable

III.3.1. 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.7 : 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 .

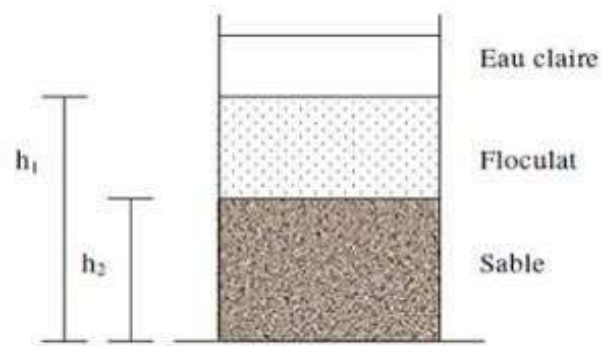


Figure.III.8: Éprouvette après agitation.

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

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

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.9: Essai de l'équivalent de sable.

Tableau.III.7 : Valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du 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.

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

III.3.2. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il existe trois méthodes possibles :

- Méthode de l'éprouvette,
- Méthode du pycnomètre liquide,
- Méthode de la pesée hydrostatique.

Dans notre cas nous avons opté pour la méthode de l'éprouvette. Le principe de la méthode de l'éprouvette est très simple et très rapide :

- Remplir l'éprouvette d'un volume d'eau (V_1)
- Prise d'un échantillon de sable d'environ 300g (M_s)
- Introduire cette masse d'échantillon dans l'éprouvette, éliminer toutes bulles d'air (Vibrer et secouer légèrement)
- Lire le nouveau volume (V_2).

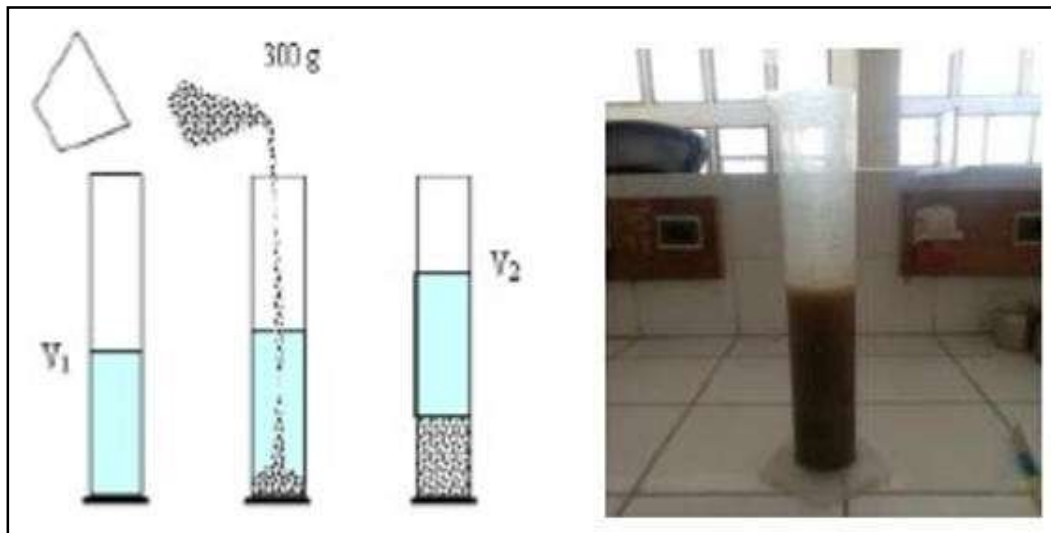


Figure.III.10 : Essai de masse volumique absolue.

La masse volumique absolue est calculée :

$$\rho_s = M_s/V_s$$

Avec:

M_s est le poids de l'échantillon ($M_s=300g$)

$$V_s = V_2 - V_1$$

$$(V_2 = 511 \text{ ml et } V_1 = 400 \text{ ml})$$

On aura donc:

$$\rho_s = 2.7\text{g/cm}^3.$$

III.3.3. Masse volumique apparente

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

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

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

M_1 : Masse de récipient

M_2 : Masse de récipient remplie

V : Volume de récipient

Par définition la masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis à l'aide d'un récipient de 1dm^3 en versant lentement le sable entre les 2 mains à 10cm au-dessus du récipient puis arasé à la règle. Le contenu est pesé. Elle est comprise entre $1\,400\text{ kg/m}^3$ et $1\,600\text{ kg/m}^3$ pour les granulats roulés silico-calcaires. Elle est définie par le rapport entre la masse du matériau sec sur son volume total.



Masse volumique de sable

Masse volumique gravier 8/15

Masse volumique gravier 3/8

Figure.III.11 : Les granulats

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue la masse volumique absolue et la masse volumique apparente. Les résultats sont représentés dans le tableau III.8.

Tableau III.8 : Masses volumiques absolue et apparente des granulats.

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

III.4. Analyse granulométrique (NF P18-560)

Une analyse granulométrique des différents agrégats est effectuée pour déterminer la distribution granulaire des grains de ces derniers et en déduire le module de finesse (MF).

Pour cet essai, nous avons utilisé le matériel suivant :

Une balance, des tamis à mailles carrés de différentes ouvertures et un tamiseur électrique.

La série de tamis utilisée est la suivante : 3.15-2.25-1.25 -0.63 - 0.315 -0.16 -0.08 mm.

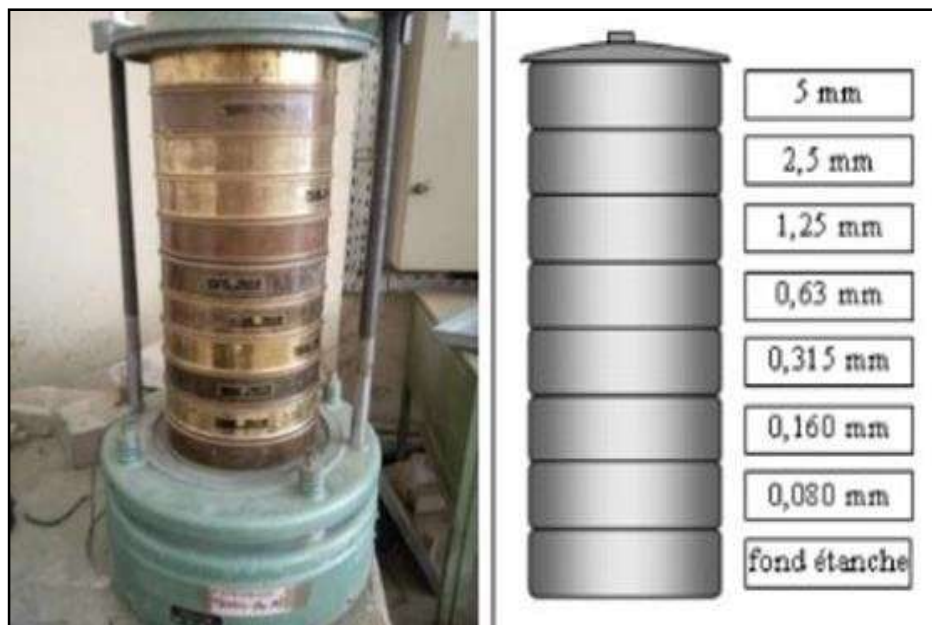


Figure.III.12 : Le Tamiseur électrique utilisé avec la série de tamis.

Les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur les différents agrégats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

➤ Analyse granulométrique du sable (0/3)

Tableau III.9 : 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

➤ Analyse granulométrique du gravier (3/8)

Tableau III.10: 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

➤ Analyse granulométrique du gravier (8 /15)

Tableau III.11: 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

➤ Courbe granulométrique

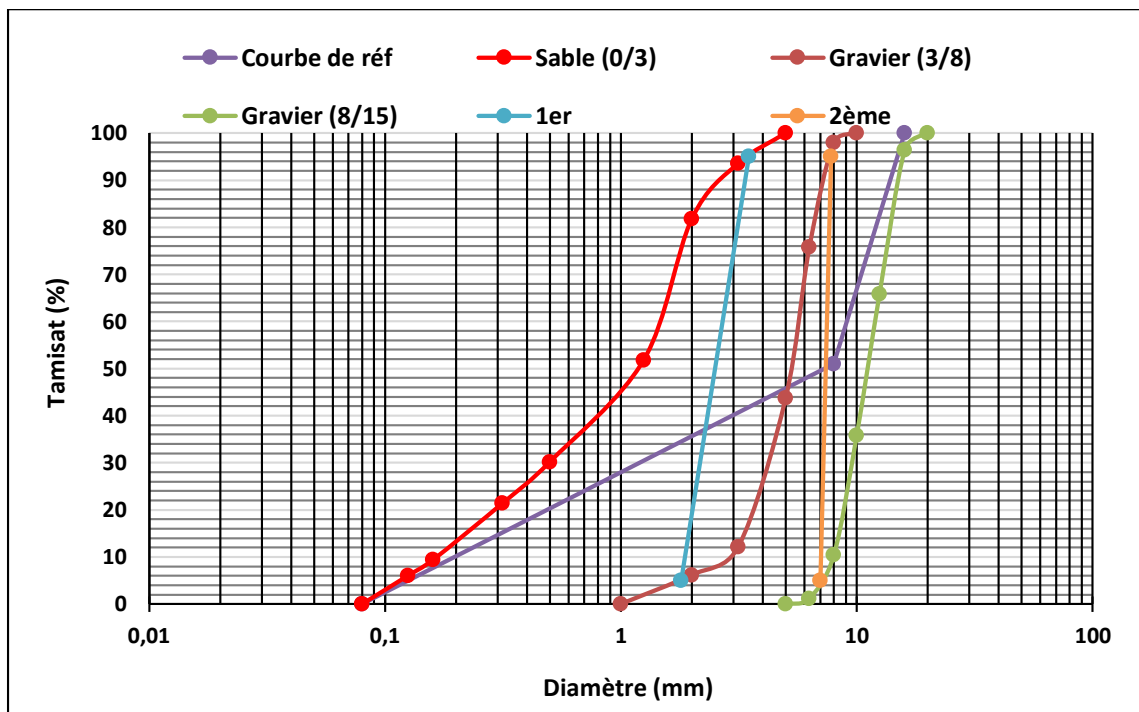


Figure.III.13. Courbe Granulométrique.

➤ Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulats est riche en éléments fins. Le module de finesse est égal au 1/100^e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5mm (selon la Norme Française [NFP 18-540]).

$$M_f = \frac{\sum(\text{Refus cumulé en \%})}{100}$$

Lorsque M_f est :

- $1.8 < M_f < 2.2$: le sable est à majorité de grains fins,
- $2.2 < M_f < 2.8$: on est en présence d'un sable moyen,
- $2.8 < M_f < 3.3$: le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Dans notre cas le résultat obtenu :

$M_f = 2,92$ Donc notre sable est un peu grossier

III.5.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 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie.



Figure.III.14 : Détermination de d’affaissement du béton à l’état frais.

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

Tableau III.12: Les résultats d’affaissement du béton.

Les composants du béton	Affaissement
Béton témoin	7cm
Béton fibres PP	3cm
Béton fibres M	3cm
Béton fibres M,PP	2.5cm

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

Tableau.III.13: Évaluation de l’ouvrabilité par référence à l’affaissement NF-EN-206/CN.

Plasticité	Serrage	Affaissement [Cm]	Dénomination NF-EN-206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1/S2
Béton plastique	Vibration courante	6à 9	S3
Béton mou	Piquage	10à13	S4
Béton liquide	Léger piquage	≥14	S3/S4/S5

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.6. Confection du béton

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

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 éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression sont de forme cylindrique de diamètre 10cm et hauteur 20cm (NFEN12390-3), 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.



Figure. III.15: Fabrication du béton dans un malaxeur à axe vertical

III.7. 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



Figure.III.16 : Éprouvettes en cure d'hydratation.

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.17 : Éprouvettes après la cure d'hydratation.

III.8. Essai à l'état durci

III.8.1. Essai de compression uni-axial

Les essais sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques (ϕ 10 – 20) cm². 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.16). 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.18 : Presse hydraulique AUTOTEST

III.8.2.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.17). 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 :

$$\sigma_t = \frac{3 \times F \times l}{2bh^2}$$

Avec:

F : 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.19: Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.

III.8. 3. Essais thermiques

Chaque cycle (chauffage-refroidissement) se compose de trois étapes. Le premier constitue une rampe de réchauffement à une vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$. 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 $-1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ 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.

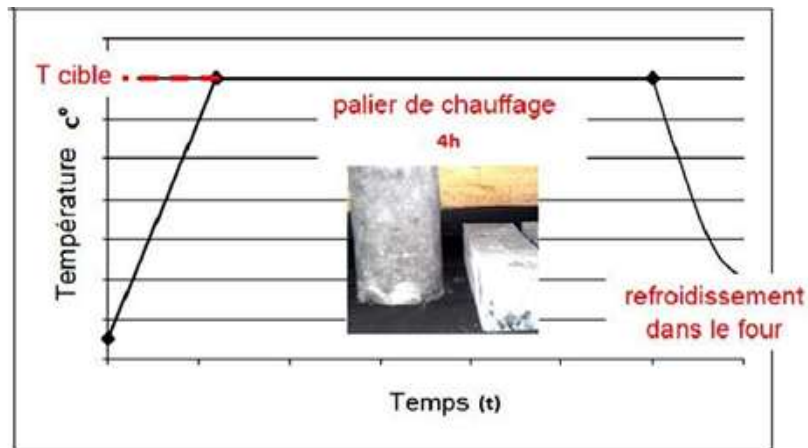


Figure III.20 : Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes

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.



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 20°C
- Une autre série d'éprouvettes soumises aussi à une compression et traction par flexion mais une avoir une température de 600°C et 800°C

Le béton est formulé avec les différents types de fibres (Métalliques, Polypropylène et Mixte). Le test de compression a été fait sur des échantillons cylindriques (φ 10 – 20) cm 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 quatre (04) gâchés de béton au total :

- ❖ **BT**: béton témoin (béton sans fibres),
- ❖ **BFP**: béton avec des fibres de polypropylène (0.35%),
- ❖ **BFM**: béton avec des fibres métalliques (1%),
- ❖ **BFM,PP**: les bétons avec association de fibres de polypropylène (0,35%) et fibres métalliques (0,5%).

IV.3. Perte de masse

Pour déterminer la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, chaque échantillon chauffé est directement pesé pour éviter tout phénomène de réhydratation. Les échantillons ont été pesés avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Ce test consiste donc à déterminer la perte de matière (ou de masse) qu'un échantillon subit pendant le chauffage par rapport à son état initial (état avant chauffage).

La Perte la masse exprimée en pourcentage est obtenue comme suit :

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

Avec:

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

M_T : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement. Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g. Les résultats sont présentés dans la figure (IV.1).

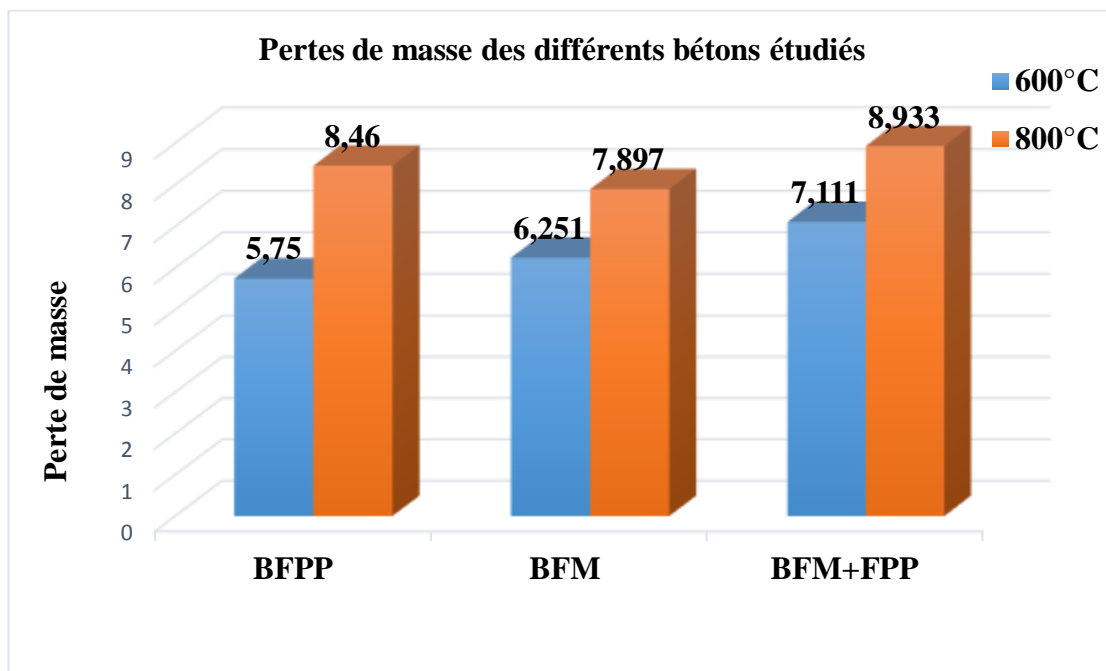


Figure. IV.1 : Pertes de masse des différents bétons étudiés

Le calcul de la perte de masse est la moyenne des trois valeurs effectuées sur l'échantillon cylindrique. On constate que plus la température est élevée, plus la perte de masse est importante. A 600°C, la perte de masse des différents bétons fibrés est quasiment la même. Alors que pour une température de 800°C, le béton de fibres mixtes a montré une perte de masse assez importante. En effet, au vu de la nature de la fibre, les fibres polypropylènes, d'origine plastique fondent plus rapidement que les fibres métalliques, l'écart est ressenti puisque à 600 °C on a une perte de masse de 5.75 contre une perte de masse plus grande à 800°C elle est de l'ordre de 8.46, soit un écart de 32.03%. Cet écart de perte de masse est moins ressenti dans les bétons à base de fibres métalliques, du fait de la nature de ces fibres.

On note un écart de l'ordre de 20.84% entre les deux températures. Dans le cas du béton à de l'association des deux types de fibres, cette exposition à ces températures assez élevée, on dénote une perte de masse à 600 °C de 7.111 contre une perte de masse à 800 °C de 8.933, soit un taux de 20.39% très proche de celui des fibres métalliques. Ceci s'explique que le pourcentage des fibres métalliques est plus prédominant par rapport au taux de fibres polypropylène présent dans le béton.

IV.4. Essai de compression

IV.4.1. Résistance à la compression

Les essais de compression ont été réalisés sur des cylindres (ϕ 10– 20)cm².

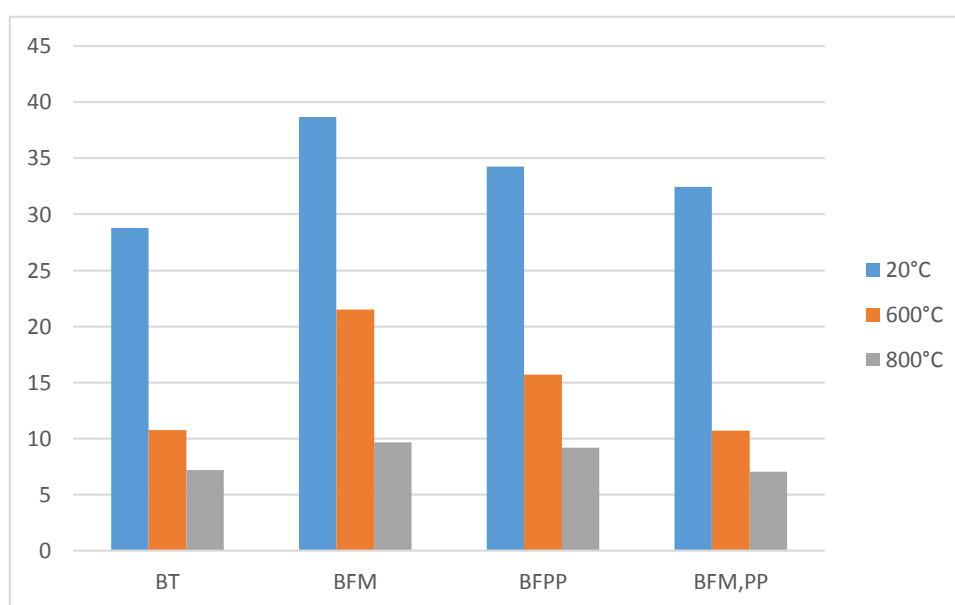


Figure. IV.2: Résistance à la compression des différents bétons.

Dans la figure (IV.2), pour toutes les températures, on peut voir que le béton de fibres métalliques (BFM) présente une résistance à la compression supérieure à celle du béton de fibres de polypropylène (BFPP) et du béton de fibres mixtes (BFM, PP). La résistance de tous les types de béton a diminué significativement à 800°C par rapport au béton à 20°C. Le béton de fibres mixtes (BFM,PP) est d'environ 80 %, le béton de fibres de polypropylène est d'environ 87 % et le béton de fibres métalliques (BFM) est d'environ 75 %.

IV.4.2. Influence de la température

Les courbes contrainte-déformation à la compression ont été tracées pour les différents bétons étudiés, voir figure (IV.3), (IV.4) et (IV.5)

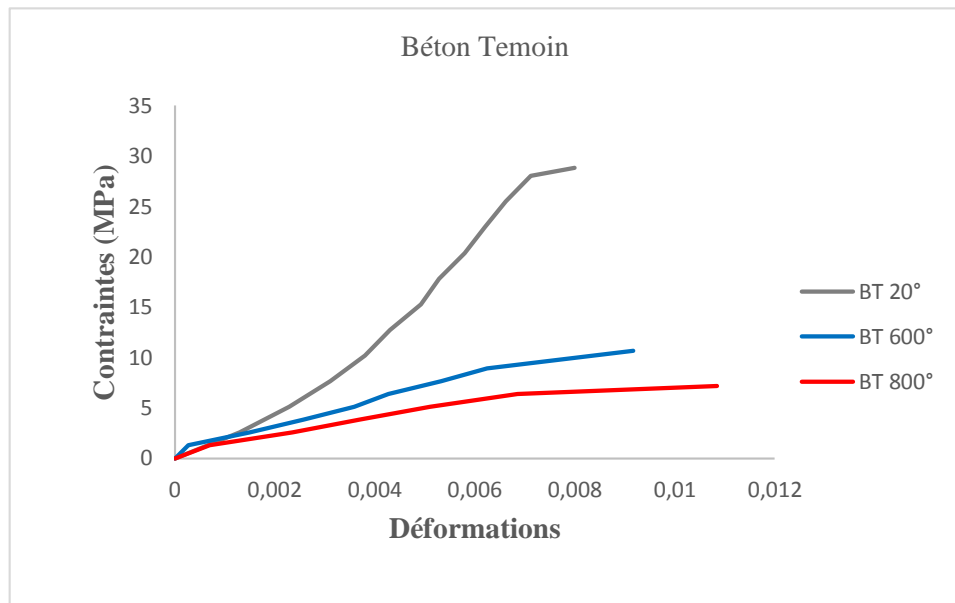


Figure. IV.3: Courbes contraintes-déformations du béton témoin (BT).

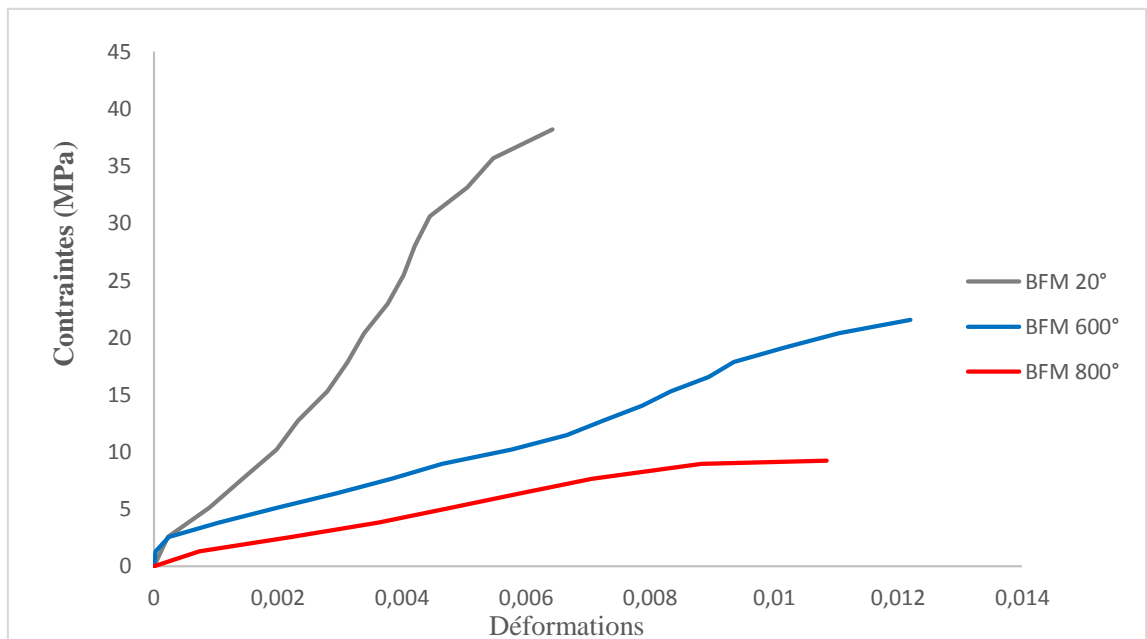


Figure. IV.4: Courbes contraintes-déformations du béton de fibres métalliques (BFM)

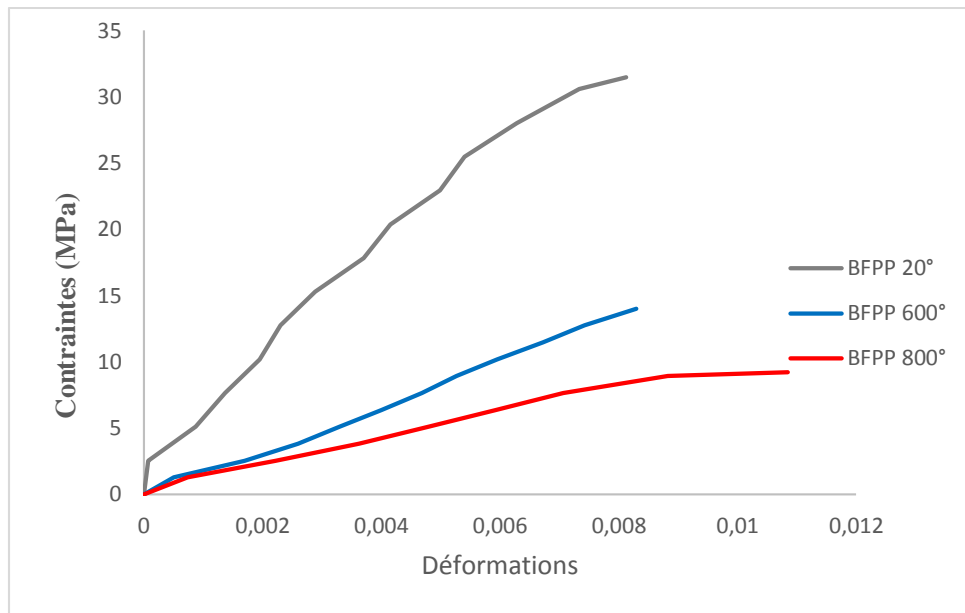


Figure. IV.5: Courbes contraintes-déformations du béton de fibres de polypropylène (BFP).

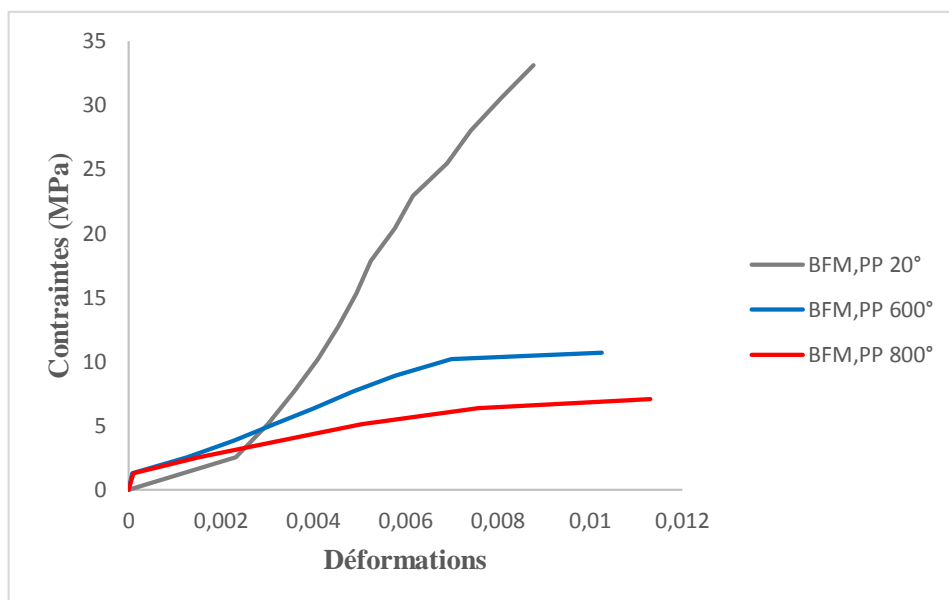


Figure. IV.6 : Courbes contraintes-déformations du béton de fibres mixtes de (BFM,PP).

Pour tous les types de béton étudiés, 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. Le béton de fibres métalliques (BFM) et béton de fibres à mixtes (BFM,PP), bien qu'ils présentent une résistance moindre mais ils ont présenté une meilleure ductilité.

IV.4.3. Influence du type de fibres

Les courbes contraintes-déformations à la compression en fonction du type de fibres sont données dans les figures (IV.6), (IV.7) et(IV.8).

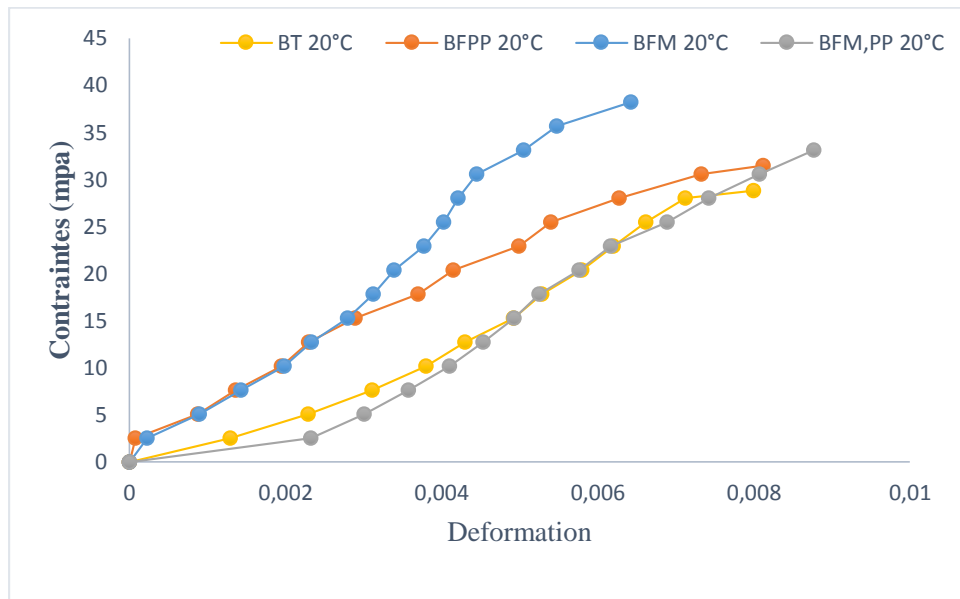


Figure. IV.7 : Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 20 °C.

Pour les bétons non soumis aux cycles chauffage-refroidissement (20°C), on constate que le béton de fibres métalliques a présenté une meilleure contrainte de rupture par rapport au béton de fibres de polypropylène et béton de fibres mixte. Aussi le béton de fibres métalliques a présenté une pente (partie élastique) supérieure aux autres bétons. Cependant la pente donnée par le béton de fibres de polypropylène et béton cocktail est presque de même allure.

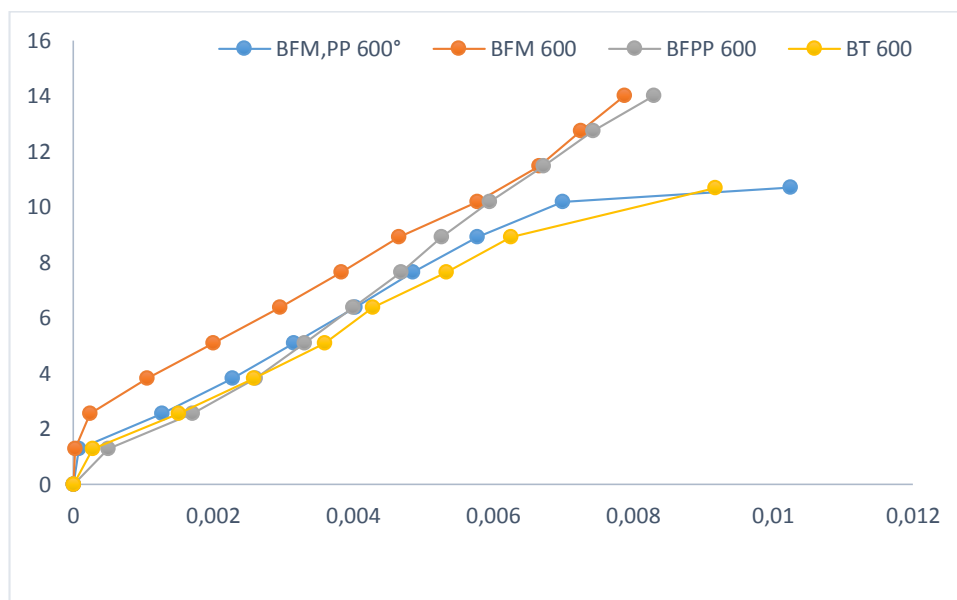


Figure. IV.8: Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 600°C.

A 600°C, la contrainte à la rupture de tout béton ne dépasse pas 20 MPa. La pente du béton renforcé de fibres d'acier est légèrement supérieure à celle du béton renforcé de fibres de polypropylène et du béton renforcé de fibres mixtes.

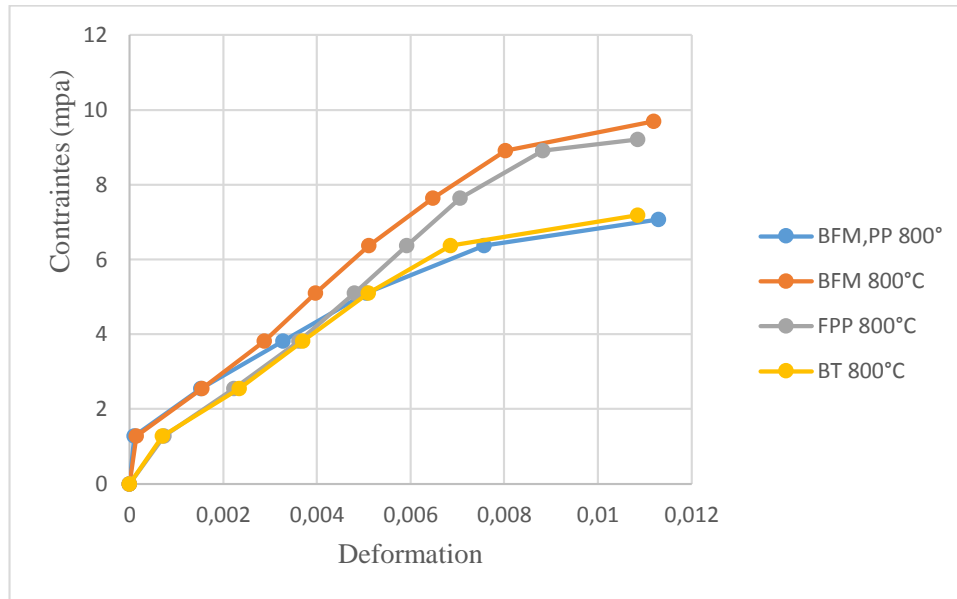


Figure IV.9: Courbes contraintes-déformations des bétons étudiés à 800°C.

A 800 °C, le béton de fibres de polypropylène et le béton de fibres mixtes présentait la même contrainte de rupture et la même pente. Le béton renforcé de fibres d'acier contrairement il présente les meilleures propriétés.

IV.4.4. État des surfaces des spécimens



Figure IV.10 : L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.

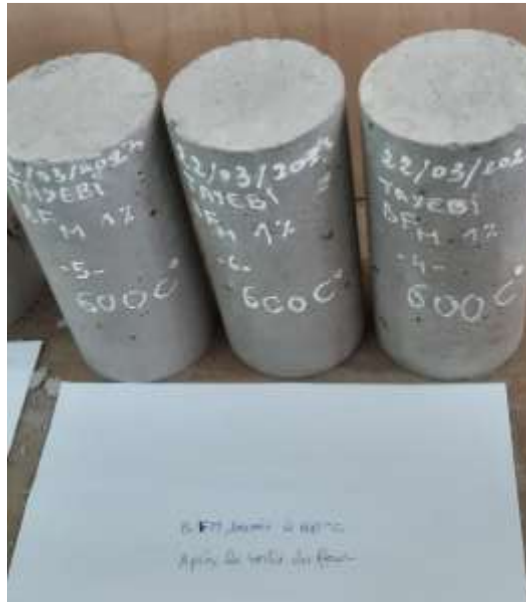


Figure. IV.11: L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres métalliques à la sortie du four.



Figure. IV.12: L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres mixtes

En analysant l'aspect des éprouvettes à la sortie du four, on a relevé des désordres sous forme de petites fissures, dispersées le long des surfaces des différentes éprouvettes dans tous les spécimens d'étude à savoir béton de fibres métalliques et le béton de fibres de polypropylène. Les désordres sur les surfaces sont plus prononcés sur les surfaces de béton de fibres mixtes soumis à une température de 800°C, une perte de matière sur une moitié latérale des cylindres est aussi constatée c'est peut être à cette association de fibres qui l'une présente un comportement ductile (fibres de polypropylène) mais subit rapidement la fusion et l'autre type de fibres qui sont les fibres métalliques qui présentent un caractère plutôt résistant, l'influence du dosage de ces fibres est sûrement un facteur à prendre en

considération .

IV.5. 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 force-déplacement ont été tracées pour chaque type de béton et pour chaque température étudiée.

IV.5.1. Influence de la température

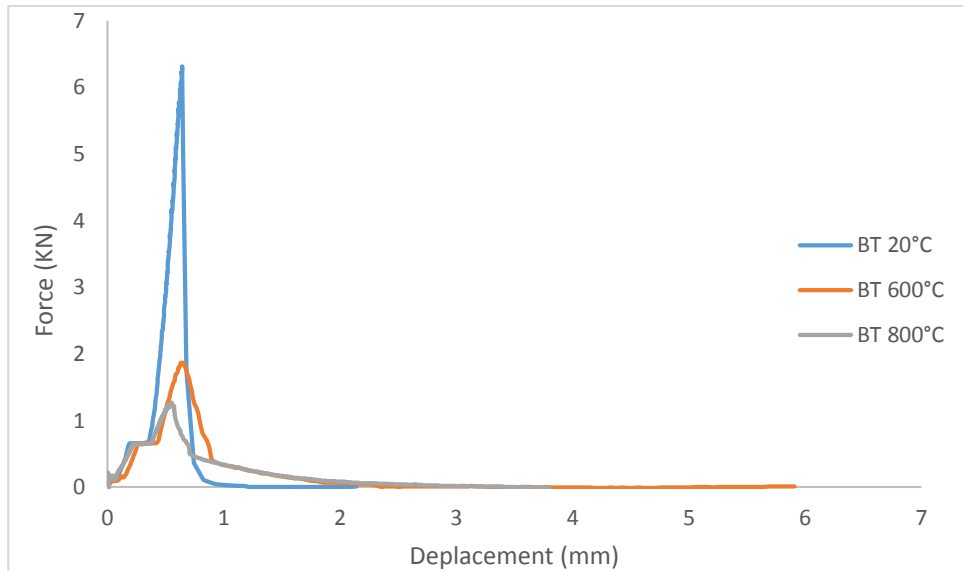


Figure. IV.13: Courbes forces-déplacement du béton témoin

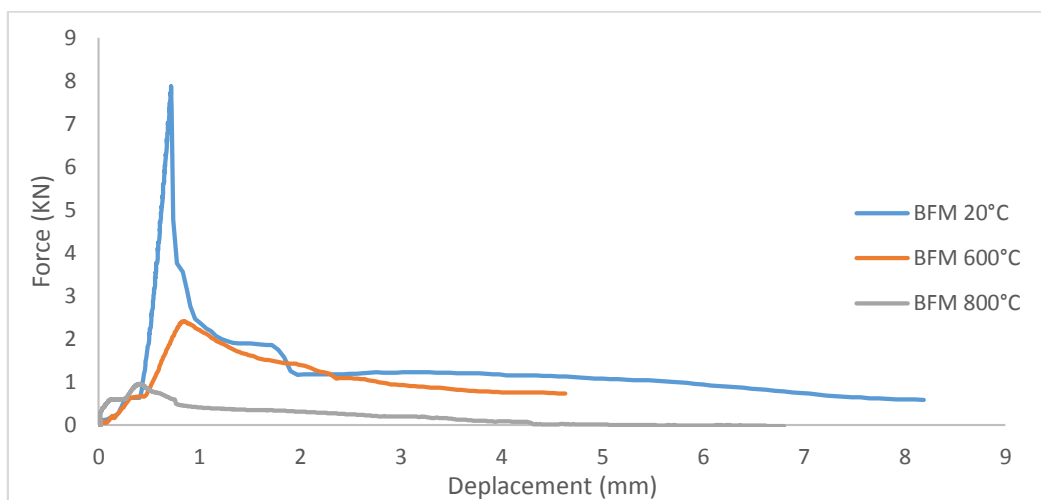


Figure. IV.14: Courbes forces-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM).

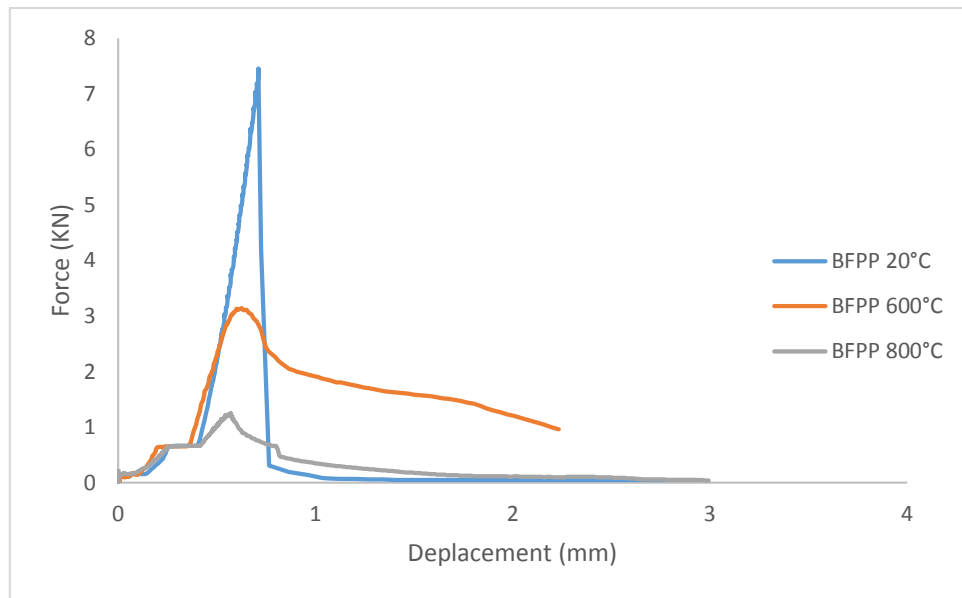


Figure.IV.15: Courbes forces-déplacement du béton de fibres polypropylène (BFPP)

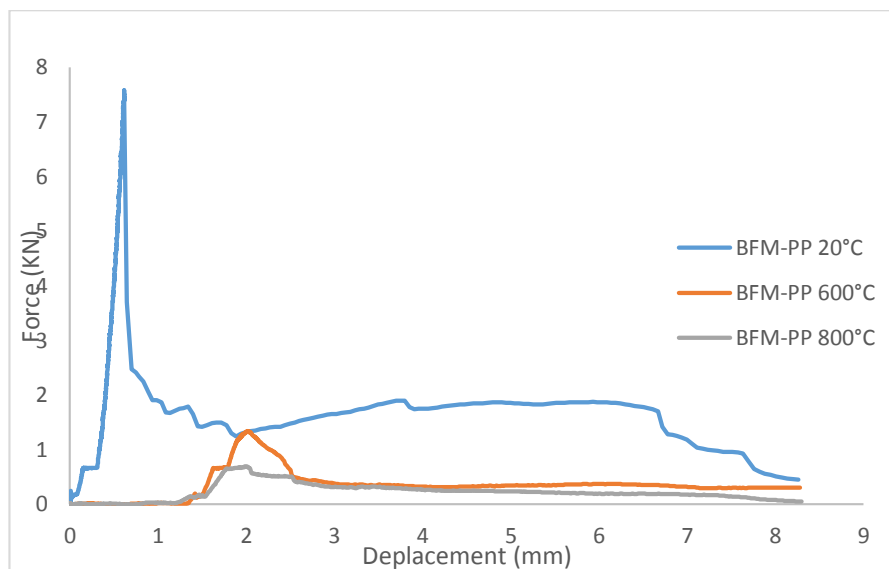


Figure. IV.16: Courbes forces-déplacement du béton de fibres mixtes (BFM-PP)

En augmentant la température, on observe une réduction de la résistance à la flexion des divers types de béton examinés. À une température de 800°C, une diminution très significative des résistances est constatée.

IV.5.2. Influence du type de fibres

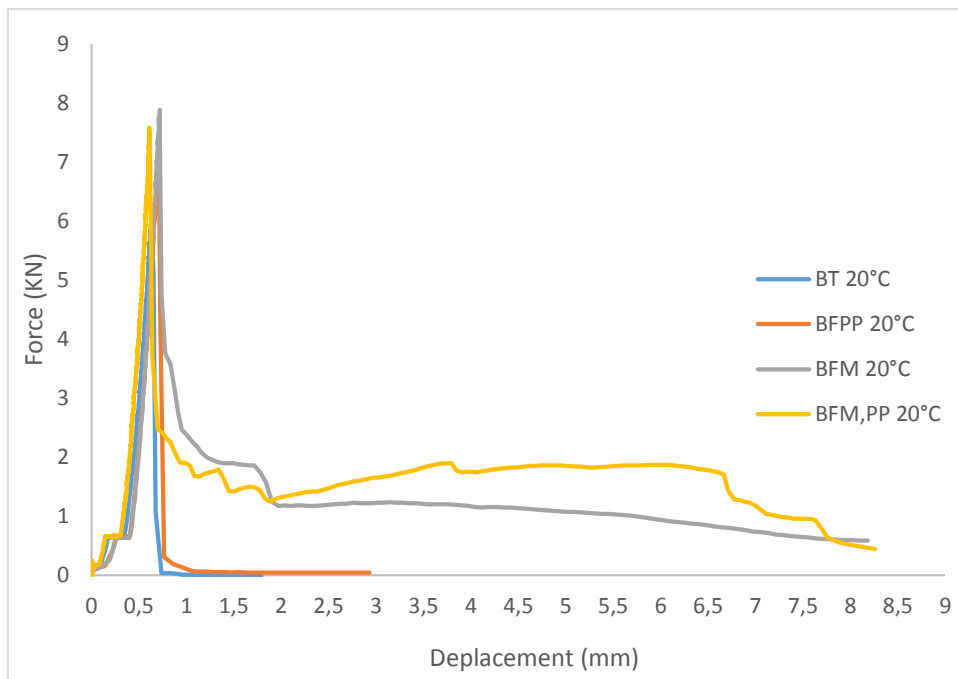


Figure. IV.17: Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 20 °C.

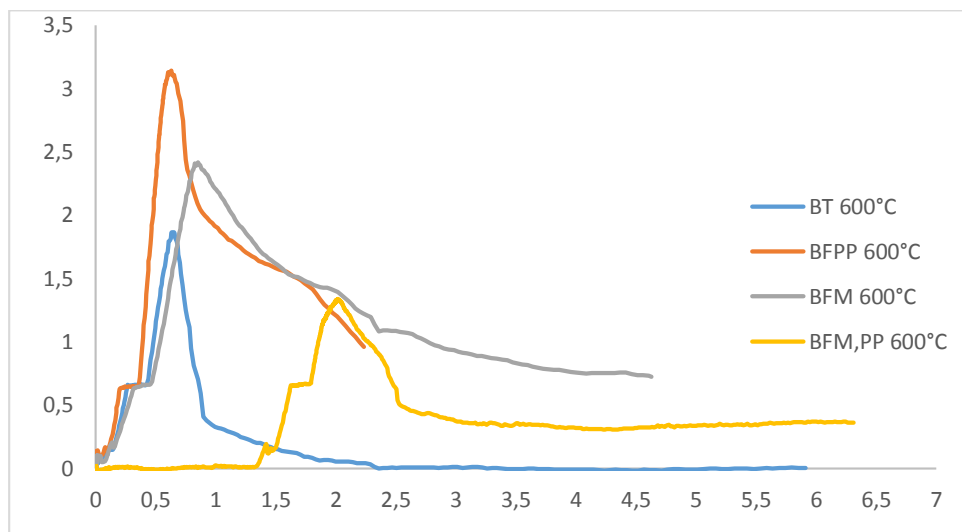


Figure. IV.18: Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 600 °C.

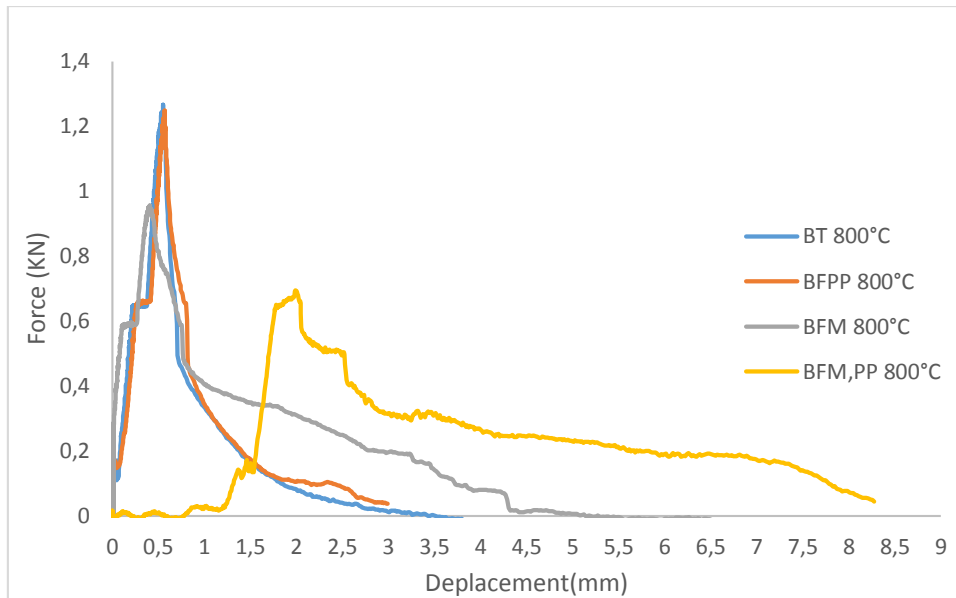


Figure. IV.19: Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 800 °C.

Les courbes force-déplacement des bétons de fibres métalliques ont montré un comportement meilleur en flexion trois points par rapport aux spécimens pour toutes les températures étudiées. Leur comportement après le pic de charge est également meilleur que celui des autres bétons, tels que les bétons de fibres de polypropylène (BFPP) et les bétons de fibres mixte (BFM,PP). Au fur et à mesure que la température augmente, une chute significative de la résistance est observée pour tous les bétons fibrés étudiés.

IV.5.3. État de surface des spécimens



Figure. IV.20: Aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.



Figure. IV.21: L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton mixte (BFM,PP) à la sortie du four.

Les bétons de fibres mixtes et les bétons de polypropylène ont présentés des fissures bien visibles et très importantes à la surface des éprouvettes, à la sortie du four. À une température, la dégradation en surfaces est très visible.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette recherche expérimentale est une contribution à une meilleure compréhension du comportement du béton exposé à des températures élevées et de l'influence des fibres de polypropylène et/ou métalliques. Des échantillons de béton, avec ou sans fibres, ont été fabriqués et testés. Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont été établies :

La perte de masse a augmenté avec l'augmentation de la température pour tous les types de bétons étudiés. Une température de 600°C a provoqué une forte augmentation de la perte de masse, correspondant à la libération de l'eau chimiquement liée. À 800°C, la perte de masse est due à la dégradation de la matrice cimentaire. À 600°C, tous les bétons fibrés ont montré des pertes de masse similaires, tandis qu'à 800°C, le béton de fibres mixte a subi une perte de masse plus importante.

Pour toutes les températures, les bétons de fibres métalliques ont présenté une résistance à la compression supérieure à celle des bétons de fibres de polypropylène et du béton de fibres mixte. À 800°C, une importante chute de résistance a été observée pour tous les types de béton par rapport aux échantillons à 20°C. L'ajout de fibres métalliques améliore les propriétés mécaniques du béton aux températures de 600°C et 800°C. L'amélioration de la résistance en traction est plus prononcée que celle de la résistance en compression après chauffage à 600°C. Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour améliorer sa résistance. 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.

En ce qui concerne l'apparence des échantillons cylindriques après le chauffage, des fissures sous forme de faïençage sont apparues pour les bétons de fibres métalliques et les bétons de fibres de polypropylène. Le béton de fibres mixtes soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié de la surface latérale des cylindres. En revanche, aucun détachement de matière n'a été observé pour les échantillons prismatiques.

Ces résultats soulignent l'importance des fibres métalliques pour améliorer les propriétés mécaniques du béton à haute température et mettent en évidence les différences de comportement entre les différents types de béton fibré. Ils fournissent des informations précieuses pour la conception de structures résistantes au feu et ouvrent des perspectives intéressantes pour de futures recherches visant à optimiser les performances des bétons fibrés dans des conditions extrêmes.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] <https://decorexpro.com>
- [2] <https://linteraute.fr>
- [3] 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.
- [4] ADAMM.NEVILLE, Propriétés des bétons, Eyrolles, Paris,(Septembre2000).
- [5] Farez, Mohamed, Simulation numérique de cylindres en béton, confinés avec un tissu a base de fibres de verre. 2022. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- [6] Hamlil, Dyhia, Renforcement, en flexion, d'éléments poutres en béton. 2022. Thèse de master. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- [7] Courard L., 'Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil', Notes de cours (Université de Liège, Construction, 1998).
- [8] Dardare J., " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène & quot, In : fibre reinforced cement and concrete, RILEM
- [9] <https://sibreca.fr/valoriser-dechets/compostage-dechets-organiques/>
- [10] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dechet-ultime-5727/>
- [11] <https://clikeco.com/revalorisation-des-dechets-dangereux-est-ce-possible/>
- [12] <https://www.notretemps.com/vie-pratique/maison/environnement-les-trois-quarts-des-dechets-ne-sont-pas-recycles-15369>
- [13] <https://cy-clope.com/classification-des-dechets/>
- [14] NF P 18-407,2003 «Essai pour béton durci. Partie 4 : Résistance à la traction des éprouvettes », AFNOR
- [15] Pascal Casanova. « Bétons renforcées de fibres métalliques », École nationale de, Paris, 1995.
- [16] https://prevert.pays_de_la_loire.e-lyco.fr/demarche-de-developpement-durable/le-recyclage-des-dechets-au-lycee/
- [17] DJEBALI Saïd : « caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques » Thèse doctorats, université Mouloud MAMMERI de Tizi-ouzou , 22 juin 2013

Références Bibliographiques

- [18] AITAMEUR, Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales. Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.
- [19] IR. P BOERAEVE, cours de béton armé, (janvier 2010).
- [20] <http://www.planete-durable.com/le-recyclage-des-dechets-plastiques-comment-ca-fonctionne/>
- [21] <https://www.emc.nc/service/valoriser-les-dechets-metalliques/metaux-non-ferreux/>
- [22] HAOUARI H. "Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques", Thèse de doctorat, INSA Lyon, France, 1993.
- [23] <https://docplayer.fr/54289979-Les-betons-de-fibres-metalliques.html>
- [24] DREUX G., FESTA J. "Nouveau guide du béton et ses constituants" Edition Eyrolles, Huitième Edition, Mai 1998.
- [25] CHAALAL O. : "Contribution à l'étude de durabilité des tiges en fibres de verre comme armature à béton", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC); !199, Sept-Oct.1995.]
- [26] ASSOCIATION BETON QUEBEC (janvier 2005)"Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton " Dépôt légal Bibliothèque nationale du Québec ISBN 2-923379-00-4
- [27] Kalifa, P. et Menneteau F. D., « Mesures de pression, température et perte en masse dans les bétons à hautes températures », Rapport BHP 2000.