



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de
MASTER Académique en GENIE CIVIL

Option : Structure et matériaux

Thème

**Etude du comportement mécanique des bétons
fibrés soumis à de hautes températures**

Proposé et dirigé par :

M^{me} O. AKMOUSSI

Présenté par:

M^{lle} BOUAZIZ Lynda

Promotion 2014/2015

Remerciements

Je tiens à exprimer, en premier lieu, ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué chacun à sa manière dans la réalisation de ce mémoire de fin d'études à savoir : mes enseignants, mes collègues, mes amis et ma famille. Que M^{me} **.AKMOUSSI Ourdia** , ma promotrice trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour son encadrement, ses précieux conseils et sa disponibilité. Elle m'a en plus apporté toute son aide en mettant à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier mon co-promoteur M^{er} **BOUKAIS. Said** pour sa contribution, son soutien et ses encouragements. Il m'a consacré beaucoup de son précieux temps et mis à ma disposition ses connaissances dans le domaine.

Je tiens à remercier également **Amine NEKMOUCHE** ,et **Nacim KHELIL** et Boussad **CHITTI** pour leur aide, leur soutien et leur disponibilité le long de ce travail.

Je remercie aussi M^r. **A.KAHIL** et M^r **Dj. ATLAOUI** d'avoir répondu à toutes mes interrogations et me permettant ainsi de résoudre les problèmes rencontrés dans Excel.

Mes remerciements vont également aux responsables personnels du laboratoire Modélisation Expérimentale Matériaux et Structures, Université Mouloud MAMMERI, en Génie civil de TIZI OUZOU, en particulier à M^{me} **BENAHMED** éps **MEDJBER** et **BOUHRAOUA .R M.MAMOU** et M^{er} **AHMED ZAID. Amar** , pour leur aide précieuse dans la réalisation de la partie expérimentale et leur encouragement.

Je remercie mes chères **Hakima BETTOUCHE** et **M.SOUHILA** pour leur aide et soutien.

Je remercie enfin, les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

RESUME

Les éléments de structures en béton peuvent être soumis à des conditions accidentelles telles que les incendies. La sécurité des personnes, de la structure et des biens dépend donc entre autres de la stabilité thermique et des propriétés mécaniques résiduelles du béton. Des dégradations du béton peuvent être observées à la suite des incendies de tunnels ou de bâtiments. Les travaux de recherche dans le domaine ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton chauffé.

Le but de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de fibres de polypropylène et de fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée. D'une part, les fibres de polypropylène ont été ajoutées au béton pour améliorer sa stabilité thermique, et d'autre part les fibres métalliques ont été ajoutées au béton pour améliorer ses propriétés mécaniques. De nouvelles formulations de béton ont ensuite été définies, en utilisant une association de fibres métalliques et de polypropylène, afin d'améliorer à la fois la stabilité thermique et les propriétés mécaniques du béton. Quatre familles de bétons ont été étudiées :

- Bétons témoins sans fibres BT.
- Bétons contenant des fibres de polypropylène BFPP.
- Bétons contenant des fibres métalliques BFM.
- Bétons contenant un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques BFMPP.

Le rapport eau/ciment utilisé est de 0.483. Les éprouvettes de béton, issues de ces compositions, ont été soumises à des cycles de chauffage – refroidissement de la température ambiante à une température de consigne de 200°C et 450°C. La vitesse de chauffage a été fixée à 1 °C/mn. Les teneurs en fibres étaient 0.3% (3kg/m³) en proportion volumique pour les fibres de polypropylène et 1% pour les fibres métalliques. La perte de masse des éprouvettes lors des différents chauffages a été aussi mesurée. Cette étude expérimentale aboutit à la formulation de bétons dont à la fois la stabilité à haute température et le comportement mécanique après refroidissement sont améliorés par rapport au béton sans fibres.

Mots clés : béton, température, fibres de polypropylène, fibres métalliques, cocktail de fibres, propriétés mécaniques.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Première partie: Etude Bibliographie**CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES BETONS**

I.1 INTRODUCTION	3
I.2 LES CONSTITUANTS D'UN BETON	3
I.2.1 Le ciment	4
I.2.1.1 Définition	4
I.2.1.2 Principe de production du ciment portland	4
I.2.1.3 Constituants principaux et additions	5
I.2.1.4 Catégories de ciment	6
I.2.2 Les granulats	7
I.2.2.1 Classification des granulats	8
I.2.3 L'eau de gâchage	13
I.2.4 Les adjuvants	13
I.2.4.2 Les retardateurs de prise	14
I.2.4.3 Les accélérateurs de prise	15
I.2.4.4 Les entraîneurs d'air	16
I.2.4.5 Les hydrofuges	17
I.2.4.6 Les additions minérales	17
I.3 Propriétés essentielles des bétons	17
I.4 LES TYPES DE BETON	17
I.5 LES CRITERES DE CLASSIFICATION DES BETONS	19
I.5.1 L'ouvrabilité	18
I.5.2 Dimension maximale des granulats	19
I.5.3 La résistance mécanique du béton	19
I.5.4 Autres critères	20
I.6 FORMULATION DES BETONS	20
I.7 CONCLUSION	20

CHAPITRE II: LE BETON RENFORCE DE FIBRES

II.1 INTRODUCTION	21
II.2 HISTORIQUE SUR L'UTILISATION DES BETONS ET DE FIBRES	21
II.3 DEFINITION DU BETON FIBRES	23
II.4 LES DIFFERENTS TYPES DE FIBRES	24
II.4.1 Les fibres non métalliques	25
II.4.2 Les fibres polypropylènes	26
II.4.3 Les fibres métalliques	27
II.5 APPLICATIONS DES BETONS DE FIBRES	30
II.6 LE ROLE DES FIBRES	31
II.7 FABRICATION DES BETONS DE FIBRES	32
II.8 FORMULATION DU BETON DE FIBRES	32

II.9 CONCLUSION.....	32
-----------------------------	-----------

CHAPITRE III : COMPORTEMENT DE BETON SOUMIS A UNE TEMPERATURES ELEVEE

III.1 INTRODUCTION	33
III.2 DIFFERENTES FORMES D'ENDOMMAGEMENT THERMIQUE.....	33
III.2.1 Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton.....	34
III.2.2 Déformations thermiques du béton.....	37
III.3 EVOLUTION DES PROPRIETES MECANIQUES.....	38
III.3.1 Résistance en compression.....	39
III.3.2 Résistance en traction.....	41
III.4 INFLUENCE DES FIBRES DE POLYPROPYLENE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON SOUMIS A UNE TEMPERATURE ELEVEE	42
III.4.1 Sur l'instabilité thermique	43
III.4.2 Sur la perte de masse du béton	44
III.4.3 Résistance en compression.....	45
III.4.4 Résistance en traction par flexion	46
III.5 INFLUENCE DES FIBRES METALLIQUES SUR LE COMPORTEMENT DU BETON SOUMIS A UNE TEMPERATURE ELEVEE	46
III.5.1 Perte de masse	47
III.5.2 Résistance en compression.....	48
III.5.2 Résistance en traction par flexion	50
III.6 COMPORTEMENT DES BETONS DE COCKTAIL DE FIBRES	50
III.7 CONCLUSION	51

Deuxième partie: Travail Expérimental

CHAPITRE IV: PROGRAMME EXPERIMENTAL

IV.1 INTRODUCTION	52
IV.2 MATERIAU BETON	52
IV.2.1 Types d'éprouvettes utilisées	52
IV.2.2 Les liants	52
IV.2.3 Les sables	52
IV.2.4 Les granulats	52
IV.2.5 Les adjuvants.....	53
IV.2.6 L'eau	54
IV.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	54
IV.3.1 Principe de l'essai	55
IV.3.2 Equipements utilisés	55
IV.3.3 Description de l'essai	55
IV.3.4 Module de finesse	59
IV.3.5 Masse volumique absolue et apparente.....	60
IV.3.6 Composition de béton par la méthode de DREUX – GORISSE	60

IV.3.7 Dosage en ciment et en eau.....	61
IV.4 LES FIBRES	66
IV.4.1 Types de fibres utilisées:.....	66
IV.4.1.1 Fibres polypropylènes.	66
IV.4.1.2 Fibres métalliques	67
IV.4.2 Dosage des fibres	69
IV.5 PREPARATION DES EPROUVETTES.....	71
IV.6 REALISATION DE BETON TEMOIN	73
IV.6.1 Mesure de l'affaissement.....	74
IV.6.2 Remplissage et vibration.....	74
IV.6.3 Réalisation de béton de fibres métalliques:.....	75
IV.6.4 Réalisation de béton de fibres polypropylènes :	76
IV.6.5 Le béton de fibres association (polypropylène et métalliques).....	77
IV.7 CONSERVATION DES EPROUVETTES	77
IV.8 DISPOSITIF EXPERIMENTAL	78
IV.9 CONCLUSION.....	80
 CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
V.1 INTRODUCTION	81
V.2 FORMULATIONS	81
V.3 MESURE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.....	81
V.3.1 Essai de compression uni axiale	81
V.3.2 Essai de traction par flexion trois points	82
V.4 COMPORTEMENT DES BETONS A LA COMPRESSION	84
V.4.1 Résistance à la compression du béton témoin (BT) à différents températures.	84
V.4.2 Résistance à la compression du béton de fibre métallique (BFM) à différentes températures.	88
V.4.3 Résistance à la compression du béton de fibres polypropylène (BFPP) à différentes températures.	89
V.4.4 Résistance à la compression du béton avec association fibres métalliques-polypropylènes (BFMPP) à différentes températures.....	90
V.4.5 Comparaison entre les différents bétons à 20°C	91
V.4.6 Comparaison entre les différents bétons à 200°C	92
V.4.7 Comparaison entre les différents bétons à 450°C	93
V.4.8 Mode de rupture des éprouvettes cylindriques.....	95
 V.5 ESSAI DE CARACTÉRISATION DES FIBRES	96
V.5.1 Comparaison de résistance entre les fibres de polypropylènes et métalliques.....	97
V.6 ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION TROIS POINTS	97
V.6.1 Résistance à la flexion du béton témoin (BT) à différents températures.	100
V.6.2 Résistance à la traction du béton de fibres de polypropylène (BFPP) à différents températures.	101
V.6.3 Résistance à la traction du béton de fibres métalliques (BFM) à différents températures..	102
V.6.4 Résistance à la traction du béton de fibres avec association fibres métalliques-polypropylène (BFMPP) à différents températures.....	103

V.6.5 Comparaison entre les différents bétons à 20°C	104
V.6.6 Comparaison entre les différents bétons à 200°C	104
V.6.7 Comparaison entre les différents bétons à 450°C	105
V.6.8 Mode de ruptures des éprouvettes prismatiques.....	106
V.7 PERTE DE MASSE	106
V .8 CONCLUSION.....	108
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 110
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Liste des figures

Figure I.1: Composants d'un béton.....	3
Figure I.2: Différents types de granulats.....	9
Figure I.3: Extraction des granulats à proximité des grandes métropoles	10
Figure I.4: Découpage en blocs parallélépipédiques de la roche massive en place.....	11
Figure I.5: Granulat issu d'une roche éruptive.....	11
Figure I.6: Roche sédimentaire	11
Figure I.7: Illustration des granulats expansés : a) et b) l'argile ; et c) schiste	12
Figure I.8: Ajout d'entraîneur d'air lors du malaxage	16
Figure II.1: Modèle de composite à base de fibres.....	23
Figure II.2: Exemple de fibres polypropylène	27
Figure II.3: Différents types de fibres métalliques	28
Figure II.4: Fibres métalliques.....	28
Figure II.5: Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	29
Figure II.6: Exemples de renforcement des éléments avec des BFM.....	31
Figure II.7: Exemples d'applications du béton de fibres	31
Figure III.1; Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.....	34
Figure III.2: Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression.....	35
Figure III.3: Illustration du caractère instable des granulats de silice comparés aux granulats calcaires	36
Figure III.4: Déformations thermiques de bétons avec différents types de.....	38
granulats(1 :Siliceux, 2 : Grès, 3 : Calcaire, 4 : Basalte, 5 :Argiles expansées, 6 : Pâte de ciment), ...	39
Figure III.5: Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures	42
Figure III.6: Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage	44
Figure III.7: Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène.....	45
Figure III.8: Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$, ...	45
Figure III.9: Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.....	46
Figure III.11: Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température.....	47
Figure III.12: Test de compression de bétons de fibres de polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300°	49
Figure III.13: Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en traction des bétons de cocktail de fibres.....	51

Figure IV.1: Granulats utilisés.....	53
Figure IV.2: Séchage des granulats	53
Figure IV.3: Plastifiant Sikaplast BV 40 ⁺	54
Figure IV.4: Tamiseuse.....	54
Figure IV.5: Courbe Granulométrique.....	58
Figure IV.6: Mesure de la masse volumique absolue et apparente.....	60
Figure IV.7: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).....	63
Figure IV.8: Découpage en fibres de la grille.....	66
Figure IV.9: Dimensions d'une fibre PP.....	67
Figure IV.10: Découpage en fibres de la grille métallique.....	68
Figure IV.11: Dimension d'une fibre métallique.....	68
Figure IV.13: Eprouvettes cylindriques.....	71
Figure IV.12: Eprouvettes prismatiques	71
Figure IV.14: Malaxeur	72
Figure IV.15: table vibrante.....	72
Figure IV.16: Spécimens après coulage.....	72
Figure IV.17: Eprouvettes conservées dans l'eau.....	73
Figure IV.18: Malaxage de béton témoin.....	73
Figure IV.19: Mesure d'affaissement.....	74
Figure IV.20: vibration des éprouvettes.....	74
Figure IV.21: Malaxage du béton de fibres métalliques.....	75
Figure IV.22: Malaxage du béton de fibres polypropylènes.....	76
Figure IV.23: Malaxage du béton de fibres association (polypropylène et métalliques).	77
Figure IV.24: Démoulage de l'éprouvette prismatique.	78
Figure IV.25: Démoulage de l'éprouvette cylindrique	78
Figure IV.26: Paliers de température suivant le comportement de la matrice cimentaire et des différentes fibres.....	78
Figure IV.27: Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes.	79
Figure IV.28: Four électrique	79
Figure IV.29: Dispositif de chauffage et disposition des éprouvettes dans le four.	80
 Figure V.1 presse hydraulique AUTO TEST.....	 82
Figure V.2: Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.....	83
Figure V.3: Les éprouvettes cylindriques après cycles chauffages-refroidissements.....	84
Figure V.4: Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 20°C.....	86
Figure V.5: Courbes contraintes-déformations du béton témoin (BT) à différentes températures.....	87
Figure V.6: Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres métalliques (BFM) à différentes températures.	88
Figure V.7: Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres de polypropylène (BFPP) à différentes températures.	89
Figure V.8: Courbes contraintes-déformations des bétons avec association fibres métalliques-polypropylènes (BFMPP) à différents températures.....	95
Figure V.9: Superposition des courbes contraintes-déformation des différents bétons à 20°C....	91

Figure V.10: Résistances des différents bétons à 20°C.....	92
Figure V.12: Résistance en compression des différents bétons à 200°C.	92
Figure V.13: Superposition des courbes contraintes-déformations des différents bétons à 450°C.	93
Figure V.14: Résistance en compression des différents bétons à 450°C.	93
Figure V.15: Variation des résistances en compression des différents bétons à différentes températures	94
Figure V.16: Rupture des éprouvettes cylindriques sous sollicitation de compression.....	94
Figure V.17: Essai de traction direct sur les fibres.	95
Figure V.18: Évaluation de la résistance à la traction directe des différentes fibres	96
Figure V.19: Résultats de l'essai de traction par flexion trois points.	97
Figure V.20: Évaluation des déplacements pour les différents bétons à différentes températures.	98
Figure V.21: Résistance en flexion des bétons à différentes températures.....	99
Figure V.22: Courbes Force-déplacement du béton témoin (BT) à différentes températures.....	100
Figure V.23: Courbes Force-déplacement du béton de fibre de polypropylène (BFPP) à différentes températures.	101
Figure V.24: Courbes Force-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM) à différentes températures.	102
Figure V.25: Courbes Force-déplacement de BFMP à différentes température.....	103
Figure V.26: Courbes force-déplacement des différents bétons à 20°C.	104
Figure V.27: Courbes force-déplacement des différents bétons à 200°C.	104
Figure V.28: Courbes force-déplacement des différents bétons à 450°C.	105
Figure V.29: Éprouvette prismatique après écrasement.	106
Figure V.30: Rupture des éprouvettes prismatiques sous sollicitation de traction par flexion....	106
Figure V.31: Pertes de masse des bétons soumis aux cycles chauffage-refroidissement(%).	107
Figure V.32 : L'état des éprouvettes après l'essai de compression.....	108

Liste des tableaux

Tableau I.1: Ajouts cimentaires	6
Tableau I.2: Résistance à la compression	7
Tableau I.3: Types de béton distingué selon la composition.....	18
Tableau I.5: Classification des bétons selon les gros grains du squelette du béton.....	19
Tableau I.4: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams ...	19
Tableau III.1: Hypothèses sur l'évolution de la résistance en compression	
en fonction de la température.	41
Tableau III.2: Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques.....	49
Tableau III.2: Résistances en en traction par flexion des béton avec et sans fibres Métalliques.....	50
Tableau III.4: Résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en traction des bétons de cocktail de fibres	51
Tableau IV.1: Analyse granulométrique pour le sable avec 1500g.....	56
Tableau IV.2: Analyse granulométrique pour le gravier 3/8 avec 2000g.....	56
Tableau IV.3: Analyse granulométrique pour le gravier 8/16 avec 2500 g.....	57
Tableau IV.4: Analyse granulométrique pour le sable avec M = 1500g.....	59
Tableau IV.5: Masses volumiques absolue et apparente des granulats.	60
Tableau IV.6: Valeurs approximatives du coefficient granulaire.....	62
Tableau IV.7: Les pourcentages des constituants.....	64
Tableau IV.8: Composition finale pour 1m ³ de béton.	66
Tableau IV.9: Caractéristiques des fibres PP.	67
Tableau IV.10: Caractéristiques des fibres M.	68
Tableau IV.11: les constituants de béton témoin.....	69
Tableau IV.12: Les constituants de BFPP (0.3%).	70
Tableau IV.13: Les constituants de BFM (1%).	70
Tableau IV.14: Les constituants de béton association (0.5% BFM+0.15% FPP).	71
Tableau V.1: Béton témoin sans fibres.	85
Tableau V.2: Les résultats obtenus de l'essai de traction directe sur les fibres polypropylène et métalliques.	96
Tableau V.3: Résistances en traction par flexion des différents bétons.	98
Tableau V.4: Perte de masse moyenne des bétons soumis aux cycles chauffage- refroidissement (%).	108

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de génie civil est le béton. Sa mise en œuvre nécessite peu de moyens. Composé de liants, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvant, le béton présente des performances mécaniques qui ont connu d'importantes avancées dans les années 1980 avec l'utilisation de particules fines. Ainsi, du béton ordinaire l'on arrive au béton à hautes performances voire au béton fibré à ultra hautes performances. En cas d'incendies de bâtiments et tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température.

Les recherches sur l'étude du comportement du béton à haute température ont permis d'apporter des éléments de réponse aux phénomènes observés. L'instabilité thermique a pour origine la formation de pression et de contraintes qui se développent dans le matériau chauffé. Les paramètres comme l'eau dans le béton, la porosité, la perméabilité, la nature des granulats ont une influence sur l'instabilité thermique. Une méthode efficace pour réduire le risque d'instabilité thermique est l'ajout des fibres de polypropylène dans la composition du béton. Il est par ailleurs important que le matériau confère aux ouvrages de bonnes possibilités de restauration après incendie.

Pour cela, les performances mécaniques doivent être maintenues à un niveau aussi proche que possible des performances initiales. L'incorporation de fibres métalliques dans le béton soumis à une température élevée peut être une solution pour améliorer les performances mécaniques. Les avis des auteurs divergent sur l'analyse des propriétés mécaniques de bétons de fibres de polypropylène chauffés. Certains ont constaté une amélioration de ces dernières tandis que pour d'autres, une influence négative est remarquée. Il faudrait toutefois noter que les conditions expérimentales variaient suivant les auteurs.

Quant à l'utilisation des fibres métalliques, si les résultats de la littérature ont montré globalement une influence positive sur les performances mécaniques des bétons chauffés, il n'y a cependant pas de consensus sur l'apport quantitatif des fibres en fonction de leur fraction volumique, de la température et de la microstructure du béton. Les fibres de polypropylène sont utilisées pour améliorer la stabilité thermique du béton. Les fibres métalliques peuvent être utilisées pour améliorer les performances mécaniques du béton chauffé. Il semble donc important de s'intéresser à l'utilisation couplée des deux natures de fibres.

Le travail de master recherche présenté dans ce manuscrit a pour objectif de quantifier et d'améliorer la compréhension de la « contribution des fibres de polypropylène et

métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée ». L'objectif de ces travaux est aussi de comprendre l'interaction entre les différentes natures de fibres lorsque le béton est soumis à une température élevée. L'influence des fractions volumiques de fibres et de leurs différentes combinaisons dans le mélange est discutée afin d'établir des éléments de recommandations nécessaires aux prescripteurs.

Le manuscrit est composé de deux principales parties, toutes axés sur des essais en laboratoire.

La première partie est une analyse bibliographique, elle regroupe les généralités sur les bétons, les bétons renforcés de fibres et des travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température (l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et d'un mélange des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé).

La seconde partie décrit le programme expérimental défini dans le cadre de ce travail. Cette étude expérimentale est entièrement réalisée au Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil de l'**Université MOULOUD MAMMERI**. Les compositions de bétons, les matériaux et matériels, le mode de cure et les essais de caractérisation sont présentés. Cette partie regroupe aussi les résultats des différents essais sur le comportement des bétons sans fibres et bétons fibrés. Pour la différence de température, la perte de masse, la résistance en compression et la résistance en traction en fonction de la température de chauffage sont étudiés. Les bétons sans fibres sont des bétons témoins, bétons de référence par rapport aux bétons fibrés. Les résultats de propriétés physiques et mécaniques comme dans le cas des bétons sans fibres, sont présentés. Le pourcentage volumique des fibres de polypropylène est de 0.3% (3Kg/m³). Une étude préliminaire est faite pour montrer l'efficacité des fibres de polypropylène sur l'amélioration de la stabilité thermique ainsi que le rôle de l'eau dans le comportement à haute température.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 INTRODUCTION

Le béton occupe, depuis son invention, la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente également d'autres qualités, telles une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc.... Toutefois, le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences et à de nouveaux besoins. Ce béton est fabriqué puis mis en place en phase fluide, il durcit et se consolide ensuite, ce qui permet des réalisations techniques extrêmement variées.

Certes, on peut construire avec d'autres matériaux tels que les charpentes bois, charpente métallique, maçonneries (pierres, briques) éventuellement avec du verre ..., Leur utilisation est limitée pour cause de coût très élevé par rapport à celui du béton et parfois pour leurs propriétés technologiques inadaptées. De par sa nature et son mode opératoire de fabrication, le béton se différencie des autres matériaux.. C'est le matériau polyvalent par excellence. Selon la formule utilisée pour le fabriquer, ses propriétés différeront et le rendront unique par rapport aux autres.

La performance des bétons ordinaires dépend de la nature des matériaux constituant son mélange.

I.2 LES CONSTITUANTS D'UN BETON

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment, d'eau et d'éventuel adjuvant .Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydratée et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomerat solide (roche sédimentaire détritique dont les éléments, de taille $>2\text{mm}$ se consolident par un ciment). Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

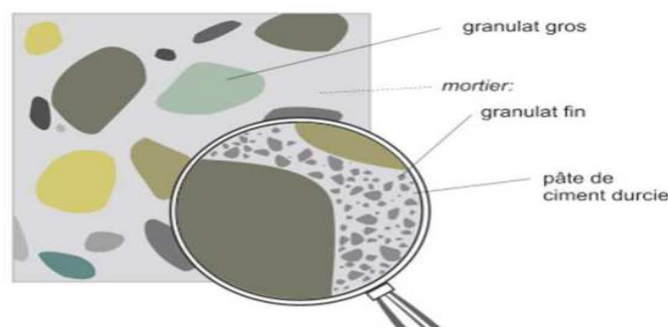


Figure I.1: Composants d'un béton [1]

I.2.1 Le ciment**I.2.1.1 Définition**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence de l'eau. Plus la poudre est plus fine, plus la réaction d'hydratation s'opère rapidement. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. C'est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminate de calcium porté de 1450 à 1550°C, température de fusion.

I.2.1.2 Principe de production du ciment portland

La fabrication du ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes

- Préparation du cru ;
- Cuisson ;
- Broyage et conditionnement.

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne) ;
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide) ;
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée) ;
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche.

La composée de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminate de calcium résultant de la combinaison de la chaux CaO avec la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et l'oxyde de fer Fe_2O_3 . La roche nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne qui contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autre oxyde en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication de ciment est le suivant : calcaire et argiles sont extraits des carrières puis concassées, homogénéisées, portées à haute température « 1450°C » dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide « la trempe » est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100°C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique « CO_2 » et en chaux CaO , du calcaire qui est le carbonate de calcium « CaCO_3 ».

Le mélange est porté à 1450-1550°C (température de fusion). Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention de différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenue par Al_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide. SiO_2 et CaO restant, réagissent pour donner le silicate bi calcique dont une partie se transforme en silicate tri calcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

I.21.3 Constituants principaux et additions

a. Constituants du clinker [10]

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

1-Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(C_3S)	(50 à 70% du clinker).
2-Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(C_2S)	(10 à 30% du clinker).
3-L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	(C_3A)	(2 à 15 % du clinker).
4-L'alumino-ferrite tétra calcique $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	(C_4AF)	(5 à 15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide de microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants :

A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grand (grains anguleux foncé).

B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire) se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

b. Les autres constituants du ciment

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse destinée à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques spécifiques. Les constituants les plus utilisés sont

Tableau I.1: Ajouts cimentaires[2].

Constituants	Observations
Calcaires	-Considérés comme les constituants principaux du ciment, devant présenter en proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.
Laitier granulé de haut fourneau	-Sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques, obtenus par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.
Cendres volantes (V ou W)	-Produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés Pouzzolanique et les cendres volantes calcaires (W).
Schistes calcinés	-Schistes portée à une température 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et Pouzzolanique.
Fumé de silice	-Sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. -Formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0,1\mu\text{m}$). Elles ont des propriétés Pouzzolanique.
Fillers	-Constituants secondaires des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. -Matière minérale, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau)

I.2.1.4 Catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

a. En fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 4 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I: Ciment Portland (CPA).
- CEM II: Ciment Portland composé (CPJ).

- CEM III: Ciment de haut fourneau(CHF).
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique(CPZ).

b. En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes « R » sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Tableau I.2: Résistance à la compression[2].

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression en bars		
		A 2jours minimau x	A 28jours	
			minimale	Maximale
350			250	450
450			350	550
	R (rapide)	150	350	550
550			450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR très haute performance		300	550	

I.2.2 Les granulats

Le granulat est un élément essentiel dans le béton, il est constitué d'un ensemble de grains minéraux, sa dimension est comprise entre 0 et 125mm. Leurs natures et leurs formes varient en fonction des gisements et des techniques de leur production.

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité et doivent permettre aussi, d'une part, de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures.

Ils sont destinés à être mis en œuvre soit directement, sans liant pour les solidariser (ballast des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais...) soit on les solidarise avec un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés...).Les granulats

constituent le squelette du béton, la régularité de leurs caractéristiques conditionne donc celle du béton.

I.2.2.1 Classification des granulats

Les granulats peuvent être classifiés selon plusieurs critères.

A. Selon leur granularité

On peut classer les granulats en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à maille carrées dans une série normalisée. On distingue plusieurs familles de granulats

- Fillers 0/D où $D \leq 2\text{mm}$ et contenant au moins 70% de passant à 0,063.
- Sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ et contenant moins de 10% de passant à 0,063mm.
- Sable 0/D où $D \leq 6,3\text{mm}$ sauf les sables pour béton où $D \leq 4\text{mm}$.
- Graves 0/D où $D \geq 6,3\text{mm}$.
- Gravillon d/D où $d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 31,5\text{mm}$.
- Cailloux d/D où $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$.

Remarque

La famille dite ballast d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$ est complètement contenu dans la famille dite cailloux d/D où $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$. C'est pour cela qu'elle n'est pas citée dans la classification précédente.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont

- les fillers ;
- les sables ;
- les gravillons ;
- les graves.



Figure I.2: Différents types de granulats[2].

Les granulats doivent être des matériaux de qualité, satisfaisant notamment deux exigences

- la propreté, particulièrement importante pour les sables ; la teneur en fines argileuses est strictement limitée ;
- la granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.

Les granulats (gravillons et sable) ont des effets sur la résistance mécanique et sur la consistance du béton de plusieurs manières

- Par leur qualité mécanique ;
- Par la capacité d'adhérence de ces granulats avec la pâte liante ;
- Par la forme de ces granulats (roulés ou concassés) ;
- Par le diamètre maximal des granulats ;
- Par la compacité du mélange granulaire formé.

B. Selon leur origine et leur nature

Un granulat, en fonction de son origine et sa nature peut être naturel, artificiel, ou recyclé.

a. Les granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tel que concassage, broyage, criblage et lavage). Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens.

- **Les granulats de roche meuble (matériaux alluvionnaires)**

Dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.



Figure I.3: Extraction des granulats à proximité des grandes métropoles [3].

- **Les granulats de roche massive, (de carrière)**

La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. Ils sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites ou de roche éruptives telles que les basaltes, les granites et les porphyres.

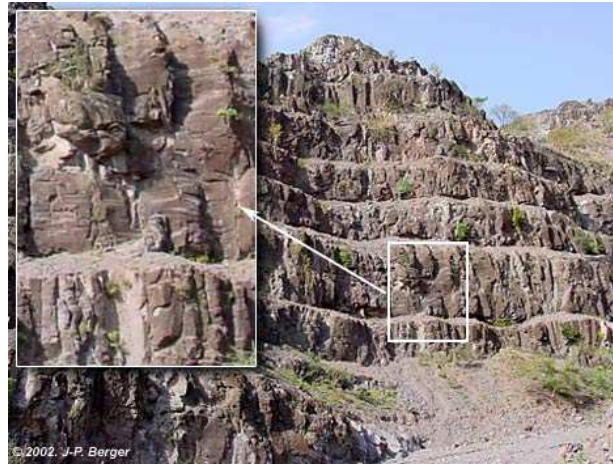


Figure I.4: Découpage en blocs parallélépipédiques de la roche massive en place [4].



Figure I.5: Granulat issu d'une roche éruptive [4].



Figure I.6: Roche sédimentaire [4].

Production des granulats

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes.

- Le décapage, qui consiste à enlever les terres situées au-dessus de la zone à exploiter.
- L'extraction, c'est l'action d'extraire des matériaux dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type de gisement
 - gisement de granulats alluvionnaires exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement) ou en site immergé (au moyen par exemple de drague) ;

– gisement compact de roches massives qui nécessite l'emploi d'explosif, l'abattage et la fragmentation des blocs.

- Le traitement, consiste en une transformation des matériaux faisant suite à leurs extraction, ils sont concassés et broyés (au moyen d'appareils travaillant par chocs ou écrasement) afin de réduire leur taille, criblés (au moyen de cribles vibrants) pour obtenir des granulats de tailles différentes, puis lavés (afin d'éliminer les éléments de pollution et les fines) ou dépoussiérés et enfin stockés. Les opérations de traitement permettent d'obtenir des granulats répondant à des spécifications précises quant à leurs caractéristiques géométriques et physiques pour des usages particuliers.
- La remise en état du site a lieu après exploitation.

b. Les granulats artificiels

Les granulats artificiels sont généralement soit plus lourds, soit plus légers que les granulats ordinaires. Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. Ils sont d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou chimiques.

Les transformations sont faites à haute température (1000 à 1200 °C), dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste, qui produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques internes, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. Par conséquent, on obtient un granulats plus gros, avec une grande porosité, donc des granulats légers.

Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure I.7 a) et I.7 b), le schiste expansé (Figure I.7 c).

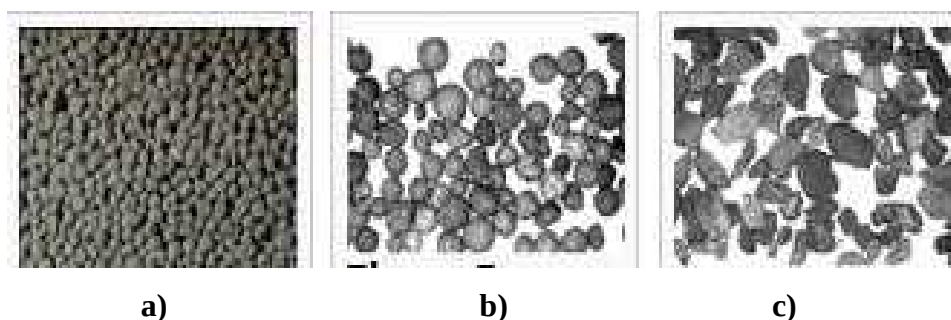


Figure I.7: Illustration des granulats expansés : a) et b) l'argile ; et c) schiste.[4]

c. Les granulats recyclés

Ce sont essentiellement des granulats obtenus par recyclage de béton de démolition. Ils peuvent être de diverses natures selon la nature du déchet à recycler. Ce déchet subit différents traitements (concassage, tri, calibrage, nettoyage...) pour le rendre apte à l'utilisation. Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

L'utilisation des granulats recyclés permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions, due soit aux catastrophes naturelles soit à la démolition des vieux bâtis, donc participer à réduire les décharges dans la nature, comme elle protège la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels.

I.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire un béton, c'est un constituant indispensable pour la fabrication de ce dernier. Sa qualité influe les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci.

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer l'eau de mer, qui contient environ 30g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de béton armé ou précontraint.

L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton. Sa quantité varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m³.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances: résistance mécanique à la compression et durabilité.

I.2.4 Les adjuvants

Contrairement au ciment, aux granulats, et à l'eau, les adjuvants ne sont pas essentiels au béton. Ce sont des produits chimiques incorporés aux bétons frais en faible quantités(en générale moins de 3% du poids du ciment) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont

I.2.4.1 Les fluidifiants (ou réducteur d'eau)

Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés soit pour fluidifier le béton en maintenant le rapport (E/C) constant, (rapport prévu pour une résistance donnée), donc fluidifier sans apport d'eau, soit réduire le rapport (E/C) pour avoir de meilleures résistances tout en ayant la même fluidité du béton.

Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va nous permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant.

La durée d'action des fluidifiants est très variable, elle dépend de la fabrication du béton, elle est courte pour les bétons fabriqués sur chantier et elle doit être longue pour les bétons fabriqués à la centrales à béton. Pour ces derniers, le béton doit rester fluide toute au long de la durée du transport, jusqu'à la mise en place.

La quantité de fluidifiant à introduire dans une formule de béton ne doit pas être trop élevée (proche du dosage à saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Le dosage à saturation des fluidifiants est déterminé expérimentalement à partir d'essais sur des mortiers (ou bétons) frais.

- **Domaine d'utilisation**

- Nécessité d'une bonne ouvrabilité du béton ;
- Béton à hautes résistances ;
- Béton très ferrailé ;
- Sable manquant de fines ;
- Béton coulé sous l'eau

I.2.4.2 Les retardateurs de prise

Ceux sont des adjuvants qui prolongent la durée de vie du béton frais. Les réactions d'hydratation sont exothermiques ; elles sont accélérées par l'apport de chaleur. Ainsi le bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massique (où la température au cœur du béton peut atteindre 80°C) accélère la cinétique d'hydratation du ciment. En effet, l'accélération des réactions d'hydratation a des effets négatifs sur les résistances à long terme du béton. Dans le cas des ouvrages massifs, il y a apparition précoce de la fissuration.

Pour remédier à ces difficultés il est donc conseillé d'utiliser des retardateurs de prise. Ainsi, dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés de ce dernier soient préservées et le béton ne fissure pas.

Grâce aux retardateurs de prise il est possible d'effectuer des reprises de bétonnage après plusieurs heures d'interruption avec certaines précautions (protection contre la dessiccation). Ils permettent aussi de transmettre tous les bétons sur de grandes distances quelle que soient les conditions (températures, risques d'embouteillage, etc.).

- **Domaine d'utilisation**

- Bétonnage au temps chaud ;
- Transport du béton sur longue distance ;
- Coulage en continu ;
- Reprise de bétonnage ;
- Injection à grande profondeur ;
- Parois moulée dans le sol ;

I.2.4.3 Les accélérateurs de prise

Le bétonnage en temps froid ralentit les réactions d'hydratation du ciment, par conséquent, il entraîne du retard sur les durées du décoffrage. Les accélérateurs de prise sont très utilisés dans les bétons de préfabrication car ils permettent d'atteindre des résistances convenables au jeune âge, cela permet de réduire le temps d'étuvage et accélère donc le processus de fabrication. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'atteindre les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés. Mais il faut faire attention à la résistance à plus long terme, qui va en baisse par rapport à celle d'un béton sans accélérateurs de prise.

Ils sont généralement utilisés pour le bétonnage à temps froid pour accélérer la prise et le durcissement du béton à dosage normal. Il permet de gagner du temps pour la réalisation des ouvrages. Généralement, on utilise l'adjuvant minéral de chlorure de calcium.

- **Domaine d'utilisation**

- Décoffrage rapide ;
- Bétonnage en temps froid ;
- Béton préfabriqué ;
- Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer (entre deux marées) ;
- Réparation rapide, pistes d'aérodromes, routes ;

I.2.4.4 Les entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air ont pour but d'augmenter la porosité du béton pour diminuer les effets de l'action de gel dégel sur le béton (ils évitent l'éclatement du béton) c'est-à-dire que ces adjuvants confèrent au béton durci la capacité de résister au effets de cette action successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Il améliore la résistance du béton sous l'action des incendies.

Un des modes d'action de ces microbulles peut être décrit comme suit : dans le cas du gel, l'eau contenue à l'intérieur du béton gèle et augmente de volume puis crée des surpressions à l'intérieur des pores du béton et par la suite une fissuration ; la présence des microbulles permet de freiner le développement des fissures et la dégradation du béton est arrêtée.

C'est le même mode d'action qui se développe lors des incendies, dans ce cas l'eau contenue dans les pores fermés se transforme en gaz, ce gaz avec l'augmentation de la température provoque des surpressions sur les parois des pores et donc de la fissuration.

Pour les bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel, la teneur en air occlus doit être entre 3 et 6 %. Lors de l'utilisation d'entraîneurs d'air, la quantité d'espaces d'expansion n'est pas le seul critère important. La distance entre un point quelconque et une bulle d'air ne dépassera pas une certaine valeur, en général 200µm.



Figure I.8: Ajout d'entraîneur d'air lors du malaxage [5].

- **Domaine d'utilisation**

- Les routes, les barrages, ponts ;
- Travaux maritimes ;
- Ouvrages exposés au gel, à l'action des eaux agressives ;
- Bétons extrudés (ex : glissière de sécurité en béton, bordures) ;

I.2.4.5 Les hydrofuges

Ils sont utilisés pour assurer l'imperméabilité du béton et l'infiltration de l'eau. Ils sont souvent utilisés dans les cas des barrages et des châteaux, de même, ils participent à la lutte contre la corrosion des armatures à travers du béton d'enrobage

I.2.4.6 Les additions minérales

Il existe deux catégories de fines minérales : les fines actives à caractère Pouzzolanique et les fines inertes comme les fillers calcaire. Ce sont des particules de faible dimension qui améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés Pouzzolanique (cendres volantes, fumée de silice, laitier...).

I.3 Propriétés essentielles des bétons

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler ; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

I.4 LES TYPES DE BETON

On distingue plusieurs types de béton classés selon la composition, les différents types sont résumés dans le tableau ci-dessous

Tableau I.3 : types de béton distingué selon la composition [2].

Type de béton	Composition	Rapport (eau/ciment) ou Granulat/sable)	Caractéristiques
Ordinaire (BO)	Eau+ciment+granulats	$E/C \approx 0,5 \text{ à } 0,6$	$20 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ Mpa}$
Hautes performances(BHP)	Eau+ciment+granulats+ adjuvant réducteur d'eau	$0.35 \leq E/C \leq 0.40$	$50 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 80 \text{ Mpa}$
Très hautes performances BTHP	Eau+ciment + granulats +super plastifiant+ fumée de silice.	$0.20 \leq E/C \leq 0.35$	$80 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 150 \text{ Mpa}$
Auto-plaçant(BAP)	Eau + ciment + granulats + fines (cendre volante, laitier de haut fourneau, fine calcaire) + super plastifiant + (agent de viscosité)	$G/S \approx 1$	Béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre dans le coffrage par le seul effet de la gravité et sans aucun procédé de serrage.* f_{c28}

I.5 LES CRITERES DE CLASSIFICATION DES BETONS

I.5.1 L'ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages (sans ségrégation) et à enrober convenablement les armatures. Elle doit donc être telle que, le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité.

L'ouvrabilité est principalement influencée par :

- Le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité, la granulométrie.
- Le dosage en eau.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau ci-après

Tableau I.4: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams [6].

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	$\pm 1 \text{ cm}$
Plastique P	5 à 9	$\pm 2 \text{ cm}$
Très plastique TP	10 à 15	$\pm 3 \text{ cm}$
Fluide FL	≥ 16	$\pm 3 \text{ cm}$

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition du béton.

I.5.2 Dimension maximale des granulats

Cette dimension D correspond à la dimension des plus gros granulats entrant dans la composition du béton désigné. D est fixé par référence à la norme NFP18-560. Le tableau I.5 représente la classification correspondant à ce critère. Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrage, digues, murs de quai, structure de bâtiment, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions de ferrailage.

I.5.3 La résistance mécanique du béton

La résistance mécanique du béton est considérée comme la propriété la plus importante et la plus essentielle à rechercher pour un béton. Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. Elle est mesurée par écrasement des éprouvettes cylindriques 16x32 cm selon la normalisation en vigueur[2].

Tableau I.5: Classification des bétons selon les gros grains du squelette du béton[6].

D (mm)	Classification des bétons
D = 8	Béton très fin
$10 \leq D \leq 16$	Béton fin
$20 \leq D \leq 25$	Béton moyen
$31,5 \leq D \leq 50$	Béton gros
$63 \leq D$	Béton très gros

I.5.4 Autres critères

Il peut être nécessaire dans certains cas de préciser dans la désignation du béton d'autres critères que les trois fondamentaux précédemment définis, parmi eux on peut citer :

- L'influence de la qualité de ciment, selon l'agressivité du milieu
- Le dosage minimal en ciment.
- Utilisation spéciale du béton (climat froid, climat chaud)
- Utilisation obligatoire ou exclue d'adjuvant ou d'ajout.

- Béton à pomper ou pas, à extruder ou pas, à vibrer ou pas,...

I.6 FORMULATION DES BETONS

La formulation d'un béton ordinaire (vibré) consiste à définir les proportions de ses différents constituants. La formulation des bétons ordinaires dépend des propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitée. Toutes les méthodes de formulation suivent presque la même procédure qui peut être résumée comme suit

- Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats, le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par recueil des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
- Choix de la nature du ciment et du rapport (Eau/Ciment) ;
- Choix de la quantité de ciment et du volume des granulats ;
- Choix des adjuvants ;
- Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.
- La nature des granulats est souvent imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation de béton, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de Valette, de Joisel... Dans la partie qui suit on rappelle les grandes lignes des méthodes de formulation les plus utilisées en Algérie[2].

I.7 CONCLUSION

Dans cette partie nous sommes revenus sur les généralités des bétons et ses constituants. Nous avons discuté les différents types de granulats ainsi que, l'influence de leurs performances mécaniques sur la résistance mécanique du béton. Nous avons aussi expliqué la procédure de fabrication du ciment et l'effet d'utilisation des adjuvants dans les bétons. Par la suite, nous avons consacré aux méthodes de formulation d'un béton, nous avons donné les grandes lignes des méthodes les plus utilisées en Algérie.

II.1 INTRODUCTION

Le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage ou de projection pour se prêter à diverses conceptions, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique, sa bonne tenue au feu et sa durabilité.

Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction (des fibres qui sont naturelles ou synthétiques). Cela conduit à un matériau composite.

Si, en général, les fibres sont noyées au hasard dans le béton, il arrive que, par des mises en œuvre adaptées, on puisse donner aux fibres une orientation préférentielle correspondant à la direction des contraintes principales pour améliorer la résistance à la traction ou à la flexion d'une pièce. Les différentes recherches effectuées jusqu'à présent, et les premières applications font espérer que le béton de fibres permettra la fabrication d'éléments plus mince et résistants mieux à la fissuration.

II.2 HISTORIQUE SUR L'UTILISATION DES BETONS ET DE FIBRES

L'idée de renforcer un matériau fragile à l'aide de fibres de différentes natures, n'est pas nouvelle dans l'histoire, l'homme a toujours essayé de rendre les matériaux de construction plus résistants et plus durables pour faire face aux conditions difficiles de la nature.

Le plus vieil écrit probablement, traitant d'un tel matériau composite, se trouve dans le passage du livre de l'Exode chapitre 5: 6-7: "Le jour même, Pharaon donna cet ordre aux surveillants du peuple et aux scribes : Ne continuez plus à donner de la paille hachée au peuple pour mouler les briques comme hier et avant-hier; qu'ils aillent eux-mêmes ramasser la paille qu'il leur faut".

A cette même période approximativement 1500 ans avant J.-C., la colline de "AqarQuf", haute de 57 m près de l'actuelle Bagdad fut construite à l'aide de briques cuites au soleil et renforcées de paille. Ainsi l'utilisation de fibres d'amiante "Asbestos fibre" ou de nature différente telle que, paille, roseaux, poils des chevaux pour le renforcement de matériau peut remonter à plus de 4000 ans [7].

C'est ainsi que la paille était utilisée autre fois pour renforcer les briques de terre, les poils de chevaux pour renforcer le mortier de chaux et la filasse pour renforcer le plâtre.

Plus récemment, les fibres d'amiante mélangées aux pâtes de ciment ont connu des utilisations dans le domaine de la construction, particulièrement après la 2ème guerre

mondiale où les besoins en construction étaient énormes. Cette amiante-ciment a été mise en application pour la première fois vers 1910 par l'autrichien Hatscheck.

Bien que des fibres aient été employées en matériaux de construction depuis longtemps, la première utilisation des fibres d'acier dans le béton s'est produite en 1910, lorsque Harry Franklin Porter (USA) montra que l'ajout de clous d'acier dans le béton, améliore considérablement sa résistance à la traction [8]. En 1914, William Ficklin (USA) introduit des copeaux métalliques dans un béton pour améliorer sa résistance à l'usure et à la fissuration et obtint le premier brevet [9]. Vers 1960, le béton renforcé de fibre d'acier a commencé à se développer à un rythme accéléré. Les quatre dernières décennies marquent un développement expansif et moderne. Le vrai point de départ des recherches sur les bétons fibrés date de 1963 avec les travaux de Romualdi (USA), sur l'arrêt de la propagation des fissures dans une matrice par des fibres réparties [10]. Quelques années plus tard, en 1969, des premiers essais sur un béton de fibres de verre sont réalisés chez Pilkington en Grande Bretagne. L'année suivante, des essais sur un béton de fibres d'acier ont aussi démarré chez Bekaert [11].

Depuis longtemps, des fibres végétales sont utilisées par l'homme : fibres de tiges (la ramie, le jute, le kenaf, le genêt, le chanvre); des fibres de feuilles (le raphia, le palmier, le sisal, l'abaca, l'alfa, le jonc), des fibres de fruits (le coco et le kapok, Phormium (lin de Nouvelle Zélande)). Par exemple, les Chinois utilisent la ramie comme fibre textile. En Europe, la ramie sert à fabriquer des étamines utilisées dans l'industrie fromagère.

L'Algérie est parmi les pays qui disposent d'extraordinaires ressources en fibres végétales (Palmier, Alfa, Sisal, Abaca, Chanvre, Coton...); malheureusement, leur exploitation dans des domaines pratiques, entre autre les matériaux de construction est encore rare, malgré leur disponibilité en abondance, particulièrement le palmier. De nombreux travaux et applications ont eu lieu sur le béton de fibres depuis son développement. Cependant, l'objectif principal de ces dernières décennies a été de concevoir un matériau renforcé de façon homogène et ayant un comportement isotrope. C'est ainsi que l'insertion de fibres discontinues dans la matrice cimentaire a débouché sur de nombreuses recherches [12].

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

Avec la disponibilité progressive de fibres de diverses natures, le rêve qui a commencé il y a plus d'un siècle, pour mélanger des fibres dans le béton au même titre que le sable et le gravier est réalisable et aboutit à un béton structural.

Enfin, à chaque fois que l'utilisation d'un béton de haute résistance est d'actualité, il faudra analyser de manière très approfondie, la solution fibres métalliques. En effet, les fibres métalliques et le béton de haute résistance constituent un couple idéal, dans lequel il existe une très forte synergie [13].

II.3 DEFINITION DU BETON FIBRES

Un béton fibré est un béton dans le quel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les bétons fibrés font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurales (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées [20].

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.

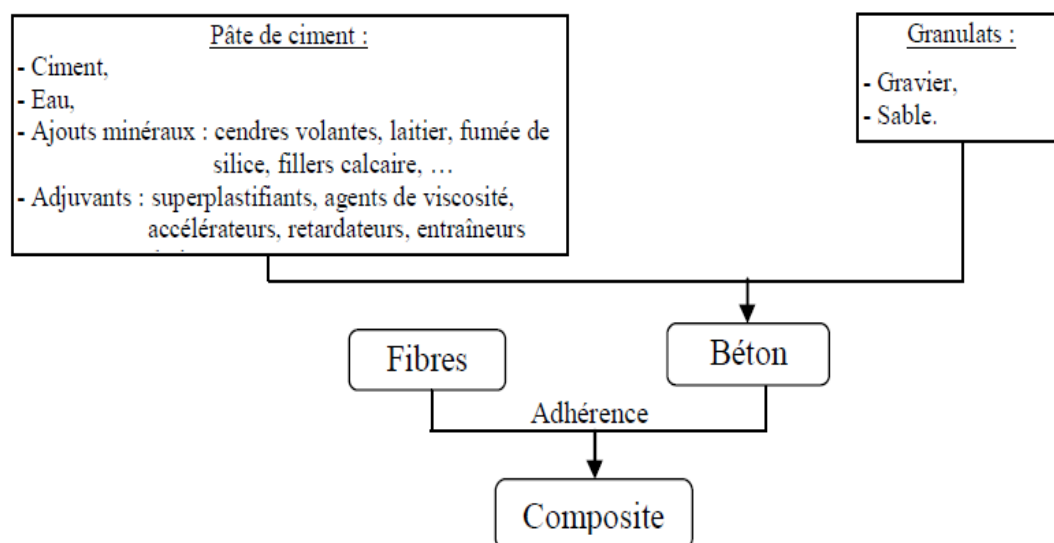


Figure II.1: Modèle de composite à base de fibres [15].

II.4 LES DIFFERENTS TYPES DE FIBRES

Pour améliorer les caractéristiques des fibres, les fabricants ont développé plusieurs types de fibres afin d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortiers ou de béton, réparation et renforcement de structure...), de leurs propriétés mécaniques (résistance à la traction, module d'élasticité, adhérence...) et de leur disponibilité et de leur prix.

Avant les années 1970, seules les fibres métalliques droites ont été commercialisées. Elles sont employées rarement dans des applications courantes [16]. La nature des fibres peut avoir une incidence sur les propriétés du béton, de sorte que leur choix dépend des applications auxquelles elles sont destinées. Actuellement, plusieurs natures de fibres sont utilisées. Les qualités indispensables qu'elles doivent présenter sont les suivantes:

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment;
- Avoir une bonne résistance à la traction;
- Ne pas risquer d'être attaquées par le milieu basique du ciment;
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres;
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre;
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût du béton.

Les principaux types de fibres sont :

- les fibres de verre, dont la composition chimique est étudiée pour ne pas être attaquées par les alcalins du ciment, leur mise en place est assez facile à des dosages élevés. Elles sont utilisées pour les structures non porteuses. Elles ont un faible module d'élasticité.
- les fibres en fonte ductile. Elles ont une bonne adhérence.
- les fibres synthétiques, qui présentent une bonne tenue dans le temps et sont utilisées pour les dallages industriels. Les fibres de carbone ont des propriétés mécaniques sont excellentes mais présentant une mise en place difficile. Leur emploi est rarissime en raison de leur coût excessif,
- Les fibres d'aramide (kevlar), issue de la chimie organique, ont une bonne résistance à la traction, au choc et à la fatigue. Elles ont un prix élevé,

- les fibres naturelles (bambou, noix de coco, sisal, steppe, alfa, palmier, abaca, ...) offrent une résistance à la traction moyenne. Elles sont utilisées dans la fabrication des tuiles et dans le textile,
- les fibres métalliques qui sont les plus utilisées, du fait qu'elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques et offrent des performances importantes pour les bétons.

Les fibres se divisent en deux catégories

- Les fibres non métalliques,
- Les fibres métalliques.

II.4.1 Les fibres non métalliques

Selon le type de fibres, elles présentent des propriétés plus ou moins intéressantes et leurs applications sont limitées soit par le prix très élevé (fibres de carbone), soit par les problèmes de durabilité (les fibres de verre), soit à leurs mauvaises performances comme renfort (fibres de polypropylène). Certaines fibres naturelles présentent une instabilité dimensionnelle due aux cycles "séchage-mouillage". Parmi ces fibres, on peut citer les fibres de carbone, les fibres de verre, les fibres synthétiques et les fibres naturelles organiques ou minérales (coco, bois, amiante, bambou, Asbestos, abaca, chanvre, palmier, alfa, coton...). Les fibres végétales naturelles ne sont pas destinées pour les bétons à hautes performances. Elles sont plutôt appliquées aux bétons ordinaires. Des fibres d'amiante ont été remplacées par les polymères pour leur effet nuisible sur la santé humaine.

II.4.2 Les fibres polypropylènes

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post-fissuration (contrairement aux fibres métalliques). Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté). Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170 °C).

La fabrication du béton avec des fibres de polypropylène ne soulève pas de difficulté particulière. La répartition des fibres est facile et ne nécessite pas de précautions spécifiques

lors du malaxage. L'optimisation de l'adjuvantation permet de réaliser des bétons dont l'ouvrabilité est conservée. Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs. De ces propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène:

- dallages et aménagements urbains ;
- produits préfabriqués (parements) ;
- mortiers projetés ;
- enduits ;
- sculptures.

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

❖ **Influence des fibres polypropylène sur la tenue au feu des bétons**

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

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

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



Figure II.2: Exemple de fibres polypropylène[17].

II.4.3 Les fibres métalliques

La domination de ces fibres pour le renforcement des mortiers et des bétons vient du fait que l'acier a une bonne compatibilité avec le béton. De plus, le module d'élasticité de l'acier qui est environ sept fois plus élevé que celui du béton permet d'améliorer la ductilité du béton en mobilisant des efforts de traction dans ces fibres dès la fissuration.

Ces fibres trouvent beaucoup d'applications réelles et potentielles dans le domaine du génie civil. Il existe de nombreuses variétés de fibres métalliques qui se distinguent par leur géométrie, leur section (ronde, carrée), leur limite élastique, leur longueur. Elles peuvent être rectilignes, crochetées, ondulées, tronquées, embouties ou en boucle figures 1.2 et 1.3 [18].

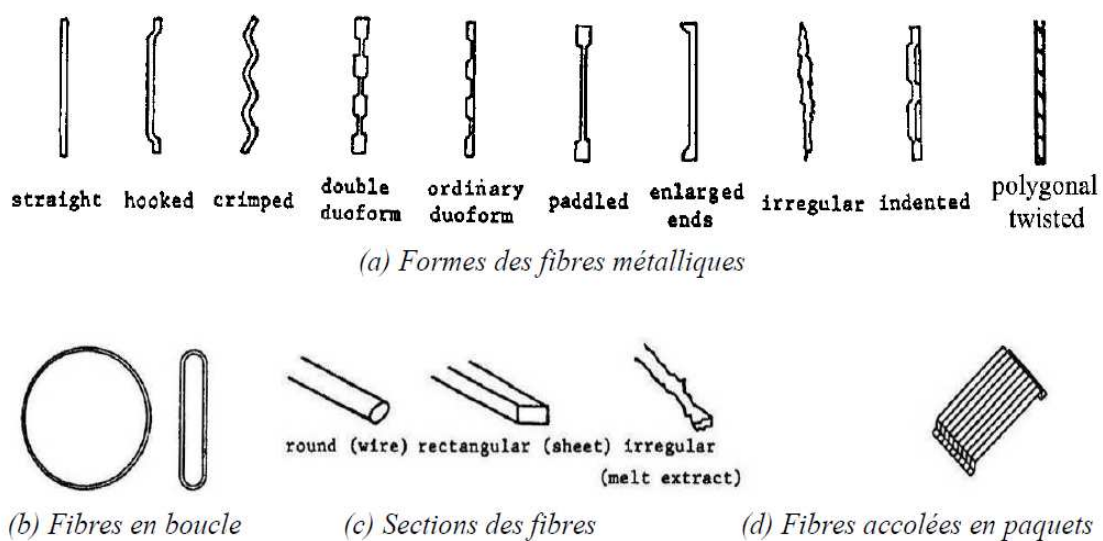


Figure II.3: Différents types de fibres métalliques[18].

❖ Influence des fibres métalliques dans les bétons structuraux

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique d'un béton de structure. En effet, elles contribuent à la réduction de la largeur des fissures dans la matrice béton (limitation de l'ouverture des fissures et répartition de la micro-fissuration). Elles se substituent partiellement aux armatures traditionnelles. Dans certains cas, pour des bétons subissant de faibles sollicitations, elles peuvent même remplacer complètement les armatures. Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture.



Figure II.4: Fibres métalliques [17].

❖ Spécificité du comportement des bétons renforcés de fibres métalliques

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

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

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

caractéristiques mécaniques post-fissuration au béton. Du fait de leurs propriétés, les fibres métalliques trouvent un vaste domaine d'applications, si l'on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour optimiser le dimensionnement des pièces.

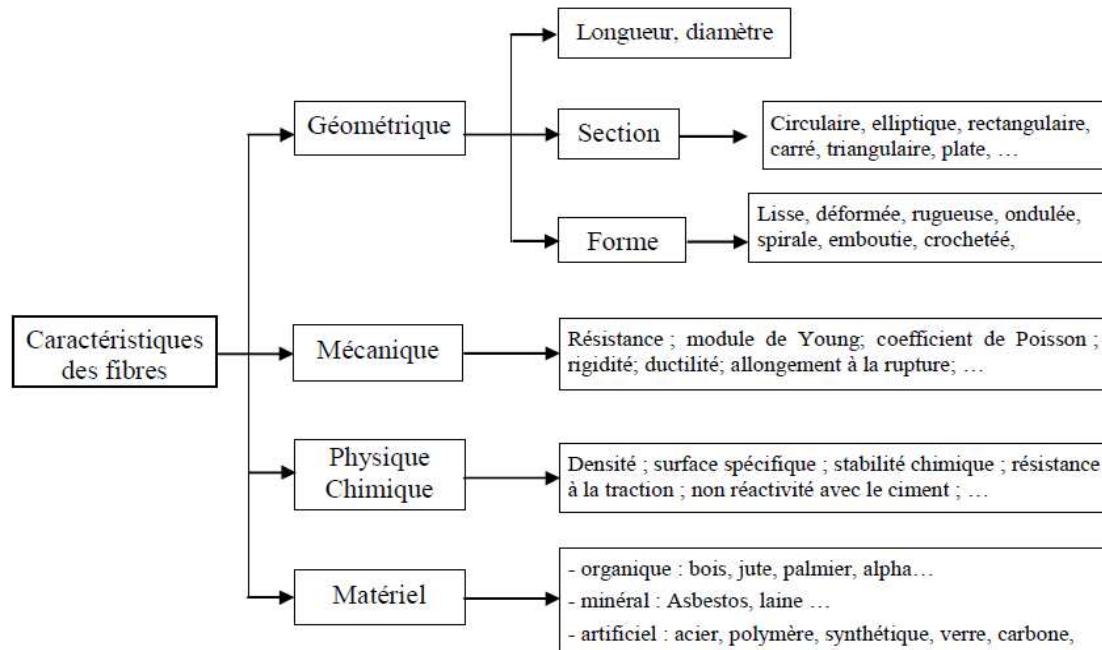


Figure II.5: Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres[18].

II.5 APPLICATIONS DES BETONS DE FIBRES

Les fibres végétales (pulpe de cellulose, sisal, bambou, chanvre, lin, jute, fibres de ramie, etc.) sont employées dans les pays où elles sont disponibles. Les éléments structuraux avec les fibres végétales sont importants pour la construction des bâtiments moins coûteux dans des régions en voie de développement. Le chanvre est très exploité en France pour la conception des éco-matériaux.

Ainsi, en 1987 la Gambie est le premier pays en Afrique qui a adopté des règlements soutenant l'utilisation des matériaux de construction naturels et peu coûteux convenus aux besoins et des capacités financières des habitants [18]. Le béton de fibres métalliques (BFM) est utilisé dans de nombreuses applications, seul ou en combinaison avec un renforcement Figure II.6 [18]. L'application du BFM sans renforcement est utilisée généralement dans des pièces minces tels que le revêtement, les panneaux, canalisations, tunnels et les dallages

industriels, les talus. Ces fibres sont aussi incorporées dans d'autres éléments structuraux tels que ceux en béton armé et précontraint et les structures en acier Figure II.7 [19].

Dans les structures en charpente métalliques, les poutres sont enrobées pour améliorer leur ductilité et résistance au feu.

Parmi les principales applications à base de béton de fibres on peut citer :

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

La réparation des chaussées est un des exemples où le béton de fibres peut être utilisé pour assurer la durabilité de la structure. La technique consiste à couvrir les chaussées par une couche en béton de fibres. Une expérience effectuée sur une autoroute au Canada montre que la couche de réparation en béton de fibres est restée en bon état de service 8 ans après la réfection, tandis qu'il a fallu refaire la réparation sur les couches en béton non fibré 8 mois après. La présence de fibres dans les couches de surfacage permet de lutter contre les forces de traction et les contraintes de cisaillement dans les zones fissurées qui causent le décollement des couches du support [20].

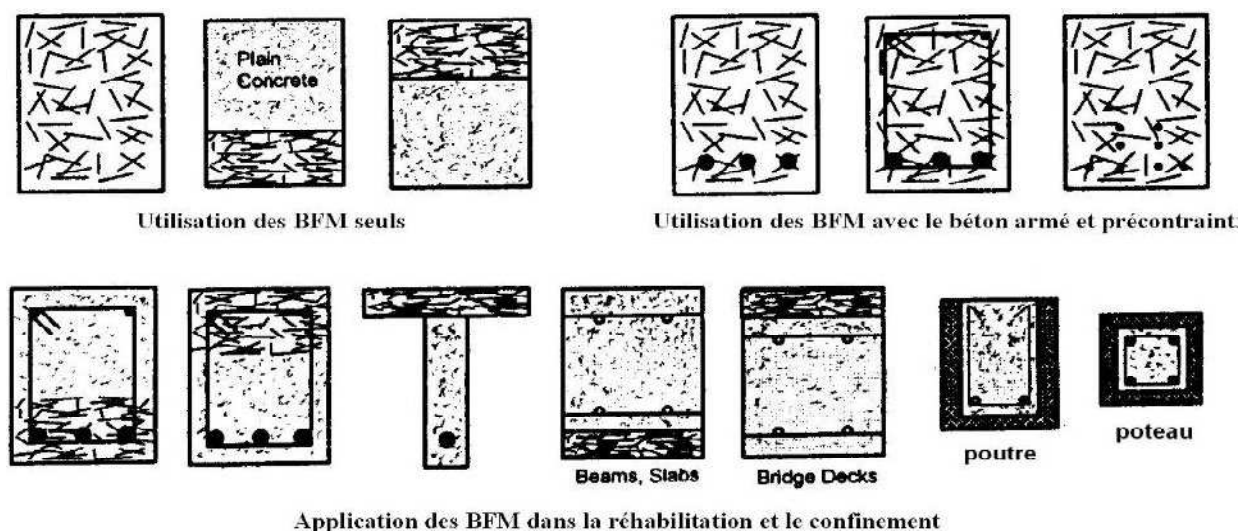


Figure II.6: Exemples de renforcement des éléments avec des BFM [18].



Musée océanographique à Valencia



minces coquilles pour station de train au Canada



Shepherd's Gully Bridge, Australie



éléments de toit en Italie



Tunnel de Barcelone

Figure II.7: Exemples d'applications du béton de fibres [19].

II.6 LE ROLE DES FIBRES

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. L'incorporation de fibres dans le béton doit faire l'objet d'une étude de formulation et d'une vérification de la compatibilité avec les autres constituants. Les bétons fibrés nécessitent souvent un dosage en super plastifiant plus élevé pour maintenir l'ouvrabilité du béton. Des essais peuvent être nécessaires pour déterminer, la nature, la taille et le dosage des fibres en fonction des caractéristiques et des performances requises.

II.7 FABRICATION DES BETONS DE FIBRES

La nécessité de la fabrication d'un BFM fait qu'un dosage abusif des fibres à incorporer rend irréalisable le gâchage ainsi que la mise en œuvre. C'est pourquoi, et au vu des paramètres fondamentaux de dosage en volume, de forme et de rapport L/D (largeur sur diamètre) qui peuvent influencer d'une part l'ouvrabilité et la mise en œuvre et d'autre part l'efficacité mécanique, une bonne mise en œuvre exige impérativement de fixer un dosage maximum en fibres à ne pas dépasser en aucun cas au détriment de l'efficacité mécanique.

II.8 FORMULATION DU BETON DE FIBRES

L'insuffisance de développement de formulation des bétons de fibres (mis à part les quelques méthodes empiriques que nous propose la littérature [22] et qui, dans certains cas, débouchent sur des résultats erronés) a toujours posé un problème. Avec l'évolution de cette technologie et pour venir en aide aux industriels qui s'intéressent aux BFM, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) a pu établir une méthode de formulation de ces bétons courants. La particularité de cette méthode, est qu'elle nous donne la possibilité d'avoir une composition à chaque fois spécifique. Par conséquent, elle conduit à un matériau optimisé vis-à-vis des objectifs escomptés. Ainsi selon que l'on souhaite avoir un BFM maniable, résistant ou ayant une influence sur la ductilité des structures, le matériau composite conçu sera totalement distinct [22].

Les deux hypothèses dont dépend la méthode dite Baron-Lesage[22] sont

1. Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C fixe), le béton le plus maniable et le plus compact est celui qui a le squelette minéral le plus optimal.
2. Le dosage en granulats est indépendant de la nature et du volume de la pâte de ciment (eau+ciment).

Une troisième hypothèse vient se dresser pour renforcer les deux premières et assurer l'adéquation de cette méthode aux bétons de fibres métalliques dont l'énoncé est le suivant :

3. L'introduction des fibres métalliques n'influe en rien sur les deux premières hypothèses.

II.9 CONCLUSION

Le béton de fibre est un matériau composite formé de béton mélangé avec des fibres métalliques et de fibre polypropylène , dont la section est de l'ordre du millimètre et la longueur de quelques centimètres. Les bétons de fibres présentent une très bonne résistance aux chocs et aux températures élevées et un comportement à la rupture supérieur à celui des bétons courants, donc

l'incorporation de fibres diverses dans le bétons en vue d'améliorer leurs performances mécaniques .

III.1 INTRODUCTION

Cette partie est consacrée à une recherche sur les travaux antérieurs déjà réalisés sur le comportement du béton porté à une température élevée. Cette analyse portera d'une part, sur les mécanismes de l'instabilité thermique du béton avec les paramètres pouvant influencer cette dernière ; d'autre part, sur les différentes transformations physiques et chimiques, les performances mécaniques, les phénomènes de transfert de chaleur et de masse du béton lorsqu'il est soumis à un traitement thermique. Le béton est composé de liant, de granulats, de l'eau et éventuellement d'adjuvant.

Lors du chauffage, les différents constituants du béton subissent diverses transformations ayant un impact sur les propriétés du béton. Les phénomènes observés sont le retrait de dessiccation, la dilatation thermique, le fluage et des transformations minéralogiques. Dans cette étude, nous présenterons en première partie les différentes formes d'endommagement thermique avec les mécanismes et paramètres pouvant être à l'origine de ce phénomène. Ensuite, en dernière partie, l'étude portera sur les modifications de la matrice cimentaire et des granulats ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques du béton.

III.2 DIFFERENTES FORMES D'ENDOMMAGEMENT THERMIQUE

Les incendies d'ouvrages en béton ont mis en avant l'impact des températures élevées sur l'endommagement du béton. Les effets de la température élevée sur les propriétés du béton ont été rapportés dès les années 1940. Les différents exemples d'incendie de bâtiments (Tour Windsor, Madrid, 2005) et de tunnels (Tunnel Sous la Manche, 1996-2008; Tunnel Mont Blanc, 1999; Tunnel Gothard, 2001; Howard Street Tunnel, 2001; Tunnel Fréjus, 2005) montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de matière, une perte de résistance mécanique voire la mise hors service de l'ouvrage. La figure III.1 illustre quelques dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'incendie.



Tunnel Sous la Manche en phase de réparation à la suite de l'incendie de Septembre 2008, [23].

Tour Windsor (Madrid) 2005, Partie de la structure en béton, [24].

Figure III.1; Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.

III.2.1 paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton

Plusieurs paramètres et phénomènes peuvent influencer l'éclatement du béton porté à haute température

❖ La présence d'eau dans le béton

L'eau dans le béton joue un rôle important dans l'instabilité thermique. Elle est à l'origine de la formation de pressions internes qui sont considérées comme une des sources du phénomène d'éclatement.

Les travaux menés par Hager [25] sur la détermination de la pression de vapeur dans un BHP séché à 105°C ($w = 0\%$), partiellement séché à 80°C ($w = 0.38\%$) et non séché ($w = 3.1\%$) montrent une variation de la pression de vapeur en fonction de la teneur en eau libre (w) dans le matériau. Le béton séché présente une faible pression de vapeur (0.26 MPa) tandis que pour le béton non séché une forte pression est obtenue (4MPa).

Les auteurs suivants [26], [27], [28] considèrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement.

Toutefois des instabilités thermiques ont été observées sur des éprouvettes de bétons avec une teneur en eau libre bien inférieure à 3% [29],

Il a été observé que l'éclatement n'apparaît pas si le matériau est sec, même en présence d'un fort gradient thermique (Harmathy et al. repris par Hertz [27])

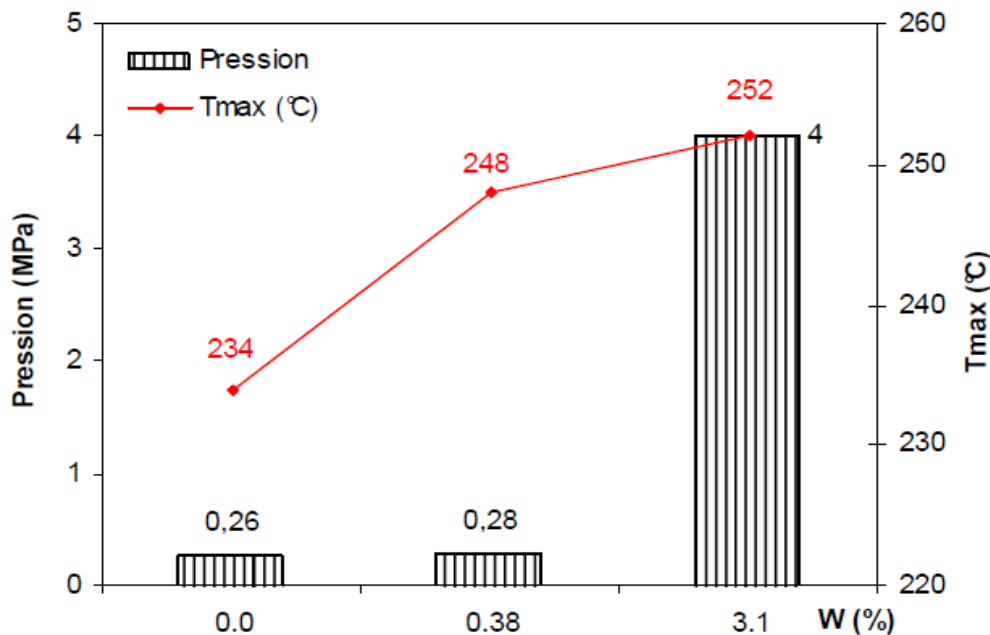


Figure III.2: Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [25].

❖ Les propriétés physico-mécaniques du matériau

Le béton caractérisé par un faible rapport eau/liant est plus sensible à l'instabilité thermique que le béton dont le rapport est élevé. La structure dense, la faible porosité et la faible perméabilité caractérisant les bétons à hautes performances, rendent difficile le transfert des fluides ce qui pourra entraîner une augmentation de pressions internes lors de la montée en température.

❖ La vitesse de chauffage

C'est un facteur qui influe beaucoup sur la stabilité thermique du béton. Plus la vitesse de chauffage est importante, plus le risque d'éclatement est élevé. Les essais de caractérisation effectués par [30] sur des éprouvettes de béton soumises à des cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ conduisent à des éclatements d'éprouvettes tandis que celles soumises à la vitesse de chauffage de $0.1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ n'éclatent pas. La faible vitesse de montée en température limite la formation de la zone saturée et réduit le gradient de température. L'échauffement rapide de la surface du béton engendre de forts gradients thermiques (contraintes thermiques). Le gradient thermique engendre des contraintes de compression et de traction pouvant entraîner l'écaillage du béton.

❖ La nature des granulats

Selon leur nature chimique et minéralogique, le comportement des granulats diffère lorsqu'ils sont soumis à une montée en température. Le coefficient de dilatation des granulats siliceux est plus élevé que celui des granulats calcaires ce qui permet aux granulats calcaires d'avoir une meilleure stabilité thermique ([31], [32]). Les essais de chauffage jusqu'à 200°C de granulats silico-calcaires réalisés par Mindégua [32] montrent un clivage violent des granulats de silex pour une gamme de température de 110°C à 165°C. La figure III.3 illustre l'instabilité thermique des granulats de silex comparée aux granulats calcaires à la suite d'un cycle thermique à 200°C.

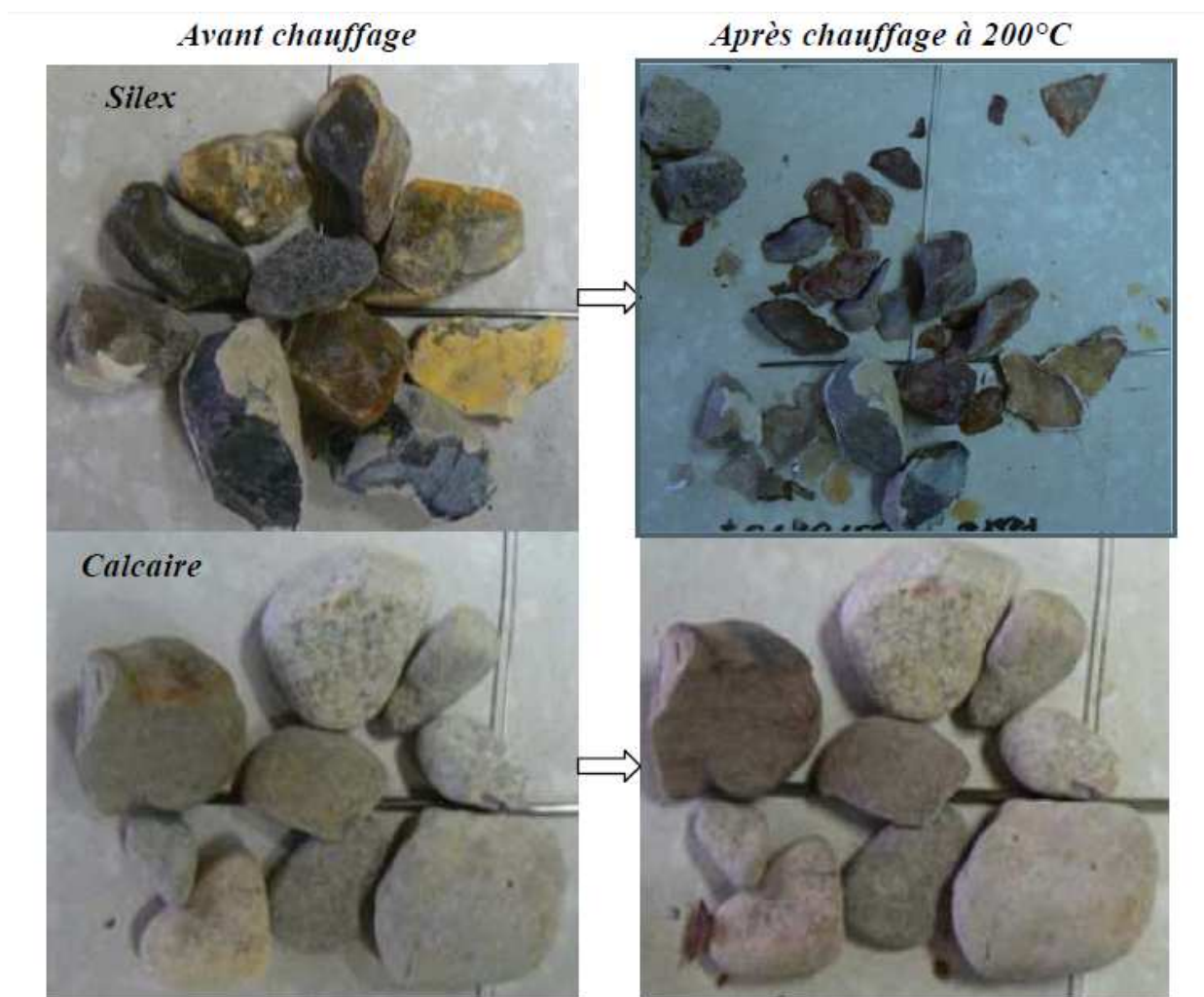


Figure III.3: Illustration du caractère instable des granulats de silex comparés aux granulats calcaires [32].

III.2.2 Déformations thermiques du béton,

Avant l'étude de la déformation thermique du béton, nous distinguons dans un premier temps la déformation thermique de la pâte de ciment durcie de celle des granulats. Les travaux de recherche sur la déformation thermique de la pâte de ciment montrent que celle-ci se décompose en deux phases : la phase d'expansion et la phase de retrait. Les travaux expérimentaux des auteurs comme Hager [25] ont montré que la pâte de ciment se dilate dans la plage de température allant jusqu'à 150°C. La vitesse de chauffage influence le changement de signe de la déformation thermique, [1956]. Pour une vitesse de chauffage inférieure à 10°C.mn⁻¹, la température de changement de signe est autour de 150°C et 200°C. A une vitesse de 35°C.mn⁻¹, la température avoisine 300°C ([34] rapporté par [25]). Les vitesses de 0.5°C.mn⁻¹ et 1°C.mn⁻¹ utilisées par Hager [25] conduisent respectivement à des températures de changement de 225°C et 300°C. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements cinétiques moléculaires qui s'ajoutent à la pression développée par une diminution de la tension superficielle de l'eau lorsque la température augmente (Dettling, 1964, rapporté par [35]). Le coefficient de dilatation thermique est très influencé par l'humidité relative de la pâte de ciment.

Au-delà de cette plage de température de 150°C, la pâte de ciment subit un retrait très important lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. La pâte de ciment à hautes performances se dilate plus que la pâte ordinaire et elle se rétracte moins.

Les granulats ont un comportement différent de celui de la pâte de ciment. L'expansion thermique des granulats dépend de la nature minéralogique des roches notamment de leur teneur en silice. Le coefficient de dilatation thermique des granulats est fonction aussi de leur teneur en eau et de la cristallinité des minéraux [35]. Les granulats calcaires ont des déformations thermiques plus faibles que les granulats de nature siliceuse.

Le coefficient thermique moyen des roches calcaires est de l'ordre de $5.5 - 11.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et celui des roches à forte teneur en silice est $9 - 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour des températures comprises entre 20°C et 100°C.

Le béton étant constitué majoritairement de granulats, sa déformation thermique dépend surtout de la nature des granulats. La figure I.3.4 illustre les travaux de Piasta [36] sur une étude comparée de déformation thermique de la pâte de ciment à celle du béton contenant des granulats d'origines diverses. La déformation du béton est fortement liée à la nature des granulats qui constituent son squelette. La dilatation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéairement dépendante de la température. Pour une température supérieure à

150°C, la pâte de ciment s'oppose à cette dilatation et se rétracte. Au-delà de 600°C, une faible ou un arrêt de dilatation et un léger retrait s'observent dans le comportement du béton, toujours selon la nature minéralogique des granulats.

L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment génère à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui engendrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats.

Le comportement opposé granulats - pâte de ciment pourrait donc engendrer des microfissurations dans le matériau.

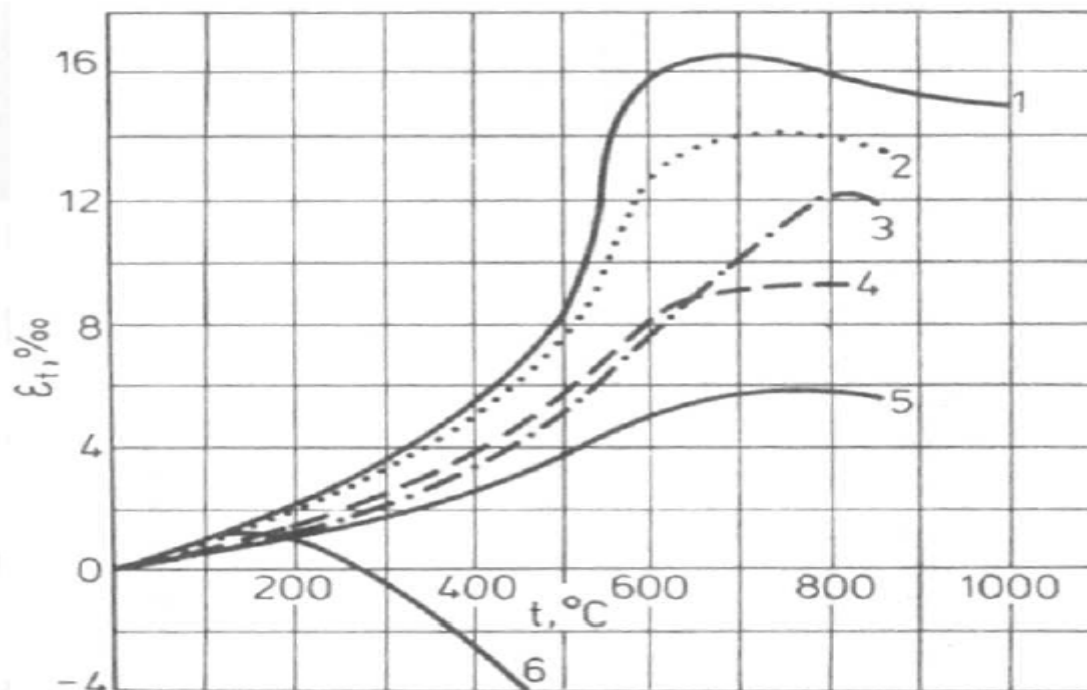


Figure III.4: Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats (1 : Siliceux, 2 : Grès, 3 : Calcaire, 4 : Basalte, 5 : Argiles expansées, 6 : Pâte de ciment), [36].

III.3 EVOLUTION DES PROPRIETES MECANIQUES

Lors de la montée en température, le béton subit des transformations physicochimiques. La modification de la microstructure du béton influence donc ses propriétés mécaniques.

Dans cette partie, l'étude portera sur l'évolution des propriétés mécaniques à chaud ou après refroidissement (propriétés résiduelles) en fonction de la température. Les caractéristiques mécaniques considérées sont la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité.

III.3.1 Résistance en compression

La résistance en compression est une des propriétés les plus importantes pour caractériser un béton. Elle baisse globalement avec l'élévation de la température.

Hager [25] a réalisé des essais de compression à chaud sur des bétons de différentes formulations (rapports E/C de 0.3, 0.4 et 0.5). L'analyse de la courbe d'évolution (Figure III.5) de la résistance à chaud en fonction de la température lui permet de regrouper cette évolution en trois phases. La première phase, allant de la température ambiante à 100°C, est caractérisée par une diminution de la compression relative de 20 à 30%. La seconde phase, entre 100°C et 250°C, est marquée par une augmentation de résistance par rapport à la température 100°C.

Les BHP ne présentent cette augmentation qu'à 400°C. Cette augmentation dite retardée comme l'ont aussi remarquée Castillo [52], Pimenta [53], Kanéma [41], peut s'expliquer par la faible perméabilité de ces bétons compacts. Le départ de l'eau est donc ralenti. La dernière phase, au-delà de la température 400°C pour le BHP et 250°C pour les autres bétons, souligne une diminution de résistance de façon monotone.

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

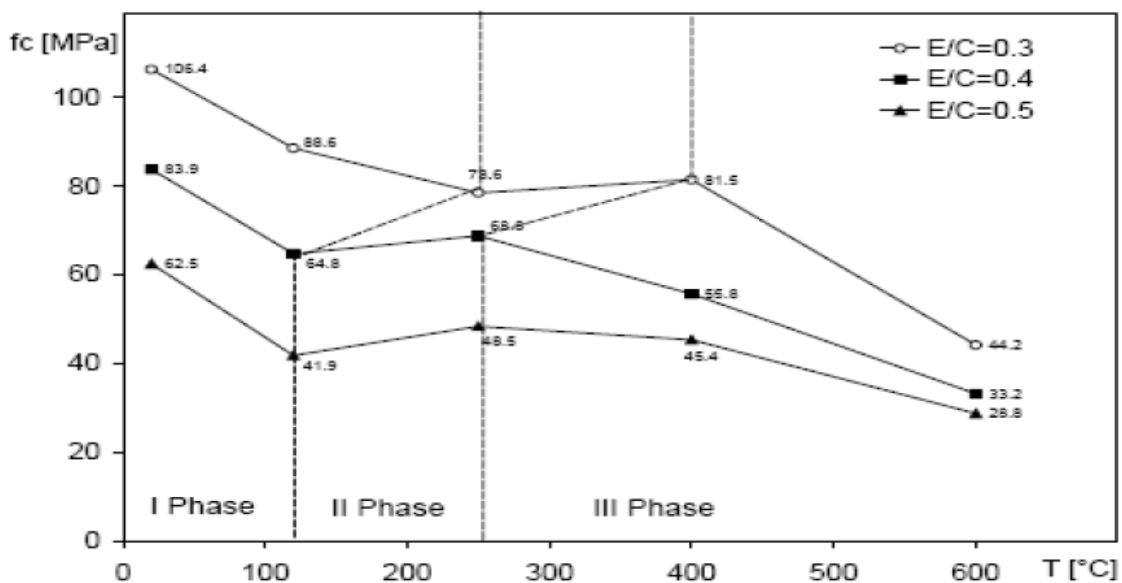


Figure III.5: Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures [25].

Les essais de compression résiduelle montrent aussi un comportement similaire du béton. D'autres auteurs comme Diederichs [37], Phan [38], 2004], regroupent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température en deux domaines. Le premier domaine, de la température ambiante à 250°C- 400°C. Il est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. Le second domaine, de la limite intermédiaire à la température 600°C, marque la baisse continue de la résistance en compression. Les essais, tant à chaud ou après refroidissement, montrent une baisse de la résistance en compression entre les températures 100°C et 200°C.. La rupture à la compression étant liée au dépassement des contraintes de cisaillement, l'affaiblissement des liaisons entre les hydrates peut provoquer l'apparition de micro-défauts facilitant le glissement. Entre les températures 250°C et 350°C (voire 400°C), un gain de résistance en compression s'observe. Le départ de l'eau du matériau peut entraîner une re-augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface [40]. Ces différents phénomènes peuvent entraîner une augmentation de la résistance en compression. Au-delà de la température 350°C (400°C), la résistance baisse de façon monotone. Après cette température, le comportement du béton est lié à la des hydroxylation de la portlandite, la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment (se rétracte) et les granulats (se dilatent).

Nous regroupons dans le tableau III.1 les différentes hypothèses émises sur les phénomènes observés lors de l'étude de la résistance en compression du béton en fonction de la température.

Tableau III.1: Hypothèses sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température[40].

Température	Effet sur la résistance En compression	Hypothèses concernant l'explication du phénomène
20°C - 200°C	Diminution	- dilatation thermique de l'eau, - réduction des forces de liaison entre les couches de C-S-H, - réduction de l'énergie de surface entre surfaces, - développement éventuel de groupes silanols (Si-OH HO-Si), - pressions de vapeur d'eau créant des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette.
200°C - 350°C (400°C)	Augmentation	- départ de l'eau, - hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire, - accroissement des forces de liaison entre les gels C-S-H, - accroissement de l'énergie de surface
> 350°C (400°C)	Diminution	- déshydratation du gel C-S-H, - deshydroxylation de la portlandite, - décomposition du carbonate de calcium, - clivage des granulats, - endommagement par fissuration causée par la dilation différentielle thermique entre les granulats et la pâte.

III.3.2 Résistance en traction

Dans la littérature, il existe peu de résultats relatifs à l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. La détermination de cette propriété est primordiale du fait que l'instabilité thermique du matériau béton est liée au dépassement de sa résistance en traction.

La plupart des observations sur la résistance en traction porte sur des essais après refroidissement. Kanéma [41] a réalisé des essais de traction par fendage sur cinq formulations de bétons B325 - B350 – B400 – B450 – B500. Les paramètres ayant fait l'objet de cette étude sont l'influence du rapport E/C, la vitesse de chauffage, la durée du palier de température ainsi que l'âge du béton. Les éprouvettes cylindriques de section 11x 22 cm ont été soumises à

différents cycles de chauffage-refroidissement. La figure III.6 illustre l'évolution de la résistance résiduelle en traction en fonction du cycle de chauffage-refroidissement pour une vitesse de montée en température de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ avec un palier de température d'une durée d'une heure. L'intensité de la résistance résiduelle en traction baisse pour toutes les compositions de bétons et elle dépend du rapport E/C. Les bétons à faible rapport E/C (B450 – B500) présentent une baisse plus significative de leur résistance que les bétons à E/C élevé (B325 – B350) dès la température 150°C . Les travaux de Min Li [42] montrent également la baisse plus rapide de la résistance résiduelle en traction par fendage des pâtes à hautes performances que celle des pâtes ordinaires dans la plage de température comprise entre 200°C et 400°C .

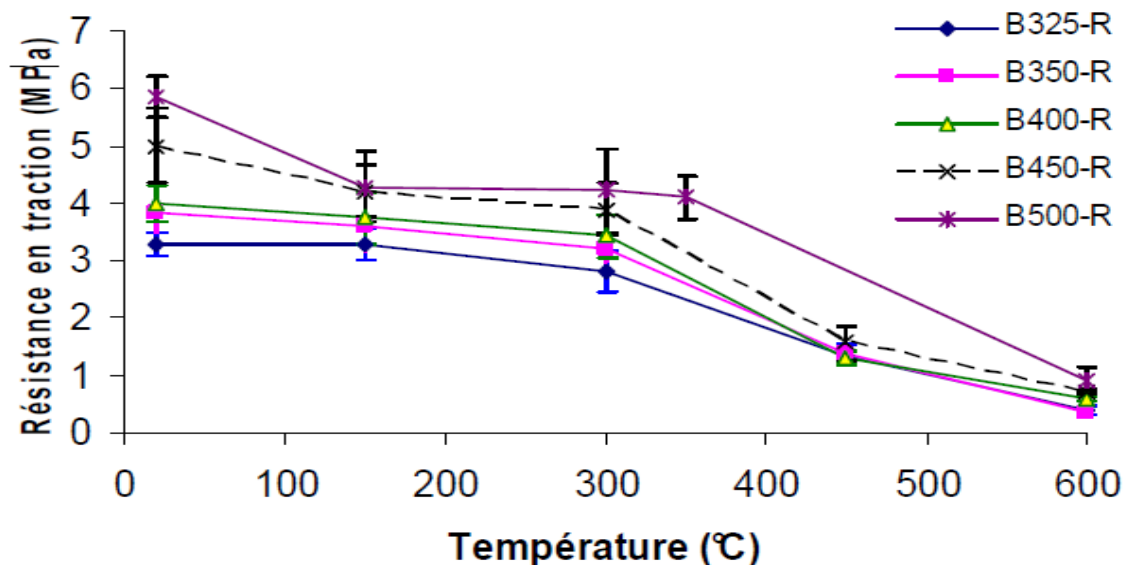


Figure III.6: Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage[41]

L'étude de l'influence de la vitesse de chauffage sur l'évolution de la résistance résiduelle en traction des bétons B325 et B500 pour une même durée de palier, montre une résistance plus faible des bétons B325 ($E/C = 0.62$) à la suite du traitement thermique à la vitesse de $0.1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ par rapport à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$. Quant aux bétons B500 ($E/C = 0.29$), le changement de vitesse influe peu sur les résultats de la résistance en traction [41]. Cela semble être lié à la quantité d'eau présente dans le béton. Cette diminution de résistance résiduelle en traction est aussi montrée par Harada[43]. Par contre, certains auteurs comme Hager [25] observent une augmentation de la résistance en traction à chaud par rapport à celle déterminée avant chauffage. Les travaux de Hager [25] portent sur des essais de traction directe à chaud sur un BHP (100 MPa) pour différents cycles de chauffage de 120°C , 250°C et 400°C . L'auteur

observe une augmentation de la résistance en traction à chaud (6.2 MPa à 400°C) par rapport à celle obtenue à la température ambiante (3.8 MPa).

III.4 INFLUENCE DES FIBRES DE POLYPROPYLENE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON SOUMIS A UNE TEMPERATURE ELEVEE

L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton améliore sa stabilité thermique. Elles fondent et s'évaporent, générant un canal qui facilite le transport de flux hydriques. L'étude des bétons contenant des fibres montre, en présence du polypropylène, une baisse de pic de pression de vapeur avec la montée en température. Cette diminution est liée au volume de fibres.

L'analyse des propriétés mécaniques des bétons de fibres de polypropylène en fonction de la température conduit à des avis divergents. Certains auteurs Hammer [44], Komonen et al [45] , constatent une amélioration des propriétés mécaniques en présence des fibres de polypropylène. Ce gain de résistance est attribué à l'évacuation rapide de l'eau du matériau et la réduction des pressions induites lors de la montée en température.

III.4.1 Sur l'instabilité thermique

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour lutter contre la fissuration du béton à l'état frais. Elles permettent de renforcer le béton avant durcissement et d'éviter ainsi la fissuration de retrait au très jeune âge. Leur domaine d'application s'est élargi à la prévention du phénomène d'éclatement des BHP à une température élevée.

Hammer [44], Komonen et al. [45], et d'autres auteurs ont montré que l'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton réduit considérablement l'éclatement. La première utilisation des fibres de polypropylène date des années 1995 (Japan Centre, Frankfur, Allemagne) [Brei, 1996]. Cette technique de prévention est d'ailleurs recommandée par l'Eurocode 2 [46]. La quantité minimale de fibres de polypropylène permettant d'éviter le risque d'éclatement est de l'ordre de 0.20 % du volume de béton. L'analyse thermique différentielle (ATD) des fibres de polypropylène effectuée par Kalifa et al. [47] montre des pics sur les courbes d'ATD des fibres (figure III.7). Les auteurs attribuent le premier pic au point de fusion des fibres de polypropylène à une température 171°C ; le second pic correspond à la température de vaporisation à 341°C et le troisième, au point de carbonatation à 457°C.

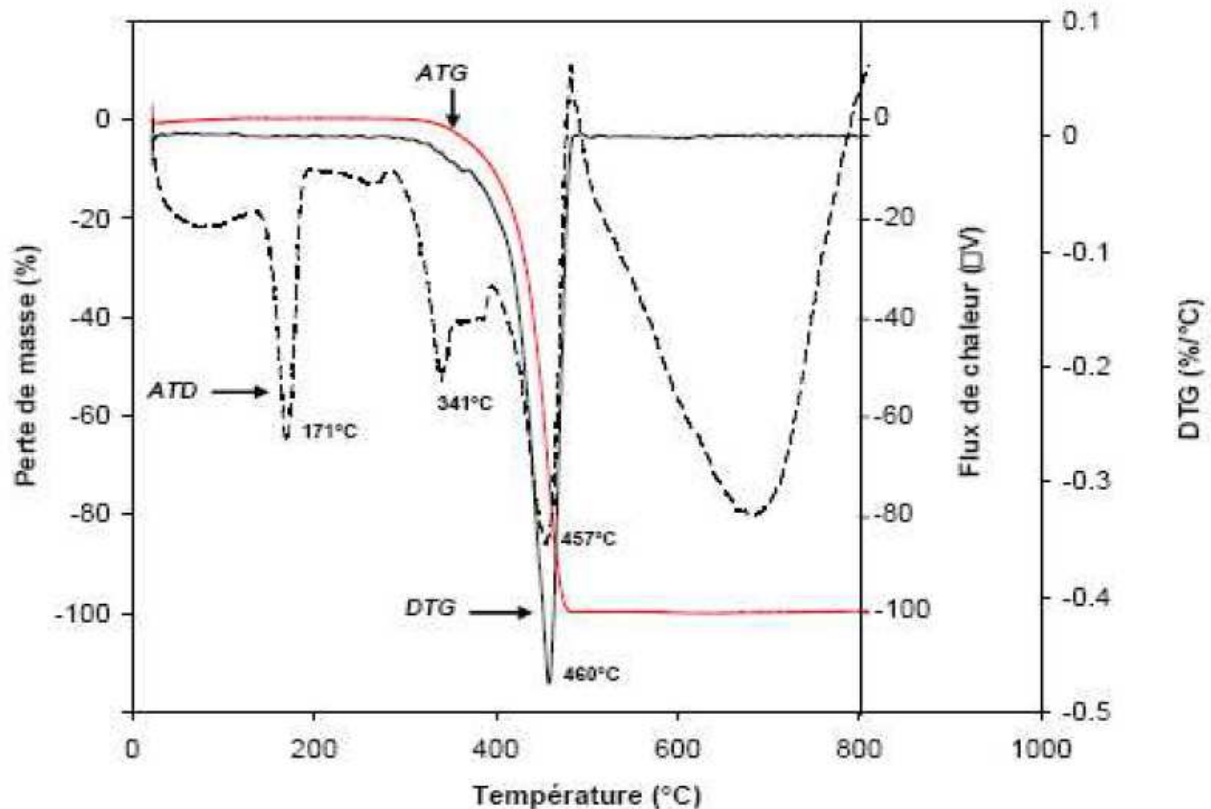


Figure III.7: Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène [48]

III.4.2 Sur la perte de masse du béton

Lors de la montée en température, le béton perd de la masse, en rapport au départ de l'eau sous forme libre ou liée. La figure III.7 illustre l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de bétons avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [25]. L'évolution de la perte de masse est la même pour tous les bétons.

La courbe d'évolution de la perte de masse d'un béton se résume en trois domaines dont les limites varient suivant les auteurs

- De la température ambiante à 120°C : une faible variation de masse s'observe. Ce premier domaine marque le départ de l'eau libre des capillaires [49].
- De 120°C à 300°C : l'augmentation de la perte de masse est beaucoup plus rapide. Ce domaine est caractérisé par le départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable[25]
- au-delà de 300°C : la vitesse de perte de masse diminue. La diminution de la masse continue à cause de la dés hydroxylation de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium [39],[25].

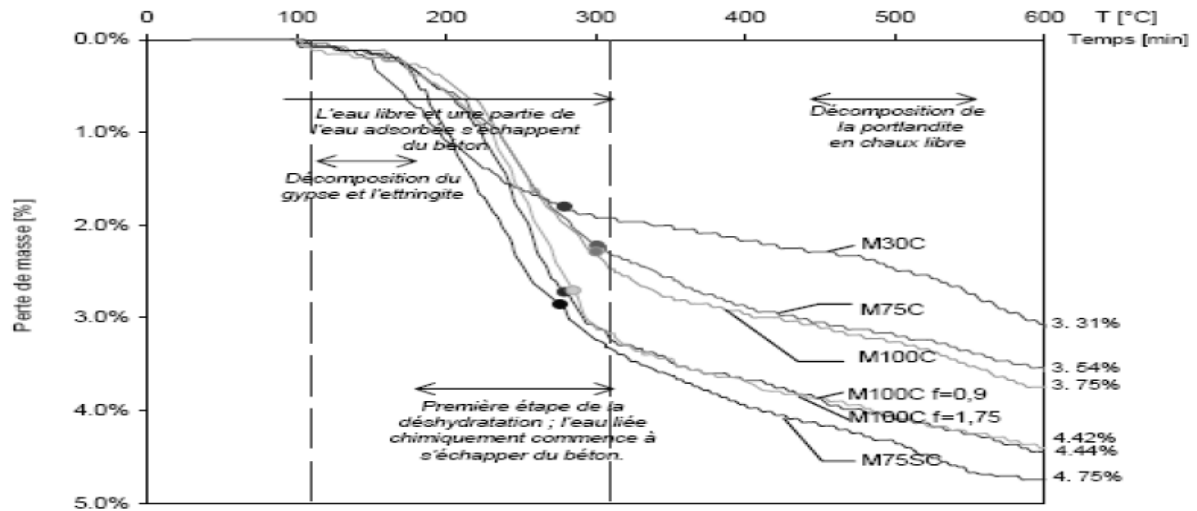


Figure III.8: Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$, [25].

III.4.3 Résistance en compression

A la température ambiante, les résistances en compression varient peu pour des dosages inférieurs à 3 kg/m^3 de fibres [49]. Les résultats obtenus par Hager [25] montrent au contraire une baisse de résistance de 17% et 25% pour des bétons contenant respectivement 1.75 kg/m^3 et 0.9 kg/m^3 de fibres de polypropylène malgré l'augmentation de 10% de la pâte de ciment dans la composition des bétons fibrés. L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température des bétons de fibres de polypropylène varie suivant les auteurs. La figure III.9 rassemble les résultats obtenus par différents auteurs.

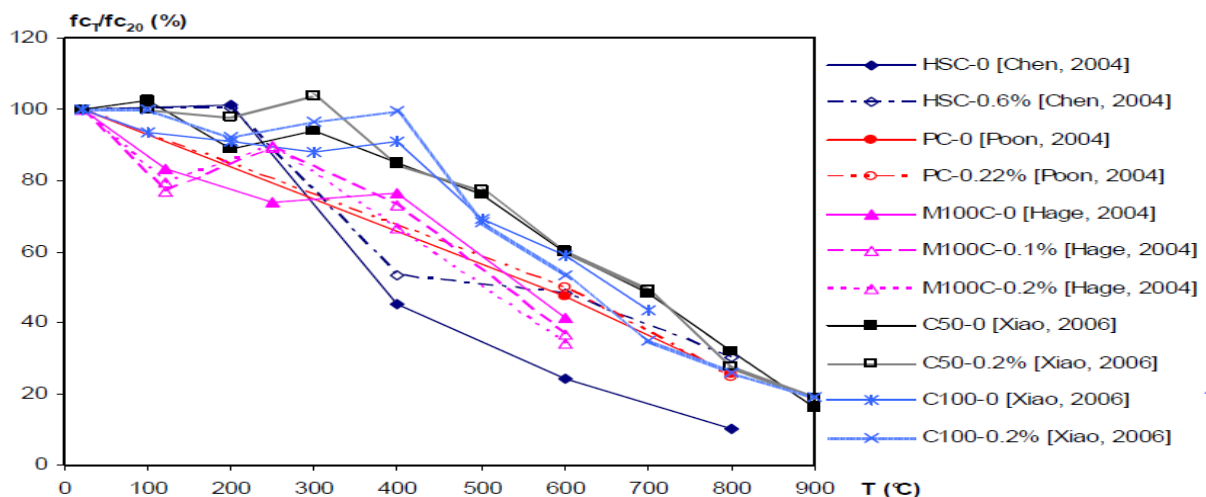


Figure III.9: Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique [25].

III.4.4 Résistance en traction par flexion

La résistance résiduelle en traction des bétons fibrés de polypropylène diminue en fonction de la température comme pour les bétons non fibrés. La figure III.10 illustre l'évolution de la résistance résiduelle relative à la traction obtenue par différents auteurs.

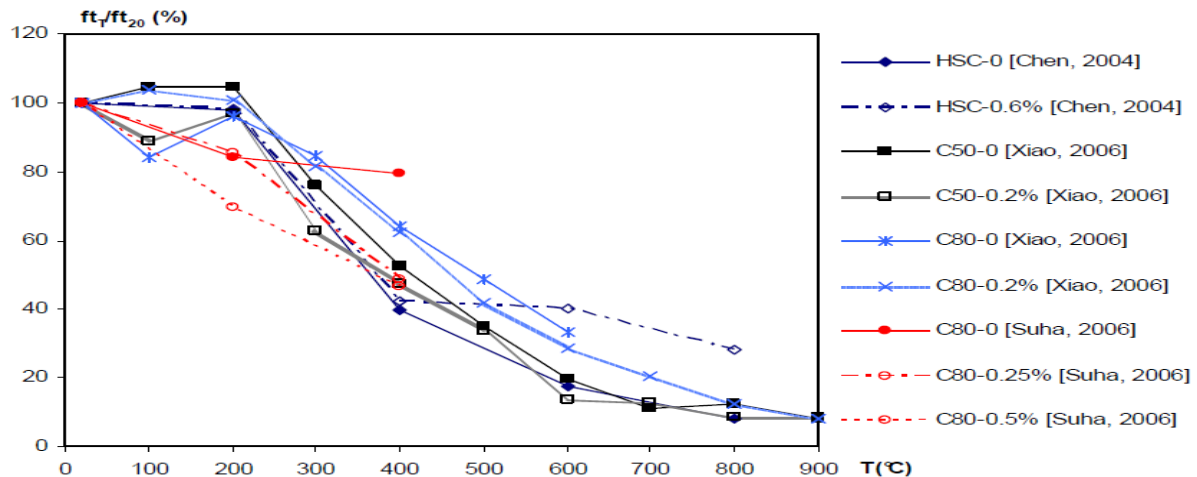


Figure III.10: Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique[25].

III.5 INFLUENCE DES FIBRES METALLIQUES SUR LE COMPORTEMENT DU BETON SOUMIS A UNE TEMPERATURE ELEVEE

L'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton porté à une haute température montre pour certains auteurs une instabilité thermique à une température peu élevée (inférieure à 200°C) ou une instabilité retardée (à partir de 800°C). Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine des différences observées : le mode de cure des éprouvettes (éprouvettes sèches ou saturées), la vitesse de chauffage, la teneur en fibres qui semble être un facteur prépondérant. Plus la teneur en fibres métalliques est élevée, plus il y aura un risque de répartition hétérogène des fibres voire la floculation des fibres. La forte quantité de fibres peut aussi générer un gradient thermique supplémentaire qui engendrerait le phénomène d'instabilité thermique. Les résultats des travaux de [51] montrent que l'ajout de 0.25% et 0.5% de fibres métalliques ne permet pas d'améliorer de façon significative les propriétés mécaniques résiduelles du béton chauffé jusqu'à 400°C. L'influence positive des fibres métalliques est observée. Cette amélioration peut être retardée et disparaître à partir d'un seuil de température. Les résultats notamment sur l'amplitude du gain apporté par les fibres métalliques varient

suivant les auteurs. Une convergence des résultats de l'influence des fibres métalliques sur le comportement résiduel du béton n'apparaît pas encore à travers la littérature.

III.5.1 Perte de masse

La présence de fibres métalliques dans le béton ne modifie pas l'allure de la courbe de la perte de masse du matériau. Comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène, on distingue sur la courbe trois domaines différents : une faible perte de masse entre 20°C et 150°C et entre 300°C et 600°C, une perte de masse importante entre 150°C et 300°C.

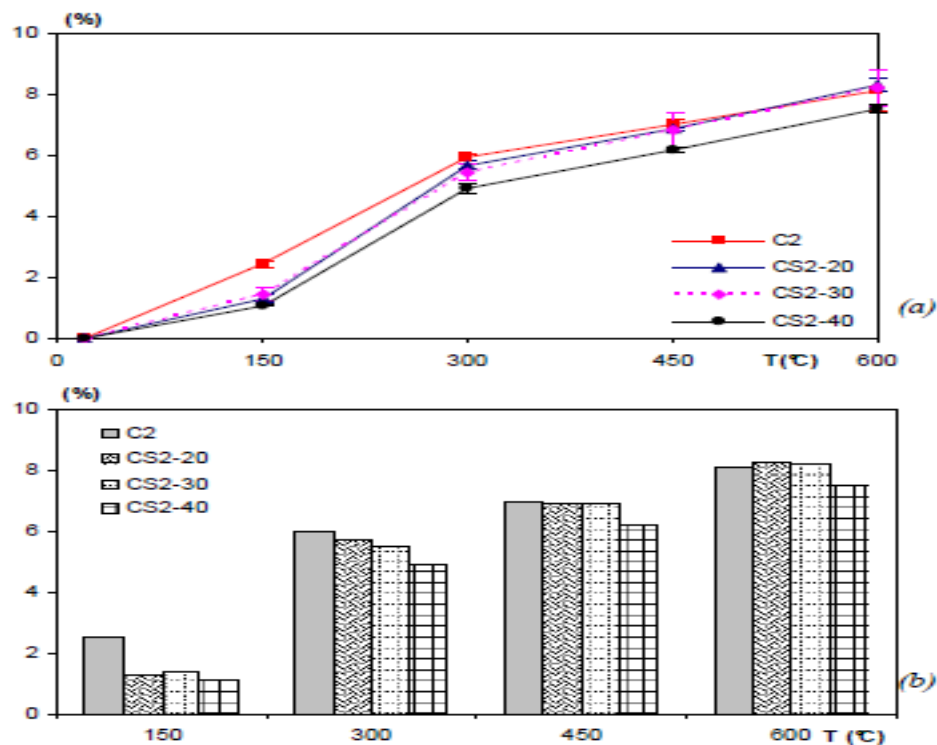


Figure III.11: Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température[25].

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

Au-delà de la température 150°C, on remarque toujours une diminution de perte de masse des bétons de fibres métalliques mais moins importante. Après le chauffage à 600°C, les pertes de masse des bétons C2, CS2-20, C3 et CS3-20 sont respectivement 8.1%, 8.3%, 7.2% et 6.9%. Cette variation de perte de masse semble être liée à la quantité de fibres. La composition des bétons de fibres métalliques est obtenue par substitution volumique d'une partie des granulats. Les granulats sont humides au moment de la fabrication du béton. Le remplacement d'une

partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée. La quantité d'eau pouvant être absorbée par les granulats substitués varie de 0.1 à 0.2% pour le béton C2 et de 0.2 à 0.4% pour le béton C3. La baisse de perte masse au-delà du chauffage à 150°C se retrouve dans cet ordre de grandeur.

La perte de masse des bétons CS3 est inférieure à celle des bétons CS2. A la température 600°C, la perte de masse du béton CS3-30 est de 6.8% et celle du béton CS2-30 est de 8.2%.

III.5.2 Résistance en compression

Le tableau III.2 résume les valeurs des résistances résiduelles et relatives en compression des différents bétons de fibres métalliques CS2 et CS3. Chaque valeur est la moyenne réalisée sur trois éprouvettes. Les figures 5.6 et 5.7 montrent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température de chauffage des bétons CS2 et CS3. La résistance en compression des bétons de fibres métalliques baisse avec l'augmentation de la température de la même manière que pour les bétons sans fibres et avec les fibres de polypropylène : peu de perte, voire un gain de résistance avant 300°C, puis une chute rapide de résistance.

Les bétons de fibres métalliques présentent de meilleures résistances résiduelles en compression à la température ambiante que le béton sans fibres. Ce gain de résistance est plus remarquable avec les bétons CS3. On note une influence de la variation de la proportion de fibres. Cette amélioration de la résistance en compression des bétons de fibres métalliques est observée pour tous les cycles de chauffage-refroidissement. Les résistances des bétons C2 et C3 restent toujours inférieures à celles des bétons CS2 et CS3 (tableau III.3) Après chauffage à 450°C, contrairement aux bétons sans fibres ou avec les fibres de polypropylène, les bétons de fibres métalliques conservent plus de 50% de leur résistance initiale. La résistance résiduelle relative moyenne des bétons CS2 est de 65% et celle des bétons CS3 est de 57% (C2 : 44% et C3 : 38%). Le gain de résistance résiduelle en compression est quasiment du même ordre de grandeur pour les deux familles de bétons de rapports E/C différents. Le gain de résistance relative est de 21% pour le béton CS2 et 18% pour le béton CS3 après chauffage à 450°C.

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

Tableau III.2: Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques[25].

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	46.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	MPa	57.9	51.2	56.0	36.3	9.0
CS2-20	Ecart type	2.0	1.8	3.9	2.8	0.5
	(%)	100	89	97	63	16
CS2-30	MPa	57.7	46.8	54.8	37.5	10.2
	Ecart type	3.3	1.5	0.9	0.4	0.1
	(%)	100	81	95	65	18
CS2-40	MPa	55.9	44.8	52.1	37.7	13.9
	Ecart type	0.4	1.8	1.4	0.8	0.3
	(%)	100	80	93	67	25
C3	MPa	70.2	62.6	59.6	26.9	9.3
	MPa	69.7	69.9	71.3	43.5	13.4
CS3-20	Ecart type	4.9	3.4	3.1	2.7	0.3
	(%)	100	100	102	62	19
CS3-30	MPa	74.7	67.8	73.8	36.8	15.1
	Ecart type	1.6	0.8	0.5	2.4	1.1
	(%)	100	91	99	49	20
CS3-40	MPa	77.9	69.4	79.1	46.5	14.6
	Ecart type	2.0	1.7	1.9	2.6	0.3
	(%)	100	89	102	60	19



Béton CP3-2 après cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.



Béton CS3-30 après cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.

Figure III.12: Test de compression de bétons de fibres de polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300°[25].

III.5.2 Résistance en traction par flexion

Le tableau III.3 rassemble les valeurs moyennes des résistances résiduelles et relatives en traction par flexion mesurées sur des éprouvettes prismatiques de section 10 x 10 x 40 cm.

Tableau III.3: Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques[25].

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	MPa	5.1	4.3	4.6	2.6	1.4
CS2-20	Ecart type	0.7	0.2	0.7	0.3	0.2
	(%)	100	84	91	52	28
	MPa	6.4	4.4	4.8	4.0	1.7
	Ecart type	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
CS2-30	(%)	100	69	75	62	27
	MPa	5.8	5.3	5.3	3.5	2.4
CS2-40	Ecart type	0.8	0.9	1.7	0.1	0.4
	(%)	100	92	91	60	41
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	MPa	7.2	5.6	6.2	3.8	2.5
CS3-20	Ecart type	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4
	(%)	100	77	86	52	35
	MPa	6.7	6.9	5.4	3.1	2.4
	Ecart type	0.1	0.4	0.2	0.0	0.4
CS3-30	(%)	100	103	82	46	37
	MPa	7.2	7.9	5.9	5.2	2.7
CS3-40	Ecart type	0.1	0.9	0.9	0.7	0.3
	(%)	100	109	83	73	38

III.6 COMPORTEMENT DES BETONS DE COCKTAIL DE FIBRES

L'étude de la résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques montre une amélioration de cette propriété par rapport au béton sans fibres et au béton de fibres de polypropylène. Par rapport aux bétons de fibres métalliques, la résistance résiduelle en traction est plus faible, soit une baisse de l'ordre de 10% après le chauffage à 600°C. Cette baisse de résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres par rapport aux bétons de fibres métalliques a aussi été observée dans les études de [51]. Pour les pourcentages de fibres de polypropylène (0.11% et 0.22%) testés dans notre étude, le comportement résiduel en traction des bétons de cocktail de fibres est principalement lié à la quantité de fibres métalliques dans le cocktail. La proportion de fibres métalliques semble jouer un rôle important sur le comportement des bétons de cocktail de fibres. Comme en compression, les résistances résiduelles relatives en traction des bétons de cocktail de fibres sont comparées à celles obtenues théoriquement en faisant une moyenne arithmétique des

résistances de bétons de fibres de polypropylène et des bétons de fibres métalliques. Le tableau III.3 regroupe les résistances résiduelles relatives en traction théorique et expérimentale des compositions de béton CP3, CS3 et CSP3.

Tableau III.4: Résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en traction des bétons de cocktail de fibres[25].

Bétons	Unités	Températures (°C)	
		300	600
CP3	(%)	60	10
CS3	(%)	82	37
F_c théorique	(%)	71	24
F_c expérimentale	(%)	75	27

Comme en compression, la résistance résiduelle relative en traction des bétons de cocktail de fibres n'est pas une moyenne arithmétique de résistance de bétons de fibres de polypropylène et de bétons de fibres métalliques comme l'illustre la figure III.13 La baisse de résistance résiduelle des bétons en présence de fibres de polypropylène est plus prononcée que celle du béton contenant le cocktail de fibres de polypropylène et de fibres métalliques.

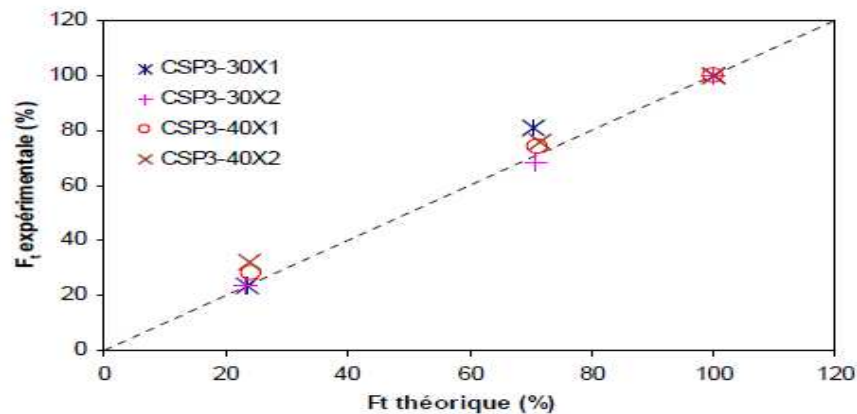


Figure III.13: Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en traction des bétons de cocktail de fibres[25].

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les travaux de recherche déjà réalisés sur l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et d'un cocktail des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé.

IV.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est d'analyser l'influence de fibres de polypropylène, de fibres métalliques et d'un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques sur le comportement du béton porté à une température élevée. L'influence des différentes fibres est étudiée en fonction du rapport eau/ciment de la matrice. Plusieurs éprouvettes de béton sont donc confectionnées. Les propriétés physiques et mécaniques sont déterminées à la température ambiante et après différents traitements thermiques. Le but du présent chapitre est de présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, les compositions de bétons et le dispositif expérimental mis en place.

IV.2 MATERIAU BETON

IV.2.1 Types d'éprouvettes utilisées

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

- Les éprouvette de forme cylindrique normalisées et d'élancement 2 ($10 \times 20 \text{ cm}^3$ norme NF P 18-400, NA 2600) utilisées pour la détermination des résistances à la compression.
- Les éprouvettes prismatiques normalisées (NF P 18-400, NA2600) de dimensions $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour la détermination des résistances à la flexion 3 points.

V.2.2 Les liants

Le ciment utilisé pour la confection de nos éprouvettes est de type CPJ-CEMII/B dans la classe 42,5. Sauvegarder au laboratoire à température ambiante et recouverts d'une toile en plastique pour éviter toute pré-hydratation éventuelle.

IV.2.3 Les sables

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

IV.2.4 Les granulats

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures roulés (sable) concassés (3/8, 8/16)

Leur diamètre varie de 3 à 16mm, ont été lavés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24 heures et conservés dans des sacs à l'intérieur du laboratoire (granulats sec et propres).



Figure IV.1: Granulats utilisés.



Figure IV.2: Séchage des granulats.

IV.2.5 Les adjuvants

L'incorporation des fibres dans le béton diminue considérablement la maniabilité du mélange, l'utilisation d'un plastifiant permet d'augmenter l'ouvrabilité du béton en diminuant la porosité du matériau.

Pour les essais de laboratoire nous avons utilisé un plastifiant commercialisé sous le nom **Sikaplast BV 40⁺**.



Figure IV.3: Plastifiant Sikaplast BV 40⁺.

IV.2.6 L'eau

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet (eau potable).

IV.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

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

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



Figure IV.4: Tamiseuse.

IV.3.1 Principe de l'essai

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

IV.3.2 Equipements utilisés

- Des tamis de différents diamètres.
- Une balance de 15 kg, pesant au gramme près.
- Une étuve thermo statée.
- Un vibro-tamis électrique.

IV.3.3 Description de l'essai

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme concassée, leur diamètre est de 0/3, 3/8 et de 8/15. Une fois lavés, ces matériaux sont séchés à l'étuve à une température maximale de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du fond de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

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

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 , la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 , la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n , aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé. Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (IV.1, IV.2, IV.3).

Tableau IV.1: Analyse granulométrique pour le sable avec 1500g.

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
5	0	0	0	100
2.5	9	0.6	0.6	99.4
1.25	350	23.33	23.93	76.06
0.63	440.5	29.36	53.3	46.7
0.315	410	27.33	80.63	19.366
0.16	221	14.73	95.36	4.63
Fond de tamis	68	4.53	99.9	0.1

Tableau IV.2: Analyse granulométrique pour le gravier 3/8 avec 2000g.

Dimension des tamis[mm]	Refus[g]	Refus cumulés[g]	Refus cumulés[%]	Tamisât[%]
10	0	0	0	100
8	15	15	0,75	99,25
6,3	205,5	220,5	11,025	88,97
5	1029,5	1250	62,5	37,5
3,15	706,5	1956,5	97,825	2,17
2,5	34	1990,5	99,52	0,47
1	6	1996,5	99,82	0,175
fond de tamis	3,5	2000	100	0

Tableau IV.3: Analyse granulométrique pour le gravier 8/16 avec 2500 g.

Dimension des tamis[mm]	Refus[g]	Refus cumulés[g]	Refus cumulés[%]	Tamisât[%]
16	43	43	1,72	98,28
12,5	1269,5	1312,5	52,5	47,5
10	815,5	2128	85,12	14,88
8	318	2446	97,84	2,16
6,3	41	2487	99,48	0,52
5	7,5	2494,5	99,78	0,22
fond de tamis	5,5	2500	100	0

Les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats, voir figure (IV.5)

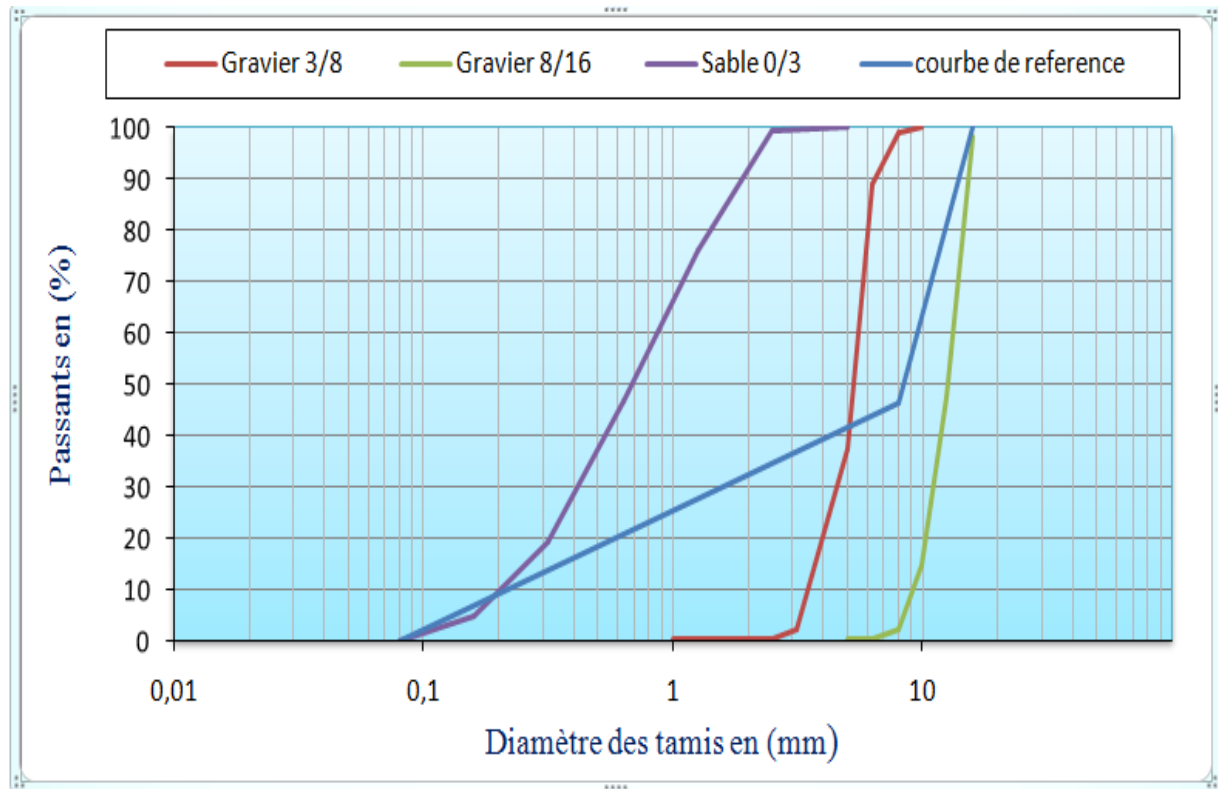


Figure IV.5: Courbe Granulométrique.

IV.3.4 Module de finesse

Tableau IV.4: Analyse granulométrique pour le sable avec M = 1500g

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
5	0	0	0	100
2.5	9	0.6	0.6	99.4
1.25	350	23.33	23.93	76.06
0.63	440.5	29.36	53.3	46.7
0.315	410	27.33	80.63	19.366
0.16	221	14.73	95.36	4.63
Fond de tamis	68	4.53	99.9	0.1

Σ des refus = 1498.5[g]

Le module de finesse se calcule comme étant le un centième de la somme des refus cumulés sur les tamis de modules : 23.26.29.32.35.38 selon la norme française [NFP 18-540], correspondant à la somme des refus cumulés (Exprimés en pourcentage) sur les dimensions des tamis suivant : 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.160. Ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de composition des bétons.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable

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

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

$$M_f = \frac{95.36 + 80 + 53.3 + 23.93 + 0.6 + 0}{100} = 2.538$$

$M_f = 2.54$, on déduit que notre sable est un sable préférentiel.

IV.3.5 Masse volumique absolue et apparente

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent (figure IV.6).

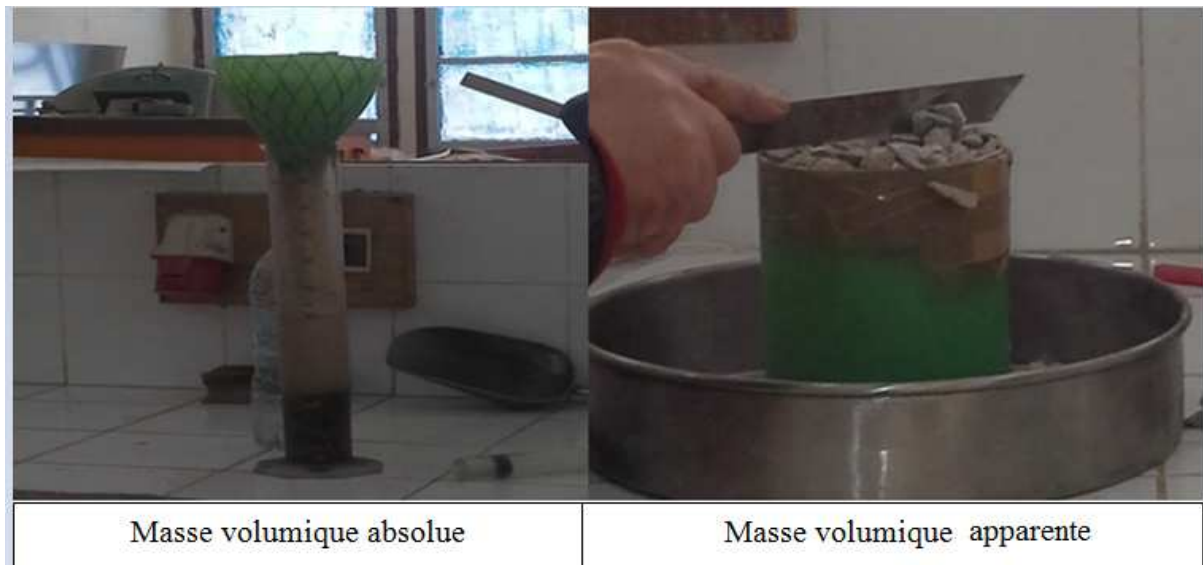


Figure IV.6: Mesure de la masse volumique absolue et apparente.

Les résultats sont représentés dans le tableau (IV.5).

apparente

Tableau IV.5: Masses volumiques absolue et apparente des granulats.

Granulats	Sable (0/2.5)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
Masse volumique absolue [g/cm^3]	2.6	2.6	2.6
Masse volumique apparente [g/cm^3]	1.47	1.45	1.43

IV.3.6 Composition de béton par la méthode de DREUX – GORISSE

Pour la formulation du béton ordinaire vibré (témoin) nous avons choisi la méthode de DREUX-Gorisse qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour 1m^3 de béton. Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant données satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [6].

Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

Résistance visée

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

Soit la résistance désirée pour un béton témoin à 28 jours $\sigma'_{28j} = 26 \text{ MPa}$

La résistance visée pour un béton témoin à 28j est telle que :

$$R'_{28} = \sigma'_{28j} * 1.15$$

$$R'_{28} = 1.15 * 26$$

$$R'_{28} = 29.9 \approx 30 \text{ MPa}$$

IV.3.7 Dosage en ciment et en eau

La formule ci-dessous permet le calcul de la résistance à la compression visée à 28 jours, Soit :

$$R'_{28} = G \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec :

$$\frac{C}{E} = \frac{R'_{28}}{G \sigma'_c} + 0.5$$

R'_{28} : Résistance visée à 28 jours.

σ'_c : Classe vraie de ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (Kg de ciment /m3 de béton).

E : Dosage en eau (Kg d'eau /m3 de béton ou litre d'eau par m3 de béton).

➤ **Choix approprié du coefficient granulaire G :**

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau ci-après, établi par George DREUX [6].

Tableau IV.6: Valeurs approximatives du coefficient granulaire.

Qualité granulats	Dimension D des granulats		
	$D \leq 16\text{mm}$	$25 \leq D \leq 40\text{mm}$	$D \geq 63\text{mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 15 mm, ce qui donne un coefficient granulaire $G=0,45$ avec une bonne qualité.

➤ **Choix de la classe vraie de ciment :**

Le ciment CEM CPJII42.5, de classe vraie estimée à 42,5MPa a été retenu. Le rapport C/E est donné par :

$$\frac{C}{E} = \frac{30}{0,45 \times 42,5} + 0,5 = 2,069 \quad (E/C = 0,483)$$

➤ **Dosage en ciment par m^3 de béton :**

Connaissant le rapport C/E et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit, grâce à l'abaque (Figure II.4), le dosage en ciment correspond :

$$\left. \begin{array}{l} C/E = 2,069 \\ A \approx 6\text{cm} \end{array} \right\} \text{ L'abaque (Figure IV.1) donne la valeur du dosage en ciment égale à } C = 400\text{Kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} C/E \approx 2,069 \\ C = 400\text{Kg} \end{array} \right\} \text{ D'où , } E = 193,33 \text{ Kg}$$

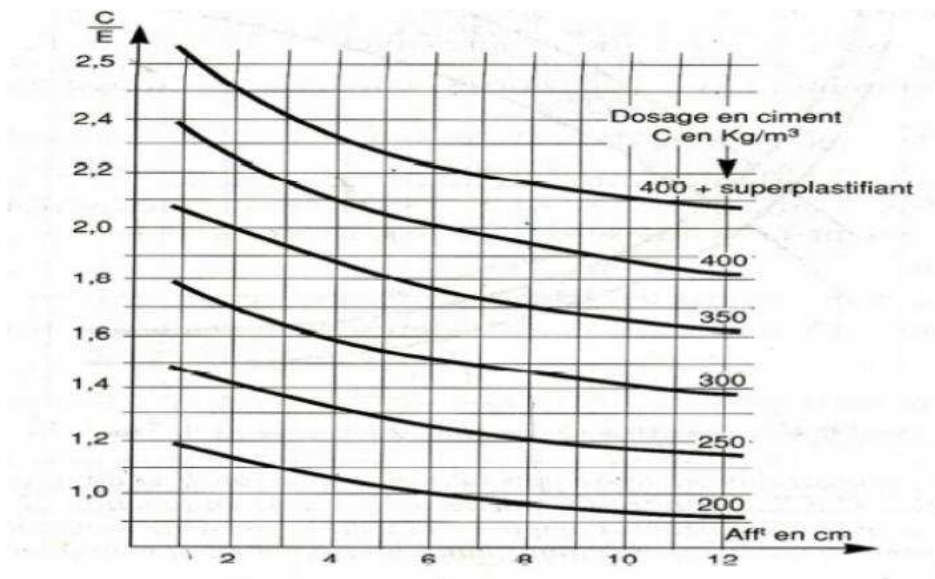


Figure. IV.7: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

➤ Tracé de la courbe granulaire de référence

Cette courbe correspond au mélange des granulats (sable+graviers, mais ciment non compris). Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis), déjà obtenu on trace une courbe granulaire de référence OAB, avec :

- Le point **O** est repéré par ses coordonnées : [0,080 ; 0].
- Le point **B** est repéré par ses coordonnées : [D ; 100], (D : étant le diamètre du plus gros granulat).
- Le point de brisure A, a les coordonnées suivantes :

En abscisse :

Si $D < 20$ mm, l'abscisse est à $D/2$.

Si $D > 20$ mm, l'abscisse est située au milieu, limité par le module 38 (5mm) et celui correspondant à D.

Le point de brisure a pour abscisse 8mm ($D/2 = 8$ mm), car le diamètre du plus gros granulat utilisé étant de 16.

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Avec :

K : coefficient qui dépend du dosage en ciment, de l'intensité de vibration, et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Comme on a : Le dosage en ciment

vaut 400Kg/m^3 , une vibration normale, granulats de forme concassée. La valeur de K étant alors égale à zéro ($K = 0$) (tableau 10.12 de [6]).

K_S : coefficient tenant compte du module de finesse du sable M_f . Comme le module de finesse du sable vaut 2.54, la valeur de K_S est calculée par la formule suivante

$$K_S = 6M_f - 15 = 0.24$$

K_p : coefficient de pompabilité, on peut prendre en générale $K_p = +5\%$ à 10%

Notre béton n'est pas de qualité pompable, alors $K_p = 0$.

$$\text{D'où : } Y = 50 - \sqrt{16 + 0.24 + 0 + 0} = 46.24$$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont : [8; 46.24]

➤ Les lignes de partage

La droite de partage relie le point 95% (tamisât) d'un granulat au point 5% du granulat suivant.

Les points d'intersection des lignes de partage avec la courbe brisé donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successifs. Il s'agit de pourcentages en volumes absolus.

Sur la courbe granulométrique, les points d'intersections entre les lignes de partage et la courbe de référence OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

Tableau IV.7: les pourcentages des constituants.

Sable (0/2.5)	35.9%
Gravier (3/8)	10%
Gravier (8/15)	10%

➤ Coefficient de compacité δ :

Il est défini comme le rapport des volumes absolus en litres des matières solides V_M Au volume total du béton frais soit un mètre cube

$V_M = V_G + V_C$ Avec V_G : Volume absolu des granulats ; V_C : Volume absolu du ciment

$$\delta = \frac{V_M}{1000}$$

En utilisant le tableau des valeurs du coefficient de compacité [54] et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats égal à 16 mm, on trouve une valeur de $\delta = 0,81$ (p250)

D'où $V_M = 810L$

➤ **Dosage des Granulats :**

Les dosages en volume des constituants du béton sont donnés par les relations ci-dessous:

- **Volume absolu du ciment :**

$$VC = \frac{m_c}{\gamma} = \frac{400}{3.1} = 129.03$$

Avec :

mc: dosage (en masse) de ciment.

$\gamma = 3,1$ g/ml: masse volumique.

- **Volume absolu des granulats (l'ensemble):**

$$VG = 1000\gamma - VC = 1000 \times 0.81 - 129.03 = 680.97 \text{ litre.}$$

- **Volume absolu du sable :**

$$VS = V_s \times \frac{35.9}{100} = 680.97 \times \frac{35.9}{100} = 244.46 \text{ l/m}^3$$

- **Volume absolu du gravier (3/8) :**

$$V_{g(3/8)} = V_g \times \frac{10}{100} = 680.97 \times \frac{10}{100} = 68.097 \text{ l/m}^3$$

- **Volume du gravier (8/15) :**

$$V_{g(8/15)} = V_g \times \frac{54.1}{100} = 680.97 \times \frac{54.1}{100} = 368.41 \text{ l/m}^3$$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1 m³ de béton sont:

- **Masse du sable :** $MS = VS \times \gamma_s = 657.6 \text{ kg}$
- **Masse du gravier (3/8):** $M_{g(3/8)} = V_{g(3/8)} \times \gamma_g(3/8) = 183.181 \text{ Kg}$
- **Masse du gravier (8/16) :** $M_{g(8/16)} = V_{g(8/16)} \times \gamma_g(8/16) = 991.03 \text{ Kg}$

Pour préparer 1m^3 de béton, il faudra donc les masses suivantes (Tableau IV.8)

Tableau IV.8: Composition finale pour 1m^3 de béton.

Constituantes	Volume (Kg(l)/m3)
Sable	657.6
Gravier 3/8	183.181
Gravier 8/15	991.03
Eau	193.33
Ciment	400
E/C	0.483
Adjuvant	4

IV.4 LES FIBRES

IV.4.1 Types de fibres utilisées:

- Fibres polypropylènes,
- Fibres métalliques (acier),

IV.4.1.1 Fibres polypropylènes.

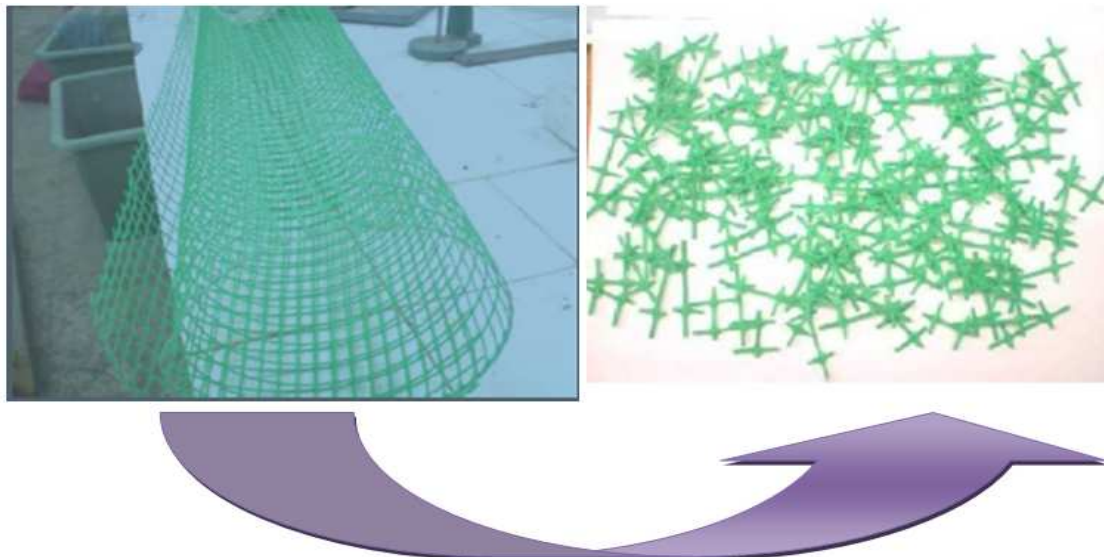


Figure IV.8: Découpage en fibres de la grille.

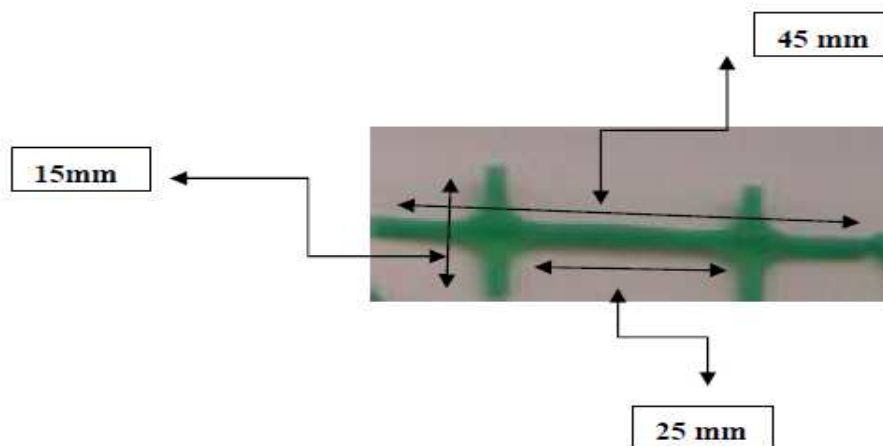


Figure IV.9: Dimensions d'une fibre PP.

Caractéristiques principales des fibres polypropylènes :

- Faible densité ;
- Très grande dureté ;
- Très bonne résistance à hautes températures ;
- Grande résistance à la fissuration ;
- Faible absorption d'eau ;
- Grande résistance aux agents chimiques ;
- Thermo formable ;
- Inertie physiologique ;

Tableau IV.9: Caractéristiques des fibres PP.

Caractéristiques des fibres PP	Longueur [mm]	[Largueur [mm]	Epaisseur [mm]	Densité [g/cm3]
Valeurs	45	2	2	0.91

IV.4.1.2 Fibres métalliques

Les fibres métalliques proviennent du marché accessible à tous, elles sont vendues par mètre sous forme de grille.

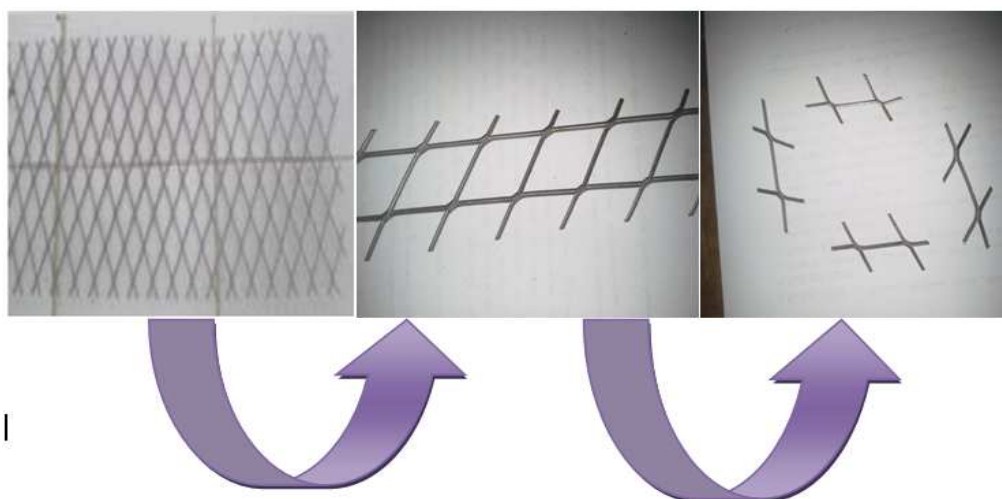


Figure IV.10: Découpage en fibres de la grille métallique.

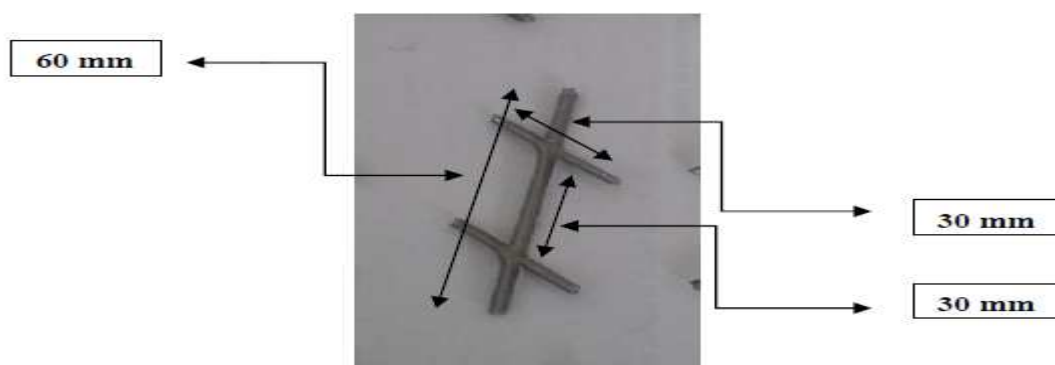


Figure IV.11: Dimension d'une fibre métallique.

Tableau IV.10: Caractéristiques des fibres M.

Caractéristique de la fibre M	Longueur [mm]	Largueur [mm]	Epaisseur [mm]	Densité [g/cm ³]	Poids [g]
Valeurs	60	2	2	7.85	1.5

IV.4.2 Dosage des fibres

❖ pour le béton de fibres polypropènes(FPP) :

✓ 1^{er} gâché (0.6%pp) → 294g FPP.

✓ 2^{eme} gâché(0.3%pp) → 147gFPP.

❖ pour le béton de fibres métalliques(FM) :

(1%FM) → 490gFM.

pour le béton cocktail (FPP+FM):

(0.5%FM+0.15%FPP) → $\left\{ \begin{array}{l} 0.5\%FM=245g \\ 0.15\%FPP=73.5g \end{array} \right.$

Total:

♦ Fibres polypropènes (FPP):469.5g.

♦ Fibres métalliques (FM):735g.

Quantités utilisées pour la réalisation des différents gâchis:

Pour chaque gâchée on a: 9 éprouvettes cylindriques 10x20

9éprouvettes prismatiques 7x7x28

❖ **Béton témoin:(sans fibres)**

Tableau IV.11: les constituants de béton témoin.

Constituants	Quantités[kg]
Ciment	12
Sable(0/3)	19.74
Gravier (8/16)	29.76
Gravier (3/8)	5.52
Eau	5.7
Adjuvants	0.12
Fibres	0
Masse Totale	72.96

❖ Béton fibre polypropène :(0.3%BFPP)

Tableau IV.12: Les constituants de BFPP (0.3%).

Constituants	Quantités [kg]
Ciment	12
Sable(0/3)	19.74
Gravier (8/16)	29.76
Gravier (3/8)	5.52
Eau	5.7
Adjuvants	0.12
Fibres	0.2205
Masse Totale	73.1805

❖ Béton fibre métallique:(1%BFM)

Tableau IV.13: Les constituants de BFM (1%).

Constituants	Quantités [kg]
Ciment	12
Sable(0/3)	19.74
Gravier (8/16)	29.76
Gravier (3/8)	5.52
Eau	5.7
Adjuvants	0.12
Fibres	0.735
Masse Totale	73.695

❖ **Béton association :(0.5%BFM+0.15%FPP)****Tableau IV.14:** Les constituants de béton association (0.5% BFM+0.15% FPP).

Constituants		Quantités [kg]
Ciment		12
Sable (0/3)		19.74
Gravier (8/16)		29.76
Gravier (3/8)		5.52
Eau		5.7
Adjuvants		0.12
Fibres	FM	0.245
	FPP	0.0735
Masse Totale		73.2785

IV.5 PREPARATION DES EPROUVETTES

On a utilisée deux types d'éprouvettes :

- ❖ Eprouvettes prismatiques de $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$.
- ❖ Eprouvettes cylindriques de $(10 \times 20) \text{ cm}^3$.

96 éprouvettes (prismatiques et cylindriques) ont été confectionnées pour l'achèvement des objectifs de ce travail. Les moules étant enduits avec de l'huile.

**Figure IV.12:** Eprouvettes prismatiques**Figure IV.13:** Eprouvettes cylindriques

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



Figure IV.14: Malaxeur

L'usage d'une table vibrante est indispensable pour éliminer une certaine quantité de bulles d'air contenu dans le béton.



Figure IV.15: table vibrante.

Les échantillons sont recouverts d'un film plastique humide pour minimiser l'évaporation de l'eau (effet de retrait).



Figure IV.16: Specimens après coulage.

Le démoulage s'effectue après 24 heures

Après le démoulage toutes les éprouvettes sont immergées dans un bac à eau pendant 28 jours.



Figure IV.17: Eprouvettes conservées dans l'eau.

IV.6 REALISATION DE BETON TEMOIN

Gâchées d'essais : pour chaque gâchée

09 éprouvettes prismatiques (7x7x28)cm³.

09 éprouvettes cylindriques de (10x20)m³.

Le malaxage se fait comme suit :

- Déversement du sable, gravier et ciment dans le malaxeur et mise en marche pendant 1 min environ jusqu'à homogénéisation,
- Introduire de l'eau de gâchage et adjuvant et malaxage pendant 2min.



Figure IV.18: Malaxage de béton témoin.

IV.6.1 Mesure de l'affaissement

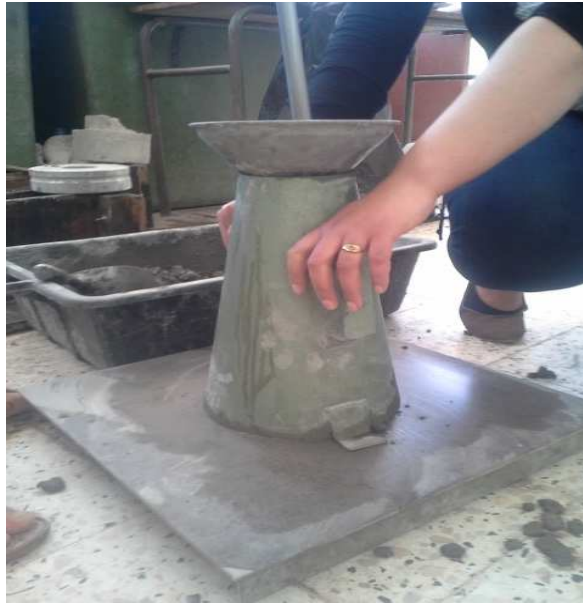


Figure IV.19: Mesure d'affaissement.

IV.6.2 Remplissage et vibration

On verse le béton ordinaire dans chacune des 09 éprouvettes qui sont ensuite mises sur une table vibrante pour une durée d'environ 20 à 30 secondes.



Figure IV.20: vibration des éprouvettes.

IV.6.3 Réalisation de béton de fibres métalliques:

L'innovation dans les sciences de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux et la maîtrise de leurs propriétés. Le béton fibré est l'un de ces matériaux.

L'incorporation des fibres métalliques se fait au malaxage des granulats. Le mélange se fait à l'état semi sec, les fibres sont incorporées une par une. Le malaxage se fait comme suit :

1. Déversement du sable, gravier et ciment dans le malaxeur et mise en marche pendant 1 mn environ jusqu'à homogénéisation,
2. Introduire les fibres d'acier une par une aléatoirement, bien malaxé jusqu'à homogénéisation .
3. Introduire de l'eau de gâchage et adjuvant, malaxage pendant 2- 4min. L'emploi de super plastifiant est en particulier recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres.

Le mélange des fibres métalliques au béton doit être particulièrement soigné, certaines fibres ayant tendance à s'agglomérer (s'entasser), créant un effet d'oursin comme le montre la (figure IV.22).



Figure IV.21: Malaxage du béton de fibres métalliques.

IV.6.4 Réalisation de béton de fibres polypropylènes :

La réalisation d'un béton avec des fibres polypropylène ne nécessite pas de précaution particulière comme pour les fibres métalliques. Elles sont ajoutées après le malaxage des granulats et de l'eau c.à.d. le mélange humide. La consistance de la matrice ne devrait être ni trop épaisse ni trop fluide, afin de garantir une dispersion et un mélange immédiat des fibres. Pour cela, il peut être utile de recourir à un mélange préliminaire avec la moitié de l'eau (y compris les plastifiants) suivi par l'introduction des fibres, le mélange et l'addition de l'eau restante.

Malaxage des fibres polypropylènes

- Déversement du sable, gravier et ciment et malaxage pendant 1 mn environ jusqu'à homogénéisation.
- Introduire de l'eau de gâchage.
- Introduire les fibres de polypropylène, prendre soin de garantir une dispersion uniforme pour améliorer la maniabilité du béton et sa cohésion.

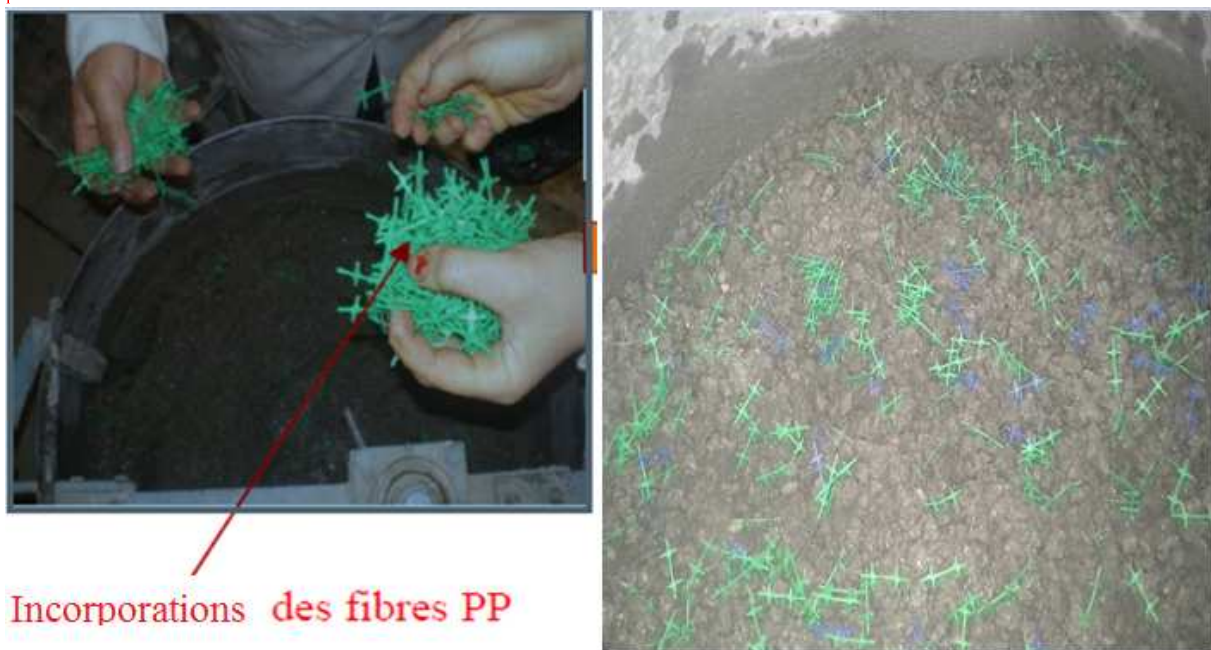


Figure IV.22: Malaxage du béton de fibres polypropylènes.

IV.6.5 Le béton de fibres association (polypropylène et métalliques)

Le malaxage du béton de fibres association (polypropylène et métalliques) se fait par les étapes suivantes

1. Déversement du sable, gravier et ciment dans le malaxeur et mise en marche pendant 1 mn environ jusqu'à homogénéisation,
2. Introduire les fibres métallique une par une aléatoire, bien malaxé jusqu'à homogénéisation.
3. Introduire de l'eau de gâchage et adjuvant, malaxage pendant 0 2min.
4. Introduire les fibres polypropylène une par une aléatoire, bien malaxé jusqu'à homogénéisation.



Figure IV.23: Malaxage du béton de fibres association (polypropylène et métalliques).

IV.7 CONSERVATION DES EPROUVETTES

a. Avant démoulage

Ceci doit se faire dans un moule muni d'un couvercle film de polyéthylène sur la face d'arasement pour éviter toute évaporation, chose qui n'est pas disponible dans nos laboratoires, on se contentera de recouvrir les éprouvettes d'une toile en plastique.

b. Le démoulage

Le démoulage se fait après 24 heures à l'aide des outils de démoulage (clés, marteaux...).



Figure IV.24: Démoulage de l'éprouvette prismatique.



Figure IV.25: Démoulage de l'éprouvette cylindrique.

IV.8 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Cycles de chauffage - refroidissement

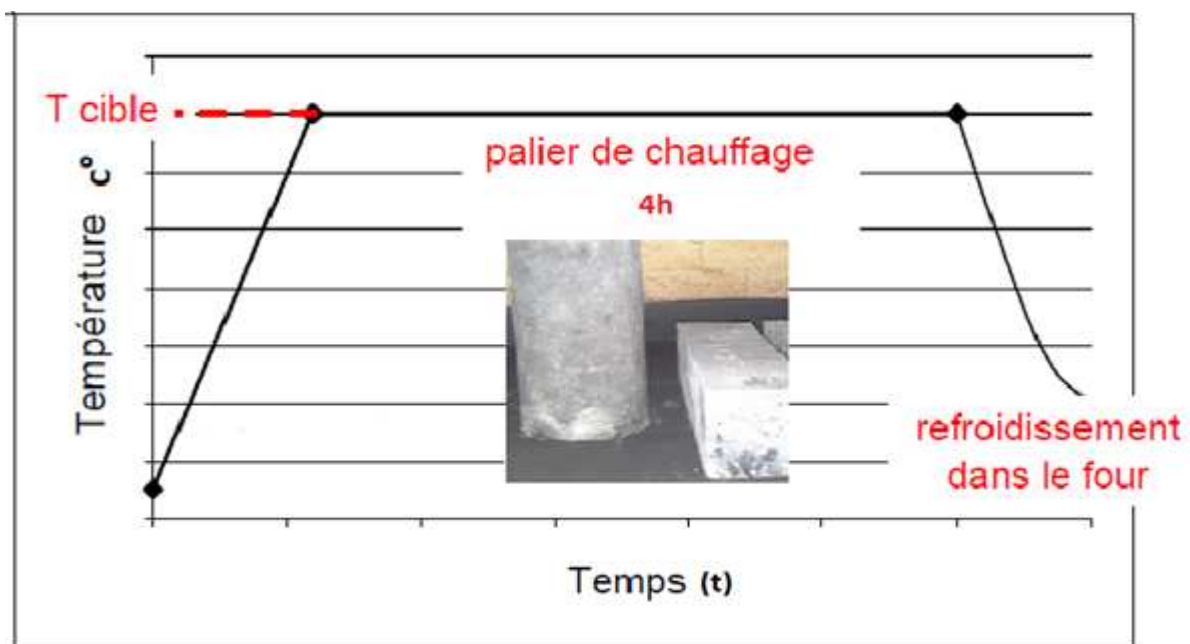


Figure IV.26 Paliers de température suivant le comportement de la matrice cimentaire et des différentes fibres.

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

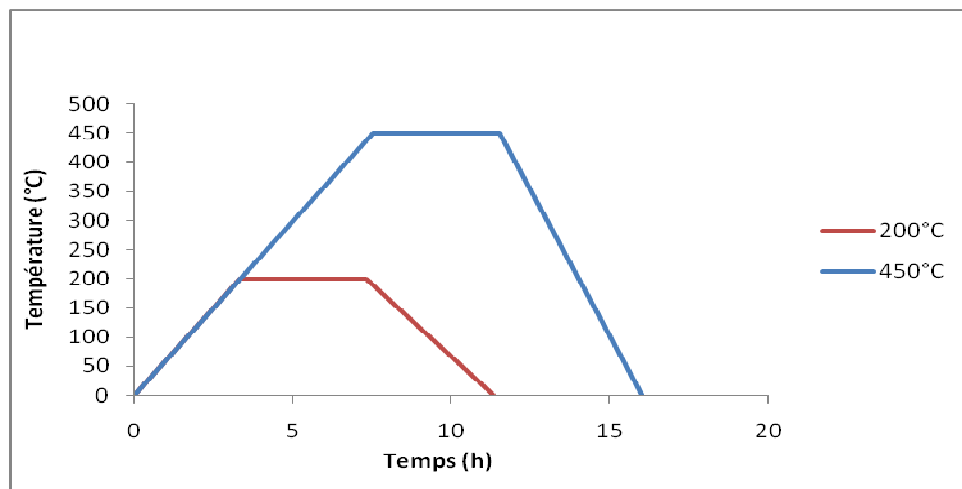


Figure IV.27: Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes.

Les éprouvettes sont disposées dans le four de façon à ce que la chaleur se répartisse d'une manière homogène. Cette répartition de chaleur est faite grâce au système de ventilation du four. Le pilotage du four est réalisé à l'aide d'un régulateur programmeur auquel sont reliés les thermocouples.



Figure IV.28: Four électrique.



Figure IV.29: Dispositif de chauffage et disposition des éprouvettes dans le four.

IV.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette avec leurs caractéristiques, la formulation des différents mélanges. Deux paramètres ont été variés (le type de béton, la température).

On a mentionné aussi l'identification et la caractérisation des différents matériaux utilisés dans notre recherche. Nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette recherche: le choix de corps d'épreuve.

V.1 INTRODUCTION

Ce chapitre sera consacré à présenter et interpréter les résultats expérimentaux relative aux béton témoin et béton de fibres (polypropylène et métalliques), obtenus lors des essais de compression(éprouvettes cylindriques) et de traction par flexion trois points(prismes), Ainsi que l'étude de l'influence de ces fibres sur le comportement mécanique de ces bétons porté à des températures élevées .

FORMULATIONS

Plusieurs formulations de béton ont ainsi été confectionnées, pour lesquelles le volume de pâte reste constant. Nous avons au total quatre familles de béton:

- BT: béton sans fibres,
- BFPP : béton avec des fibres de polypropylène (0.3%),
- BFM: béton avec des fibres métalliques (1%),
- BFMPP: les bétons avec une association de fibres de polypropylène et métalliques (0.15%FPP et 0.5%FM).

V.2 MESURE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Les différentes propriétés mécaniques étudiées sont : la résistance en compression et la résistance en traction par flexion. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes non chauffées et sur des éprouvettes ayant subi un traitement thermique. Les essais permettent d'étudier le comportement mécanique du béton porté à une température élevée. Les essais de résistances sont réalisés sur trois éprouvettes pour chaque cycle de chauffage- refroidissement.

V.3.1 Essai de compression uni axiale

Les essais sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques 10x20 cm³ pour tous les cycles de chauffage. Les extrémités des éprouvettes sont rectifiées par surfaçage au souffre conformément à la norme NF EN 12390-324 [Afnor, 2003]. 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 V.1). 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 V.1 presse hydraulique AUTO TEST.

➤ La vitesse de déformation ou de chargement

La vitesse de déformation ou de chargement est le principal facteur qui influe sur la manière dont le matériau répond à la sollicitation. Pour les essais de compression et de traction par flexion, la vitesse de chargement adoptée est égale à 0.5 MPa/s.

V.3.2 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 V.2). 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 (supérieurs et inférieurs) 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:

$$\sigma_t = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

Avec :

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

l : distance entre axe d'appuis, $l = 180 \text{ mm}$

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

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

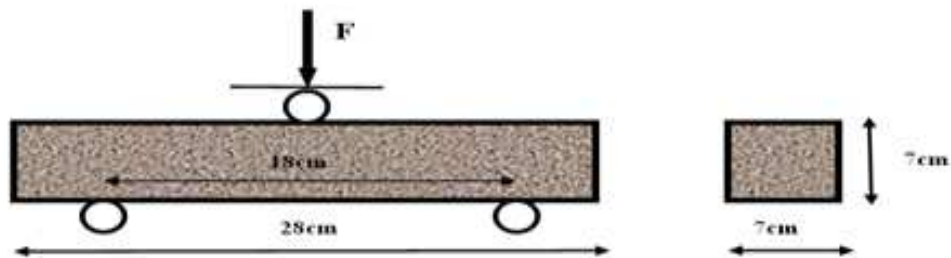


Figure V.2: Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.

V.3 COMPORTEMENT DES BETONS A LA COMPRESSION

La figure (V.3) présente l'état des éprouvettes après les cycles chauffages-refroidissements.

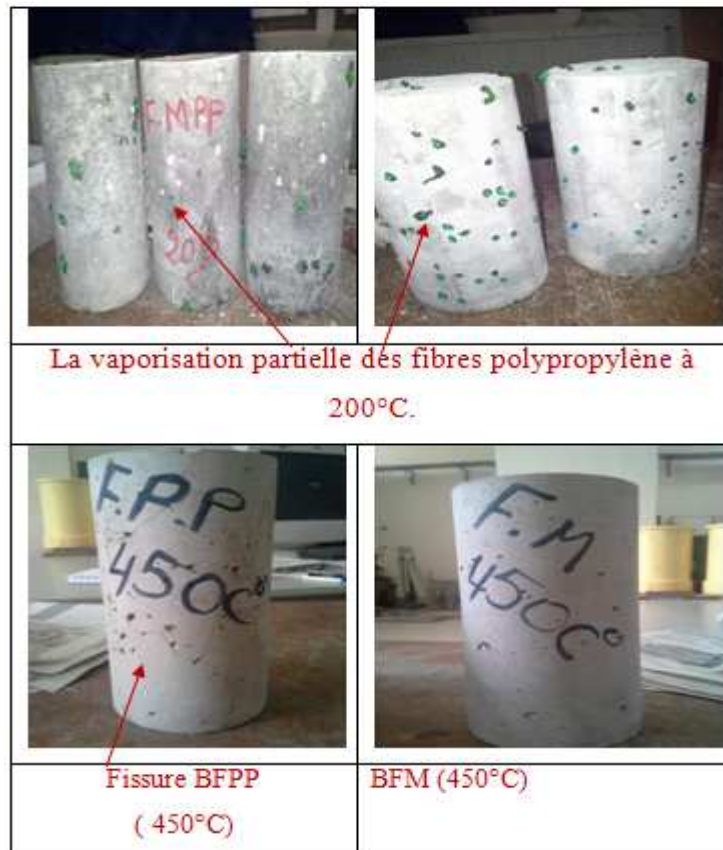


Figure V.3: Les éprouvettes cylindriques après cycles chauffages-refroidissements.

V.4.1 Résistance à la compression du béton témoin (BT) à différents températures.

Les résistances mécaniques de ces éprouvettes ont été obtenues par le calcul de la moyenne des résistances (à 28 jours) des trois éprouvettes cylindriques de béton témoin sans fibres ($20 \pm 2^\circ\text{C}$). Les résistances et les déformations sont données dans le tableau (V.1). La courbe contrainte-déformation est donnée en figure (V.4).

Tableau V.1: Béton témoin sans fibres.

force (kN)	$\Delta L \times 10^{-3}$ (mm)	$\varepsilon_L \times 10^{-3}$	σ (MPa)
0	0	0	0
20	4	0,02	2,5
40	130	0,65	5,1
60	235	1,175	7,6
80	350	1,75	10,1
100	430	2,15	12,7
120	525	2,625	15,2
140	607	3,035	17,7
160	710	3,55	20,3
180	820	4,1	22,8
200	985	4,925	25,3
220	1125	5,625	27,8
240	1330	6,65	30,4
260	1500	7,5	30,95

Où:

ΔL : déplacement longitudinal en mm,

ε_L : déformation longitudinale, $\varepsilon_L = \Delta L / L$ avec $L = 200$ mm

σ : $= F/S$, contrainte en MPa,

F : force en kN,

S : section géométrique du cylindre en mm^2 ,

$S = \pi D^2 / 4 = 3.14 \times 100^2 / 4 = 7900 \text{ mm}^2$

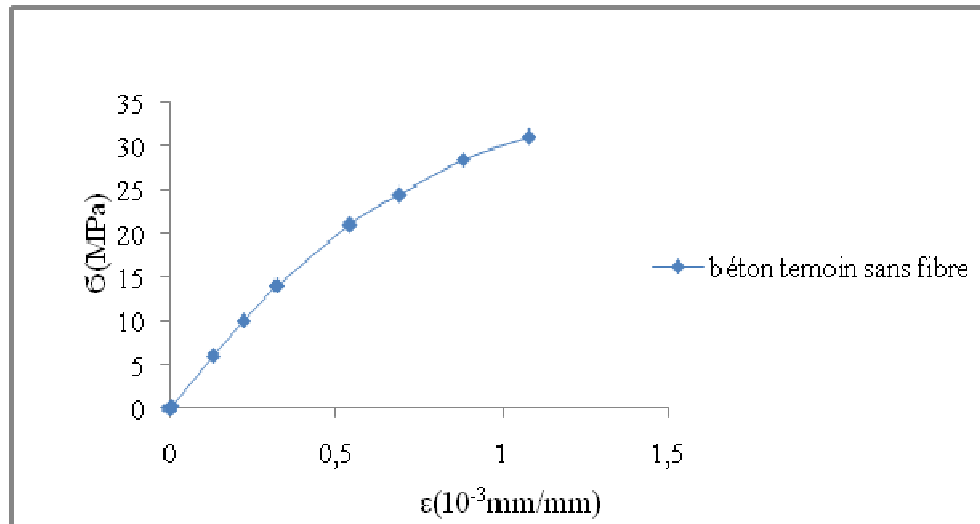


Figure V.4: Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 20°C.

Le comportement de la courbe contrainte-déformation du béton témoin en compression est caractérisé par les phases suivantes :

- une partie linéaire avant fissuration du béton, située entre 0 et environ 30% de la résistance maximale du béton i.e. jusqu'à 10 MPa et donc une déformation entre 0 et environ 0,26, le matériau dans cette phase étant considéré comme sain, c'est à dire non endommagé, celui-ci est régi par la loi de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$).
- Une partie courbée, au delà de 10 MPa et jusqu'à la rupture (30,95 MPa): au cours de cette phase, le béton se fissure au fur et à mesure de l'application du chargement, les microfissures passant de microscopiques à macroscopiques, engendrant un endommagement de plus en plus important ainsi qu'une perte de rigidité menant à la rupture totale du matériau.

Les courbes contraintes-déformations du béton témoin à différentes températures sont données en figure (V.5).

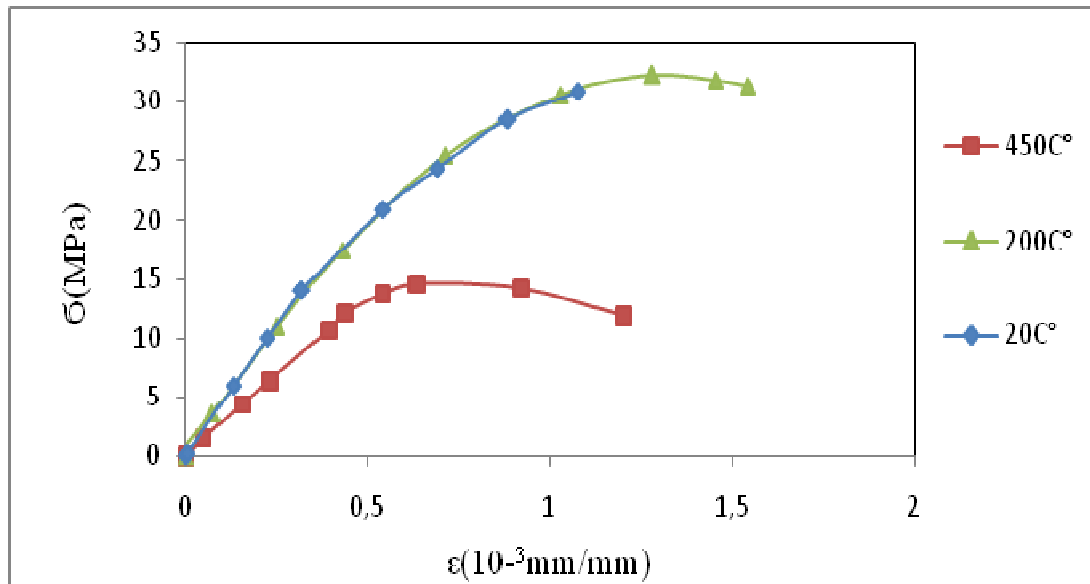


Figure V.5: Courbes contraintes-déformations du béton témoin (BT) à différentes températures.

La résistance à la compression du béton témoin à différentes températures est caractérisée par:

- à 20°C, $f_{c28} = 30.95\text{MPa}$, pour $\epsilon = 1.1$.
- à 200°C, une résistance mécanique ultime supérieure à celle remarqué à 20°C, et une partie adoucissante entre $\epsilon = 1.1$ et $\epsilon = 1.5$ rupture ductile.
- à 450°C, longue partie ductile jusqu'à $\epsilon = 1.2$ et diminution de la résistance: $f_{c28} = 14.25\text{ MPa}$ pour $\epsilon = 0.6$.

V.4.2 Résistance à la compression du béton de fibre métallique (BFM) à différentes températures.

Les courbes contraintes-déformations du béton de fibres métalliques à différentes températures sont données en figure (V.6).

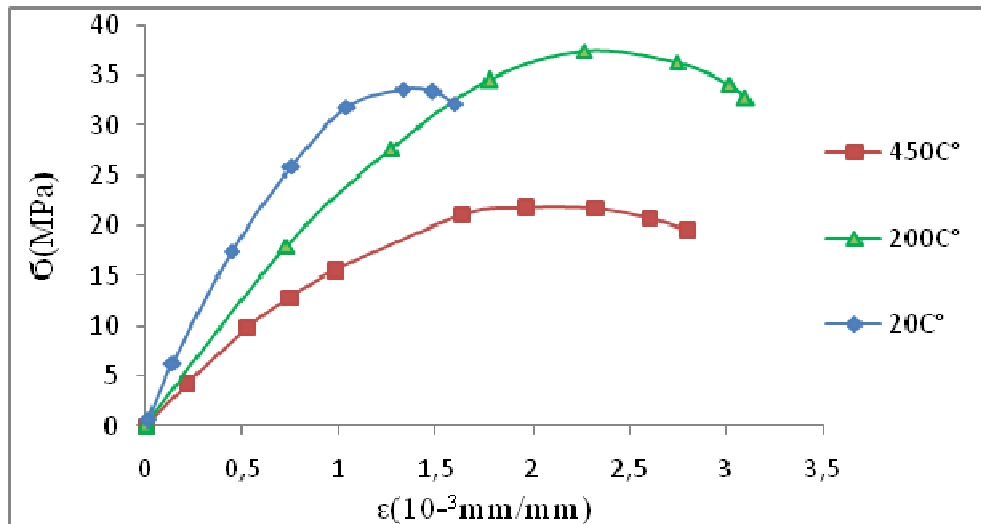


Figure V.6: Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres métalliques (BFM) à différentes températures.

- à 20°C rigidité importante, on remarque sur cette courbe, la présence une partie élastique, et un palier plastique non conséquent.
- à 200°C et 450°C une amélioration de la déformabilité à environ 2 mm/mm, on remarque une augmentation de la résistance maximal à 200°C (37.4 MPa) et une diminution de la résistance (21.82MPa) à 450°C.

V.4.3 Résistance à la compression du béton de fibres polypropylène (BFPP) à différentes températures.

La figure (V.7) présente les courbes contraintes-déformations des bétons de fibres de polypropylène à différentes températures.

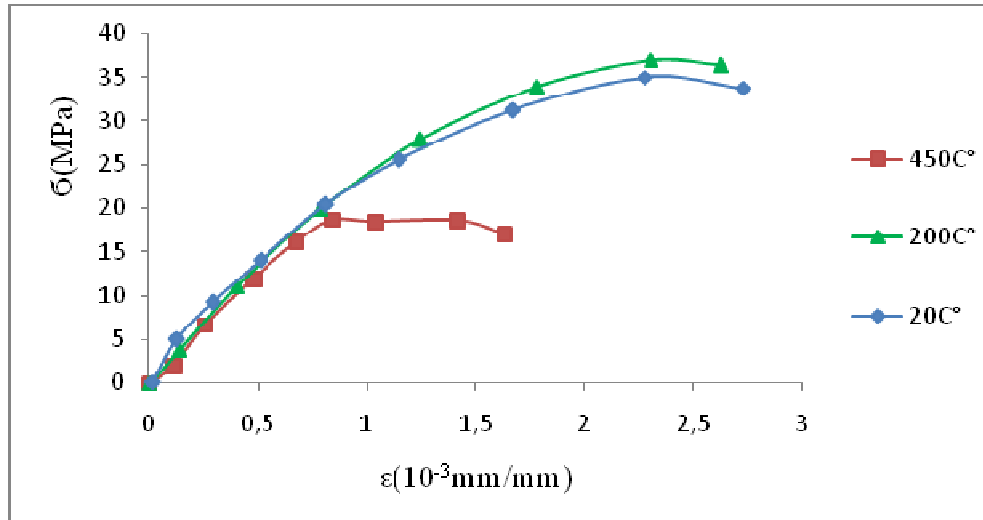


Figure V.7: Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres de polypropylène (BFPP) à différentes températures.

Les courbes de cette figure ont la même allure, une augmentation de résistance à 200°C d'environ 4% x f_{c28} , dû certainement à l'effet de couture des fissures des fibres PP. A 450°C, il y'a une réduction de la résistance maximale d'environ 41.71% par rapport au béton témoin. On remarque un certain palier stable caractérisant la partie ductile de la courbe, à partir de 0.78 mm/mm.

V.4.4 Résistance à la compression du béton avec association fibres métalliques-polypropylènes (BFMPP) à différentes températures.

La figure (V.8) présente les courbes contraintes-déformations des bétons avec association fibres métalliques-polypropylènes à différentes températures.

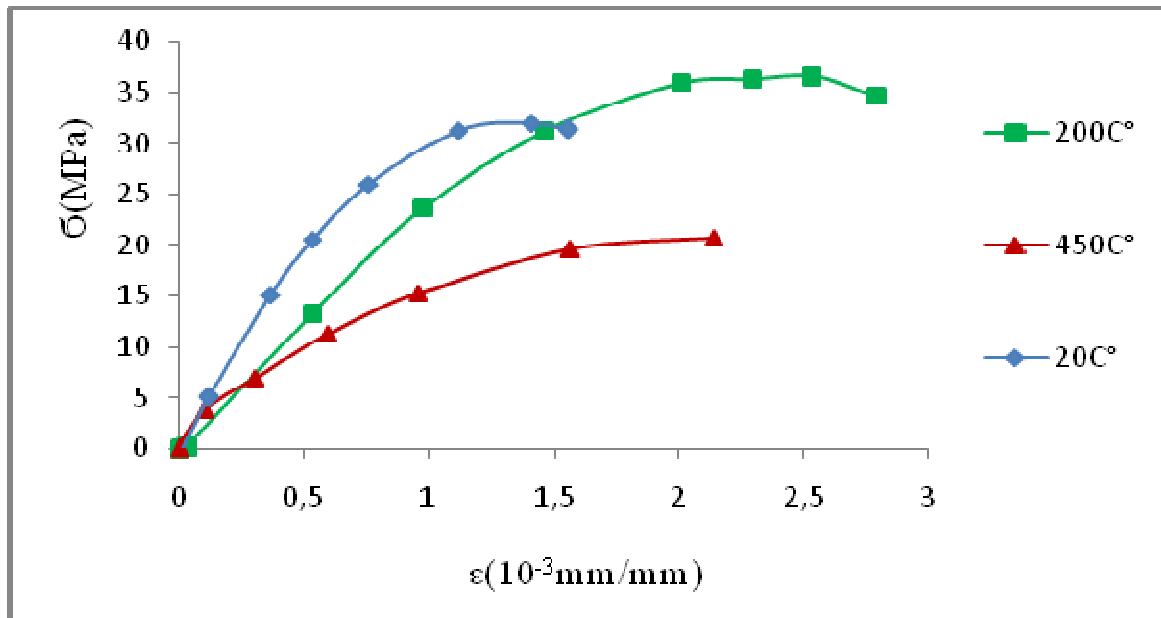


Figure V.8: Courbes contraintes-déformations des bétons avec association fibres métalliques-polypropylènes (BFMPP) à différents températures.

- à 20°C forte rigidité, on remarque sur cette courbe, la présence d'une partie élastique seulement —→ rupture fragile.
- à 200°C et 450°C, on remarque une amélioration de la déformabilité d'environ 2mm/mm, on remarque aussi une augmentation de la résistance maximale à 200°C (36.3MPa) et une diminution de la résistance à 450°C d'environ (45.89%).

V.4.5 Comparaison entre les différents bétons à 20°C

Les courbes contraintes-déformation des différents bétons à 20°C sont données en figure (V.9).

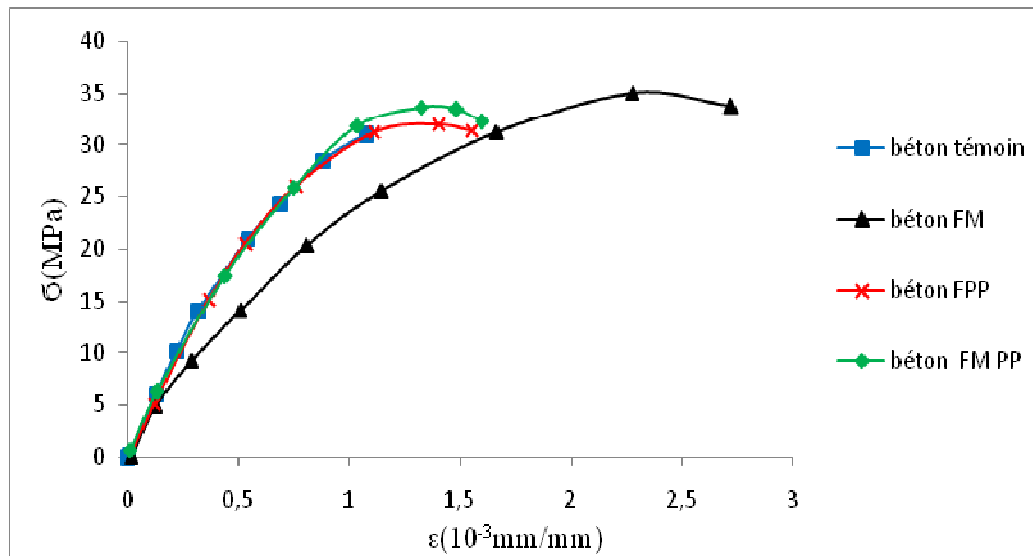


Figure V.9: Superposition des courbes contraintes-déformation des différents bétons à 20°C.

A partir de cette figure, nous remarquons que les allures de ces différentes courbes contrainte-déformation sont presque identiques mais on remarque que les BFM, BFPP et BFMPP donne de meilleurs résultats par rapport au BT, les résistances ont augmenté de : (4.40% pour les BFPP, 10.65% pour les BFM et 7.62% pour les BFMPP) ils ont les mêmes allures pour le même comportement. Les valeurs de résistances sont données en figure (V.10). La courbe de BFM à une allure différente, partie élastique très importante, résistance max (35 MPa) la plus élevée des bétons testés à 20°C et elle présente une pente légèrement inférieure par rapport aux courbes des autres bétons (BT, BFPP et BFMPP).

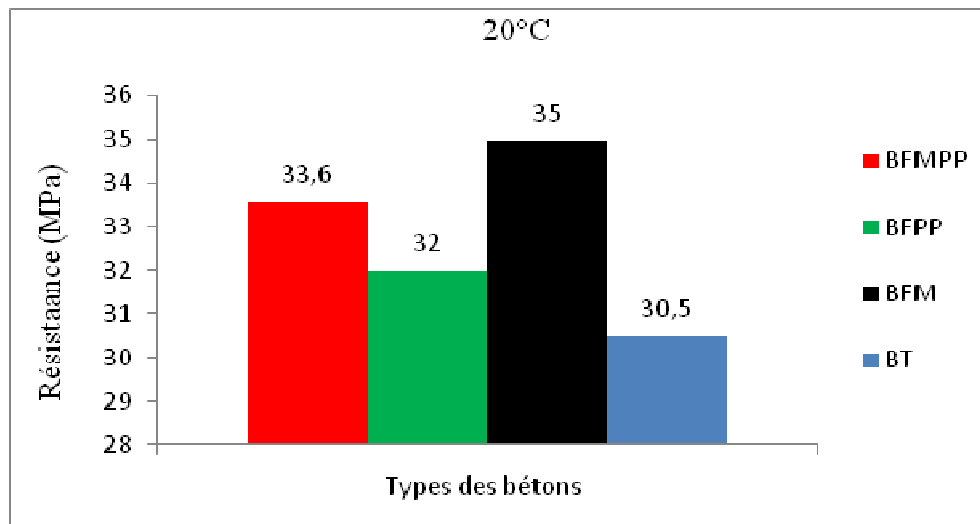


Figure V.10: Résistances des différents bétons à 20°C.

V.4.6 Comparaison entre les différents bétons à 200°C

Les courbes contraintes-déformation des différents bétons à 200°C sont données en figure (V.11).

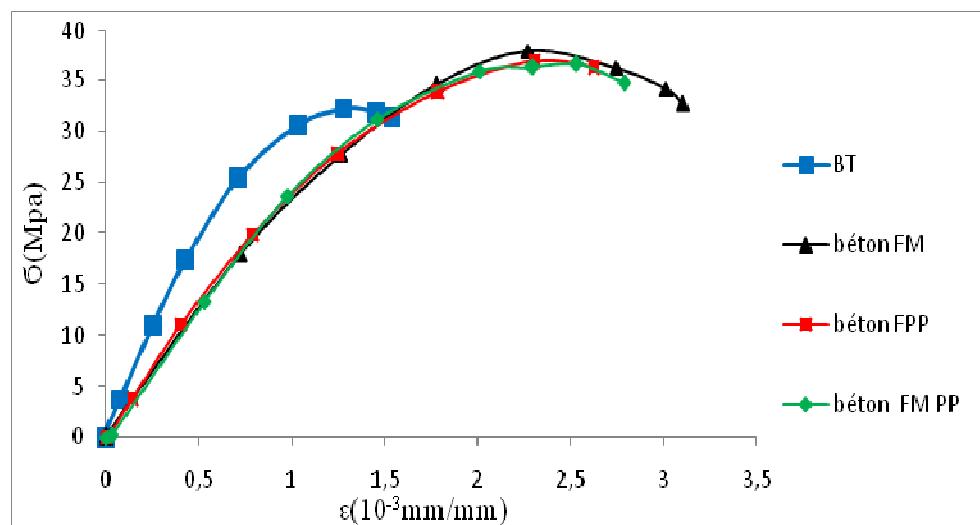


Figure V.11: Superposition des courbes contraintes-déformations des différents bétons à 200°C.

D'après les essais de compression à 200°C, on remarque que les courbes ont presque les mêmes allures. Le béton témoin a atteint une contrainte maximale de 32.26 MPa. Concernant les bétons fibrés, nous remarquons une amélioration de la résistance, celle-ci étant de 14.38% pour BFPP, de 17.48% pour BFM et de 12.52% pour BFMPP. Le traitement

thermique à 200°C nous a donné une meilleure résistance pour les différents bétons fibrés voir figure (V.12). Par contre la pente de leurs courbes est inférieure à celle du béton témoin.

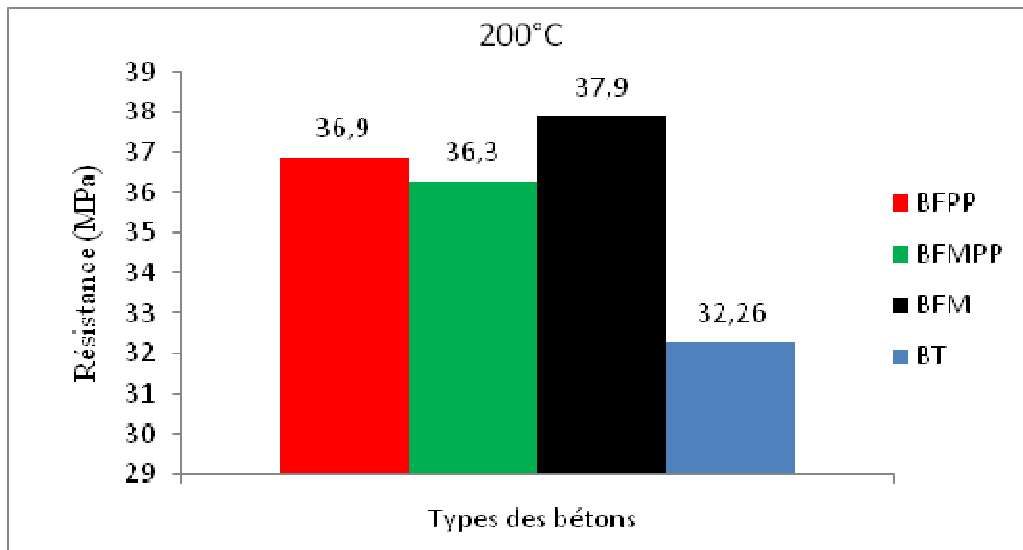


Figure V.12: Résistance en compression des différents bétons à 200°C.

V.4.7 Comparaison entre les différents bétons à 450°C

Les courbes contraintes-déformation des différents bétons à 450°C sont données en figure (V.13).

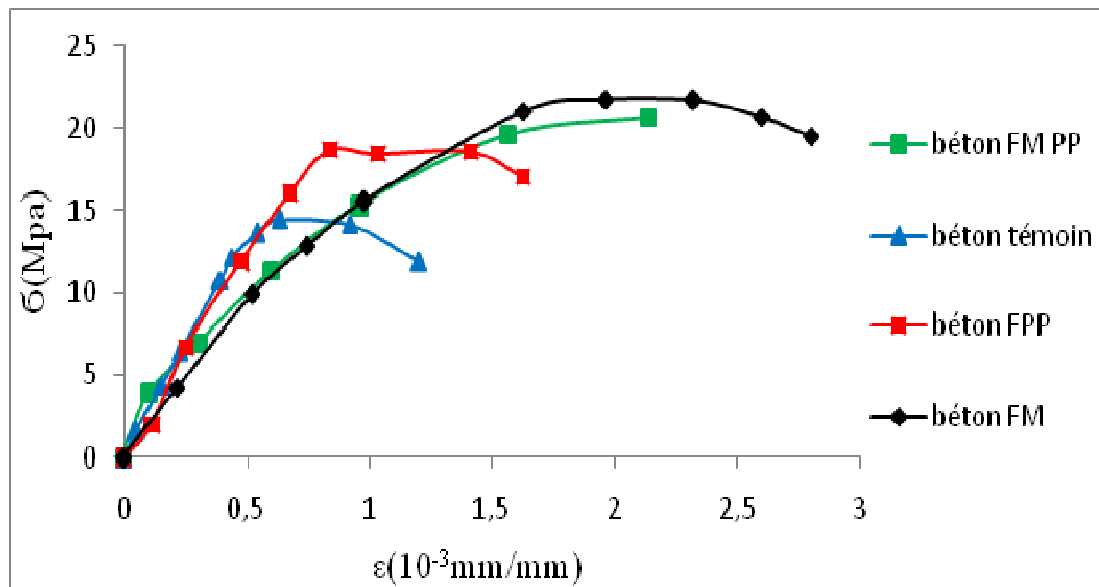


Figure V.13: Superposition des courbes contraintes-déformations des différents bétons à 450°C.

Le même comportement est observé dans la figure V.13, si on analyse le comportement des bétons de fibres par rapport au béton témoin. On remarque une augmentation de la résistance de 27.5% pour BFPP, 62.5% pour BFM et 34.31% pour BFMPP par rapport au béton témoin. La courbe de béton de fibres métalliques (BFM) présente une résistance maximale de 21.82MPa, c'est la meilleure résistance de tous les bétons. La courbe BFPP présente la même pente que la courbe de béton témoin en termes de résistance, elle est plus importante. La courbe de BFMPP se caractérise par la présence d'une partie élastique seulement.

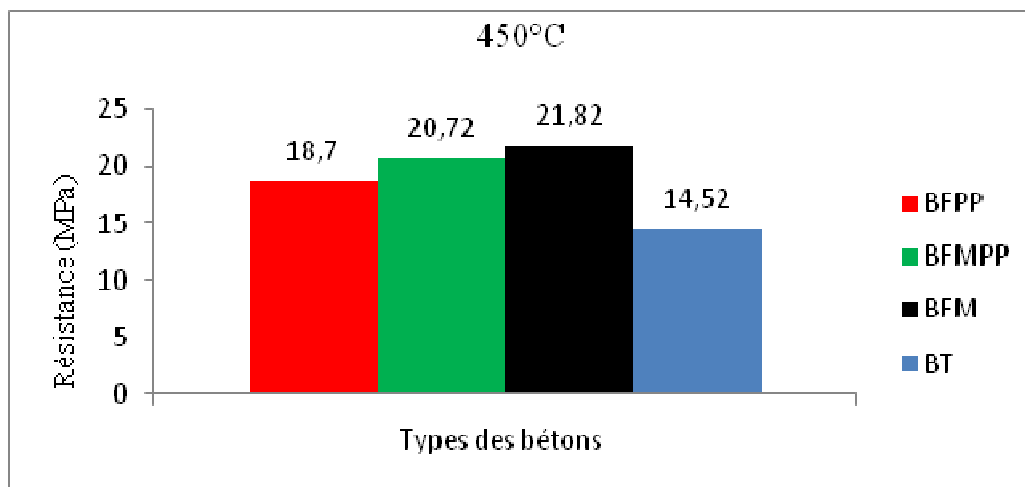


Figure V.14: Résistance en compression des différents bétons à 450°C.

La variation des résistances en compression des différents bétons à différentes températures est donnée en la figure V.15.

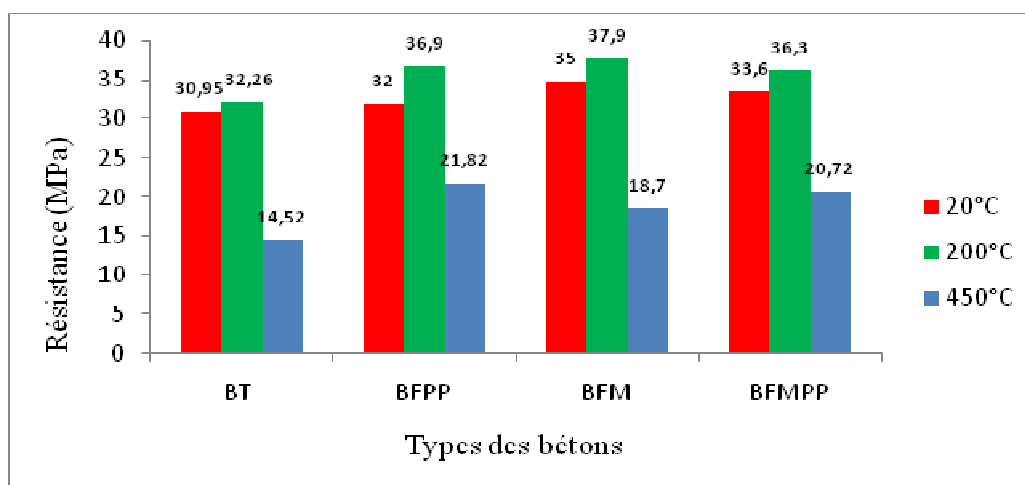


Figure V.15: Variation des résistances en compression des différents bétons à différentes températures.

Le traitement thermique à 200°C apporte une amélioration au niveau des caractéristiques mécaniques des bétons utilisés et quelque soit le type de béton i.e. BT, BFM, BFPP et BFMPP. Par contre à 450°C, nous remarquons une chute très importante des résistances mécaniques (46.57% pour BFM, 31.81% pour BFP, 38.33% BFMPP et 53% pour BT).

V.4.8 Mode de rupture des éprouvettes cylindriques

Le mode de rupture des différentes éprouvettes est donné en figure (V.16).



Figure V.16: Rupture des éprouvettes cylindriques sous sollicitation de compression.

Conclusion

En ajoutant des fibres au béton, on obtient une amélioration des caractéristiques mécaniques de ce matériau. D'une manière générale il ressort à partir de tous les essais de compression simple réalisés sur les éprouvettes cylindriques (10x20) cm³, que l'incorporation des fibres polypropylènes et métalliques et association fibres métalliques-polypropylènes à hautes températures a permis d'obtenir de meilleures résistances mécaniques à la compression comparativement au béton témoin.

V.5 ESSAI DE CARACTÉRISATION DES FIBRES

Le mode de l'essai de traction direct sur les fibres est représenté sur la figure (V.17).

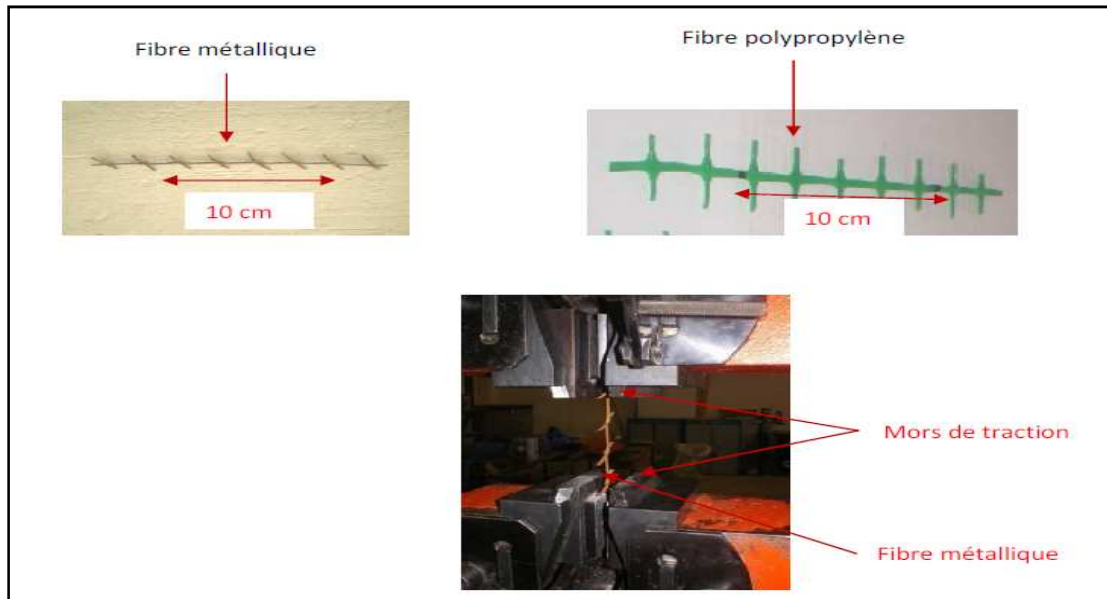


Figure V.17: Essai de traction direct sur les fibres.

Les résultats obtenus de l'essai de traction directe sur les fibres polypropylènes et métalliques sont présentés dans le tableau (V.2).

Tableau V.2: Les résultats obtenus de l'essai de traction directe sur les fibres polypropylène et métalliques.

Types de fibres	Resistance (MPa)	Force (KN)	Course (mm)	Temps (S)	déformation	Module de Young (N /m ²)
Fibres polypropylènes	24.9	0.05	27.15	88	0.27	9,26 x10 ⁶
Fibres métalliques	440	0.9	15.43	72	0.15	30 x10 ⁶

V.5.1 Comparaison de résistance entre les fibres de polypropylènes et métalliques

Les résistances à la traction directe des fibres utilisées sont données en figure (V.18).

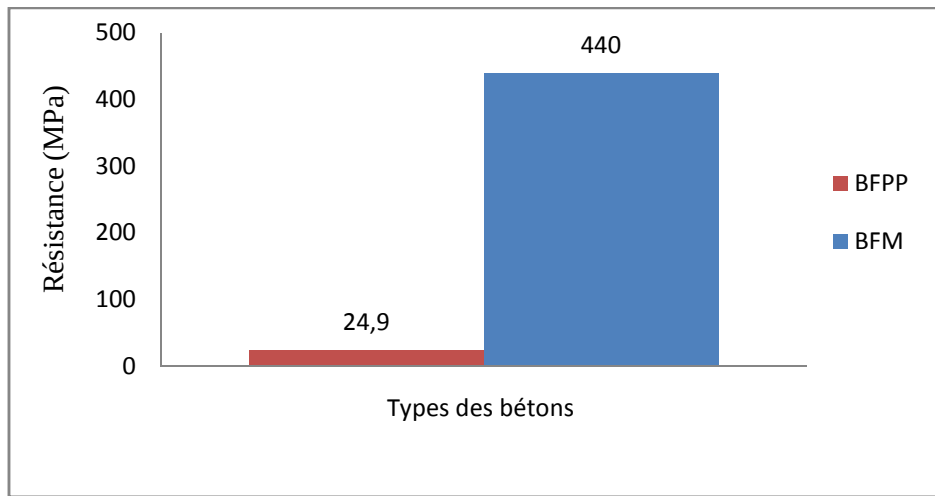


Figure V.18: Évaluation de la résistance à la traction directe des différentes fibres.

D'après la figure V.18, on constate que les fibres métalliques présentent une valeur de résistance à la traction très élevées par rapport aux fibres polypropylènes. En effet, la valeur de la résistance maximale des fibres métalliques est de l'ordre de 440 MPa elle est supérieure à la résistance des fibres polypropylènes qui est de l'ordre de 94,4 %.

V.6 ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION TROIS POINTS

L'amélioration de la résistance à la traction par flexion trois points est le premier objectif recherché par l'incorporation de fibres dans les bétons à différentes températures. Cet essai consiste à soumettre une éprouvette de géométrie standardisée prismatique de dimension $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ à un chargement à vitesse constante. On mesure la force appliquée F , soit jusqu'à la rupture, soit jusqu'à une force ou une déformation déterminée. La rupture a lieu dès l'apparition de la première fissure (Figure V.19).

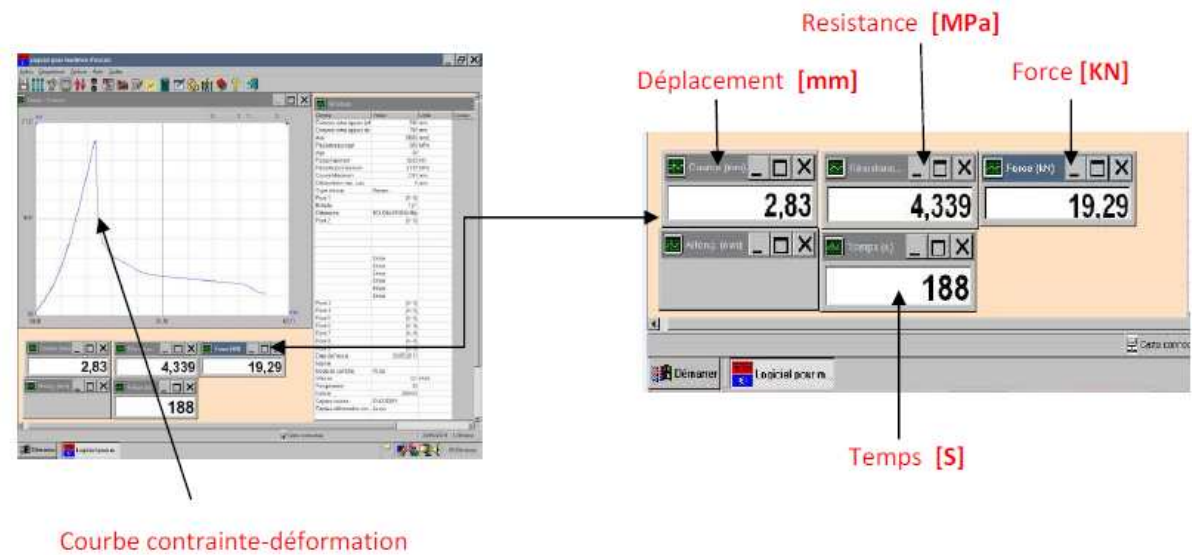


Figure V.19: Résultats de l'essai de traction par flexion trois points.

Les différentes valeurs de déplacement et de force appliquées à l'éprouvette sont données dans le tableau (V.3).

Tableau V.3: Résistances en traction par flexion des différents bétons.

Type de béton	Température (°C)	Déplacement (mm)	Force (kN)
Béton témoin	20	0.43	7.64
	200	0.33	5.66
	450	0.42	2.36
Béton fibre polypropylène	20	2.5	12.6
	200	0.44	6.31
	450	0.61	2.43
Béton fibre métallique	20	1.12	14.8
	200	0.25	7.40
	450	0.44	2.73
Béton fibre métallique-polypropylène	20	1.43	12.1
	200	1.83	6.3
	450	0.32	2.5

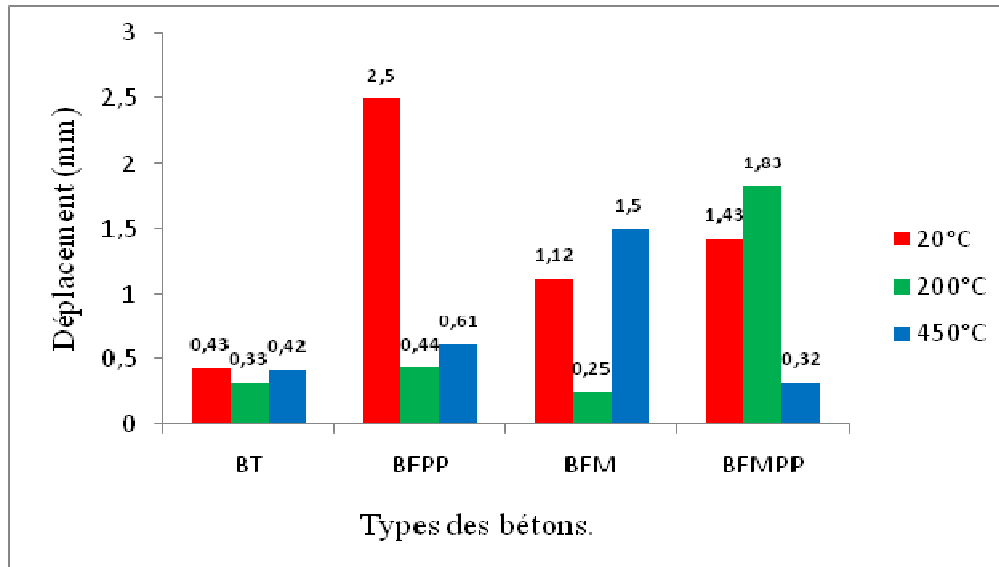


Figure V.20: Évaluation des déplacements pour les différents bétons à différentes températures.

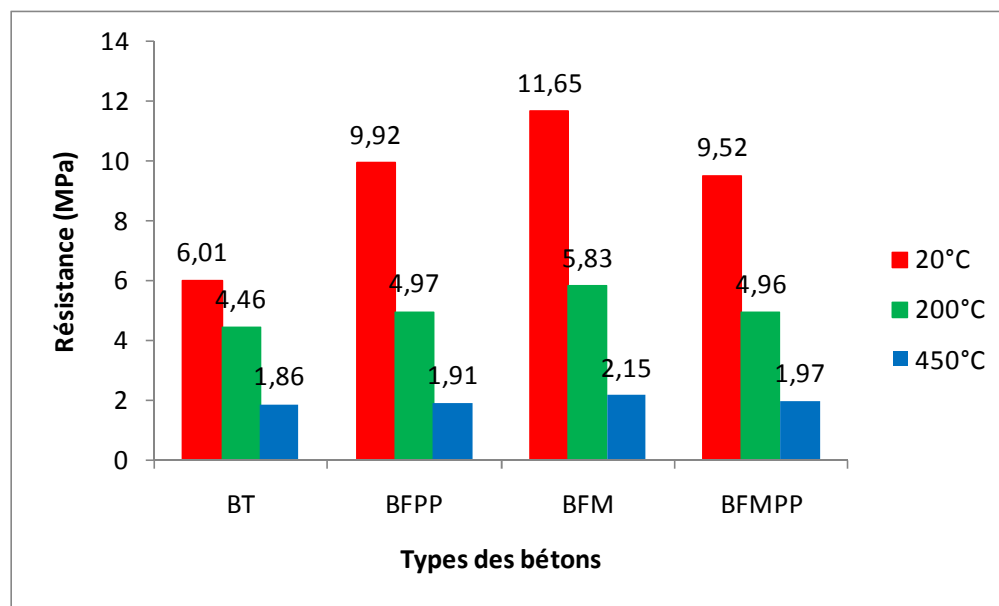


Figure V.21: Résistance en flexion des bétons à différentes températures.

En augmentant la température les résistances ont chuté de (25% à 200°C et 69% à 450°C) pour le béton témoin (BT) (50% à 200°C et 80% à 450°) pour BFPP ,(50% à 200°C et 95% à 450°C) pour BFM et (47.90% à 200°C et 79.30% à 450°C) BFMPP. Les bétons de fibres métalliques ont donné les meilleures résistances par rapport aux autres bétons.

V.6.1 Résistance à la traction du béton témoin (BT) à différentes températures.

Les résultats des essais sur éprouvettes en béton témoin (BT) (sans fibres) à différentes températures sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure (V.22).

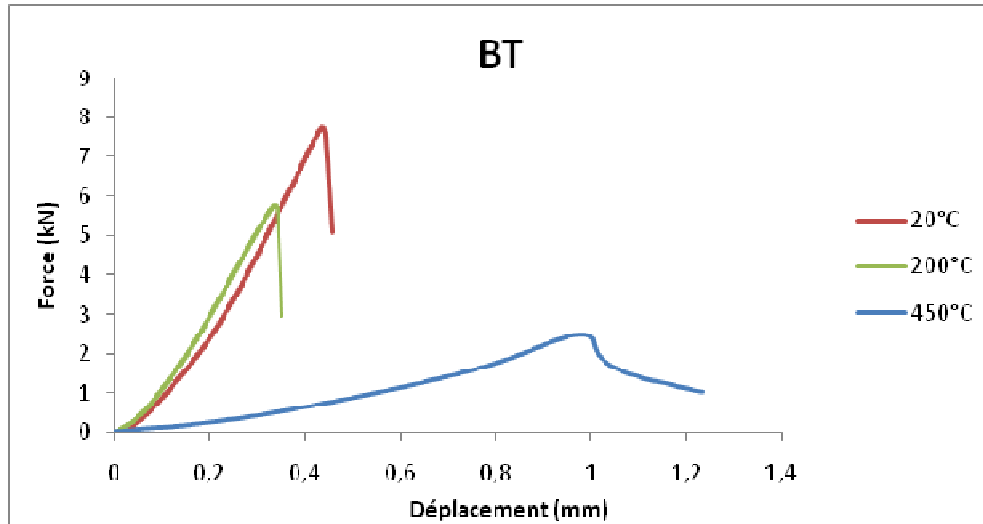


Figure V.22: Courbes Force-déplacement du béton témoin (BT) à différentes températures.

La courbe force-déplacement du béton sans fibres (béton témoin) est caractérisée dans le cas 20°C par deux phases distinctes : une première phase ascendante pratiquement linéaire, qui évolue jusqu'à atteindre une course d'environ 0,44 mm, équivalent à une force ultime de 7,64 kN. Une seconde phase se caractérisant par une chute brutale de la résistance qui correspond à l'apparition des premières fissures (rupture fragile). Une même allure de courbe est observée dans le cas du béton soumis à 200°C, avec par contre une résistance ultime mesurée de 5,70 kN pour 0,33 mm de course. Pour le béton traité à 450°C, la première phase se caractérise par un profil pas tout à fait linéaire atteignant une valeur de résistance ultime est de 2,49 kN correspondant à 1 mm de déplacement. Une deuxième phase adoucissante cette-fois est notée après le point de résistance ultime.

V.6.2 Résistance à la traction du béton de fibres de polypropylène (BFPP) à différentes températures.

Les résultats des essais sur éprouvettes en béton de fibres de polypropylène (BFPP) sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure (V.23).

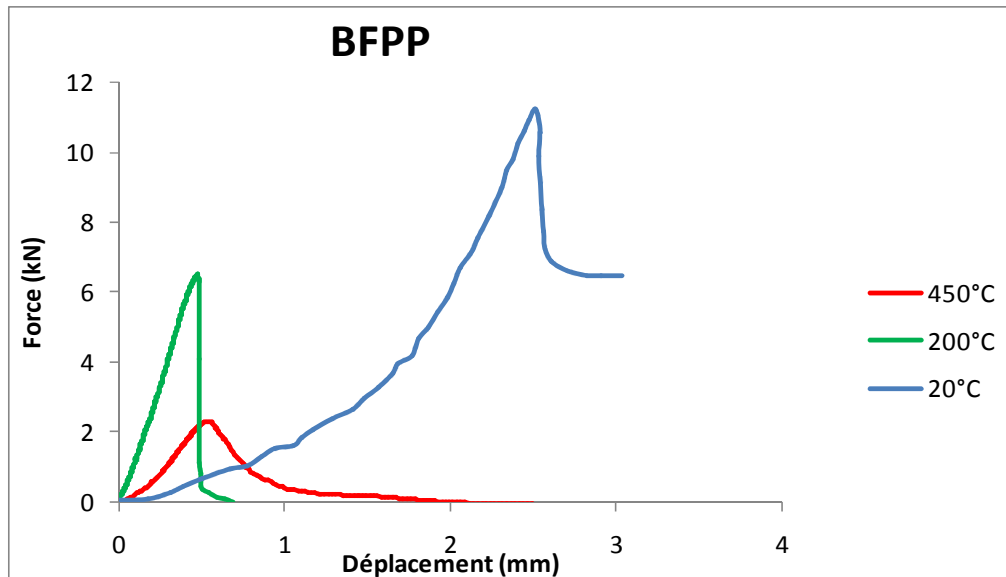


Figure V.23: Courbes Force-déplacement du béton de fibre de polypropylène (BFPP) à différentes températures.

On peut diviser le comportement des bétons (BFPP) à 20°C en trois parties.

- Une partie courbée pratiquement linéaire avant fissuration du béton de fibres (BFPP), qui est comparable au béton témoin BT (sans fibres), avec un déplacement de l'ordre 2.5 mm à 20°C, de 0.42 mm à 200°C et de 0.66 mm à 450°C, qui aboutit au pic d'effort d'intensité de (12.6kN pour 20°C, 6.31kN pour 200°C et 2.43kN pour 450°C), correspondant à l'apparition de la fissuration en dommageable du matériau.
- Une partie descendante linéaire, dans laquelle l'effort de traction diminue rapidement à partir des valeurs maximales présentées précédemment (rupture fragile du matériau béton).
- Une partie stable, dans laquelle l'effort de traction est pratiquement stable, cela correspond à l'élargissement des fissures. A ce moment, les fibres se mettent en tension, car les efforts du béton leur sont transmis par leur adhérence. Pour les bétons soumis aux températures de 200°C et 450°C, nous remarquons la perte plus ou moins importante des résistances mécaniques du matériau selon la température appliquée, la

chute subie étant la plus importante dans le cas d'une température de 450°C, cela est dû à l'endommagement d'une part thermique du matériau, et d'autre part, à la dégradation des fibres PP, au fil du chauffage.

V.6.3 Résistance à la traction du béton de fibres métalliques (BFM) à différentes températures.

Les résultats des essais sur éprouvettes en béton fibre métallique (BFM) sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure (V.24).

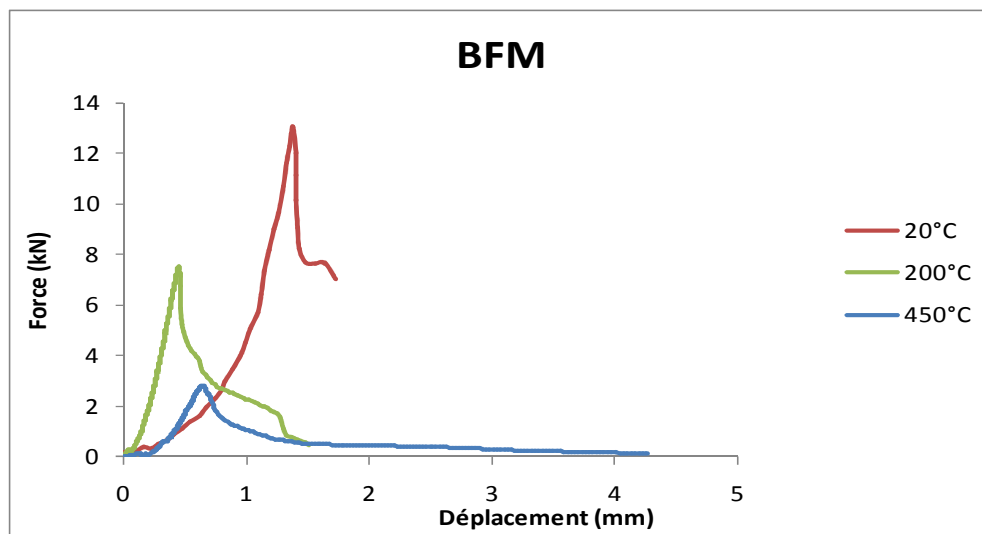


Figure V.24: Courbes Force-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM) à différentes températures.

L'allure de la courbe force-déformation du béton de fibres (1% de fibres métalliques) à 20°C ne diffère pas significativement de celle du béton des fibres de polypropylènes, la différence se situe au niveau de la valeur au pic d'effort, qui est de l'ordre de 13.8 kN correspondant à un déplacement de 1.12 mm. Pour les bétons soumis aux températures de 200°C et 450°C, nous remarquons la perte plus ou moins importante des résistances mécaniques du matériau selon la température appliquée. Le déplacement le plus important est donné par le béton traité à 450°C, il est de l'ordre de 1.5 mm. Au delà de cette dernière une déformabilité importante est observée pour ce modèle, il atteint un déplacement de 4.2 mm.

V.6.4 Résistance à la traction du béton de fibres avec association fibres métalliques-polypropylène (BFMPP) à différents températures.

Les résultats des essais sur les éprouvettes en béton avec association fibres métalliques-polypropylène (BFMPP) sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure (V.25).

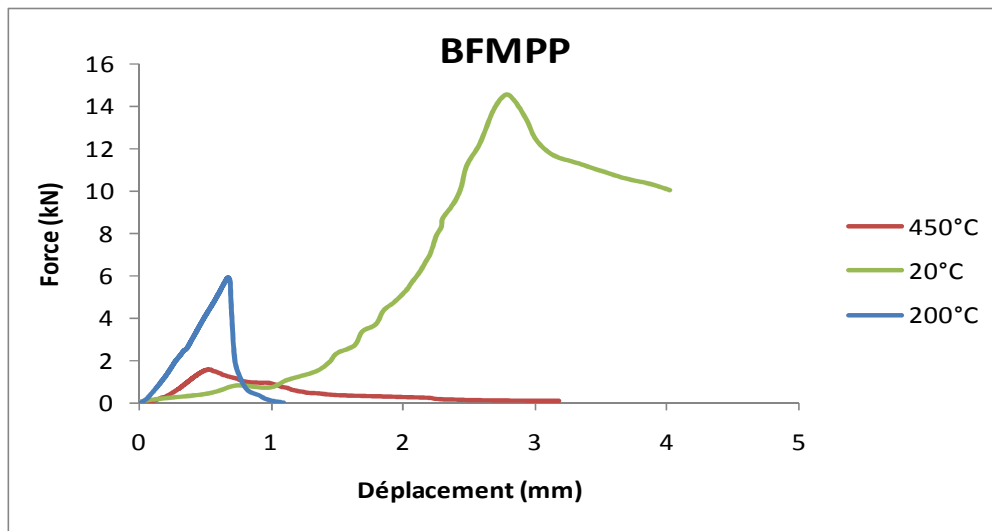


Figure V.25: Courbes Force-déplacement de BFMPP à différentes température.

On constate que pour le béton avec association de fibres métalliques-polypropylène (BFMPP), la capacité de résistance à l'effort appliqué est largement supérieure à celle du béton témoin BT (sans fibres), cela s'explique par l'apport en termes de résistance des fibres dans le béton, permettant de ralentir la propagation des fissures, offrant ainsi une certaine amélioration du comportement du béton en traction. Cette résistance à la traction diminue avec l'augmentation des températures.

V.6.5 Comparaison entre les différents bétons à 20°C

Les courbes forces-déplacements en flexion des différents bétons à 20°C sont données en figure (V.26).

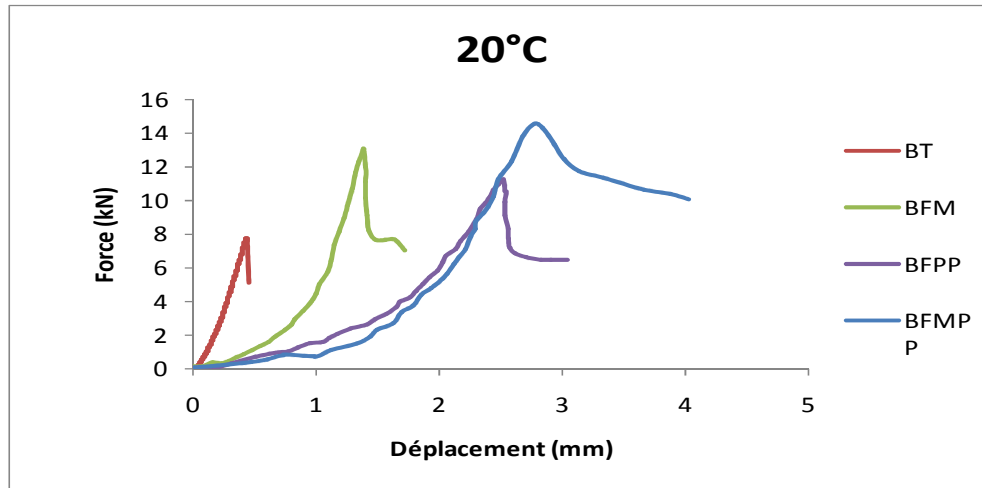


Figure V.26: Courbes force-déplacement des différents bétons à 20°C.

On constate que pour le béton de fibres (BFPP, BFM, BFMP) la capacité de résistance à l'efforts appliquée est largement supérieure à celle du béton témoin (sans fibres), cela s'explique par la présence des fibres dans le béton qui permettent de ralentir la propagation des fissures en retenant les deux blocs de béton fissuré, offrant ainsi une amélioration du comportement du béton en traction à la température 20°C.

V.6.6 Comparaison entre les différents bétons à 200°C

Les courbes forces-déplacements en flexion des différents bétons à 200°C sont données en figure (V.27).

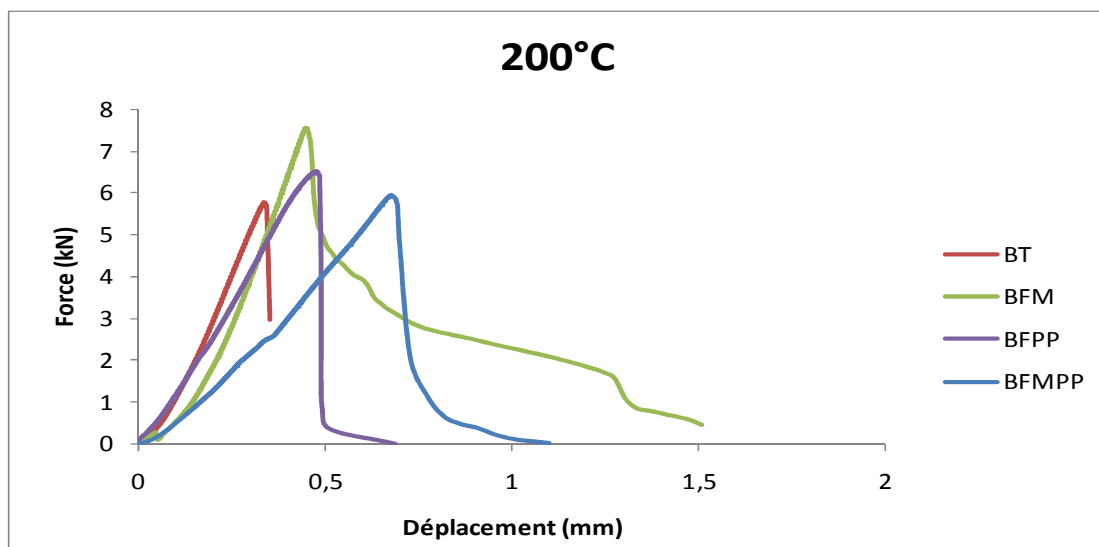


Figure V.27: Courbes force-déplacement des différents bétons à 200°C.

La courbe du béton de fibres métalliques présente une meilleure résistance et un meilleur comportement post pic. La courbe force-déplacement du béton de fibres est caractérisée par trois phases distinctes : Une partie courbée pratiquement linéaire avant fissuration. Une partie descendante linéaire, dans laquelle l'effort de traction diminue rapidement à partir des valeurs maximales (de rupture du matériau) et une partie post pic, dans laquelle le matériau présente une ductilité. Le béton de fibres de polypropylène présente une rupture fragile.

V.6.7 Comparaison entre les différents bétons à 450°C

Les courbes forces-déplacements en flexion des différents bétons à 450°C sont données en figure (V.28).

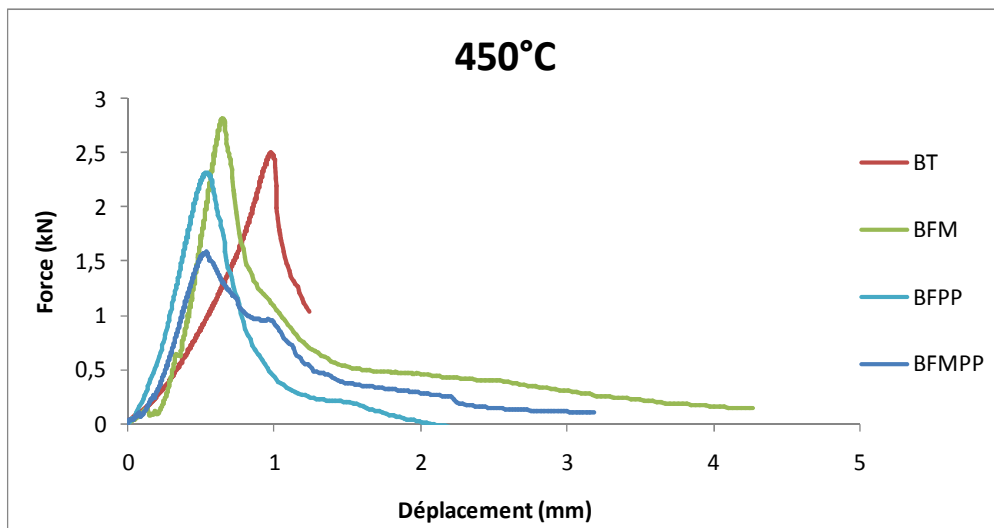


Figure V.28: Courbes force-déplacement des différents bétons à 450°C.

Les bétons (BFPP et BFMPP) ont des résistances la traction par flexion inférieure à celle du béton témoin. La résistance du béton de fibres métalliques est supérieure à celles des autres bétons et il présente un comportement post pic meilleur. Les pentes des courbes des bétons de fibres sont supérieures par rapport à celle du béton témoin.

V.6.8 Mode de ruptures des éprouvettes prismatiques

Sur la figure (V.29) on voit le mode de rupture des éprouvettes prismatiques à 200°C et 450°C.



Figure V.29: Éprouvette prismatique après écrasement.

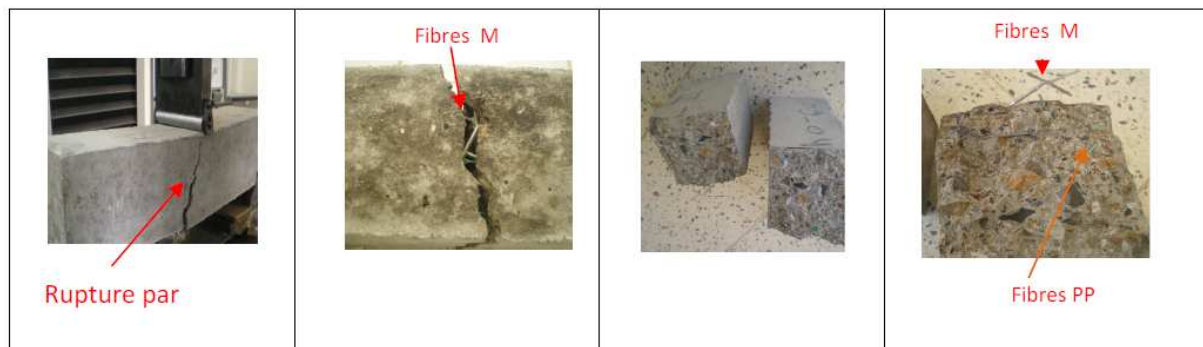


Figure V.30: Rupture des éprouvettes prismatiques sous sollicitation de traction par flexion.

V.7 PERTE DE MASSE

La pesée de trois éprouvettes prismatiques 7x7x28cm³ avant et après chauffage montre que la masse des éprouvettes diminue en fonction du cycle de chauffage-refroidissement (figure V.31). Les résultats de calcul de la perte de masse (moyenne sur trois éprouvettes) sont indiqués dans le tableau (V.4). L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière qu'ont subit les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

$$\Delta m = \frac{ma - m_{Ti}}{ma}$$

Avec :

Δm : désignant la perte de masse en %,

m_a : masse de l'éprouvette à la température ambiante avant le chauffage,

m_{Ti} : masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage – refroidissement T_i

Tableau V.4: Perte de masse moyenne des bétons soumis aux cycles chauffage-refroidissement(%).

Béton	Cycles chauffage-refroidissement	
	200°C	450°C
Béton témoin	3.6	6
Béton fibre métallique	4.06	6.15
Béton fibre polypropylène	2.87	4.7
Béton fibre métallique-polypropylène	4	6.3

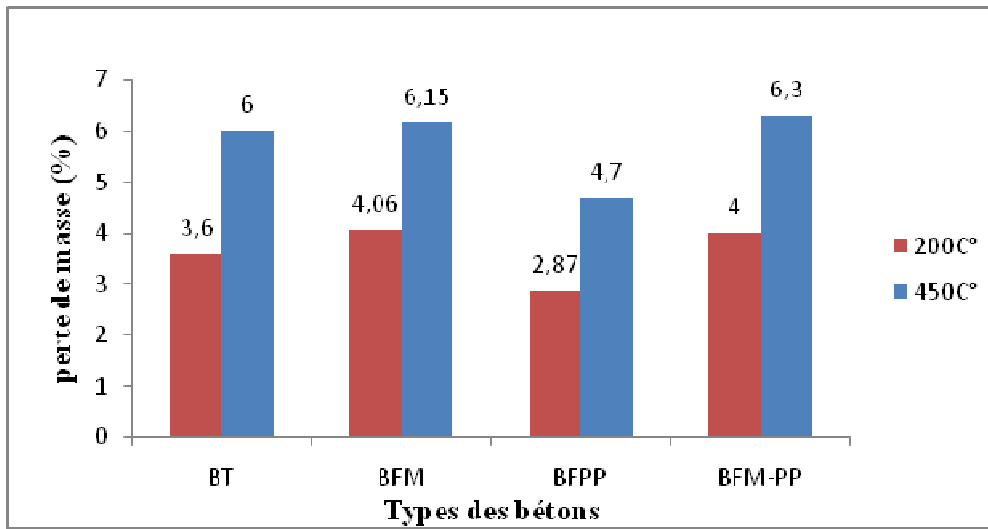


Figure V.31: Pertes de masse des bétons soumis aux cycles chauffage-refroidissement(%).

Nous remarquons pour les bétons de fibres de polypropylène présentent une perte de masse de (2,87% à 200°C et 4.7% à 450°C) légèrement inférieure à celle des bétons sans fibres. Après le cycle de chauffage-refroidissement, les pertes de masse des bétons témoin (BT) sont respectivement de 3.6% pour $T = 200^{\circ}\text{C}$ et de 6% pour $T = 450^{\circ}\text{C}$. Pour les mêmes températures, on a les pertes de masses qui augmentent relativement avec les températures, elles sont pour les bétons de fibres de 4.06% à 200°C et de 6.15% à 450°C pour BFM, et (4% à 200°C et 6.3% à 450°C) pour BFMPP.

La différence de perte de masse entre les bétons sans fibres et les bétons de fibres pourrait être à l'origine des ouvertures de fissures, elles pourraient en effet s'accompagner de perte de matière qui influencerait sur la perte de masse totale de l'éprouvette.

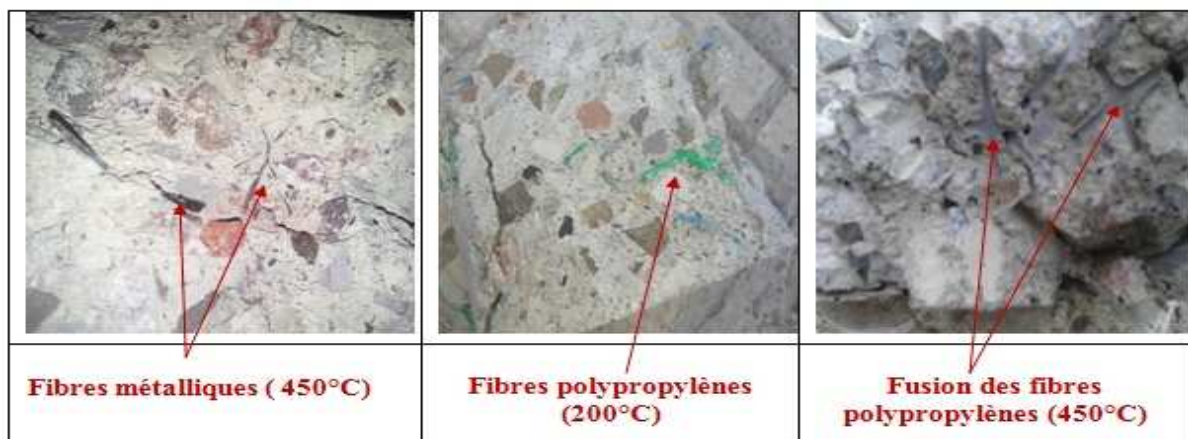


Figure V.32 : L'état des éprouvettes après l'essai de compression.

V.8 CONCLUSION

- Les essais réalisés sur les bétons contenant les fibres de polypropylène ont confirmé qu'elles améliorent la réponse thermique du béton. La résistance en compression des bétons de fibres de polypropylène évoluent en fonction de la température selon deux domaines, comme c'était le cas pour les bétons sans fibres. Le premier domaine, à la température à 200°C, est caractérisé par une amélioration de résistance. Le second domaine, au-delà de la température 450°C, est marqué par une baisse rapide de la résistance. L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton entraîne d'une façon générale une amélioration de résistance en compression. L'influence des fibres sur le comportement en traction est avérée, en effet, le béton fibre polypropylène présente de meilleures résistances en traction que le béton témoin.

- Lors des cycles de chauffage, aucune éprouvette de béton contenant des fibres métalliques n'a éclaté. La mesure de la différence de température montre, comme pour le cas des bétons de fibres de polypropylène, une influence des fibres métalliques sur la stabilité thermique. L'évolution des résistances en compression en fonction de la température de chauffage des bétons de fibres métalliques peuvent être regroupées en deux domaines comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène. L'ajout des fibres métalliques dans le béton entraîne d'une façon générale une amélioration des propriétés mécaniques à la température 200°C jusqu'au 400°C. Le gain sur la résistance en traction est meilleur que sur la résistance en compression après le chauffage à 450°C. Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour améliorer sa ductilité à différentes températures. Les essais réalisés en compression comme en traction montrent un bon comportement ductile du béton contenant les fibres métalliques non seulement à température ambiante mais aussi à la suite des différents cycles de chauffage-refroidissement.
- L'étude de la résistance en compression des bétons avec association de fibres de polypropylène et métalliques montre une amélioration de celle-ci par rapport au béton sans fibres, aux bétons de fibres de polypropylène et une légère baisse par rapport aux bétons de fibres métalliques à 200°C. La résistance des bétons avec association de fibres est beaucoup plus proche de celle des bétons de fibres métalliques que celle des bétons de fibres de polypropylène. Comme en compression, la résistance en traction des bétons association de fibres n'est pas une moyenne arithmétique de résistance de bétons de fibres de polypropylène et de bétons de fibres métalliques. La baisse de résistance en traction des bétons en présence de fibres de polypropylène est plus prononcée que celle du béton contenant le mélange de fibres de polypropylène et de fibres métalliques.
- La pesée de trois éprouvettes avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement a permis d'étudier l'évolution de la perte de masse des bétons de fibres. Nous remarquons pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des bétons sans fibres et à celle des bétons de fibres métalliques et cela pour les différentes températures. Le béton association de fibres subit une perte de masse plus grande par rapport à celle des bétons de fibres métalliques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de la présente étude était d'approfondir les connaissances sur le comportement des éléments en béton portés à des températures élevées ainsi que trouver des moyens d'amélioration du béton vis-à-vis de son instabilité thermique et de ses performances mécaniques.

L'utilisation de fibres de polypropylène et de fibres métalliques a été donc envisagée. Nous avons étudié l'influence de chacune des natures de fibres employées (BFPP-BFM-BFMPP), puis l'influence couplée des deux types de fibres (BFMPP) a été effectuée pour différentes combinaisons de fractions volumiques. En effet, des bétons témoins sans fibres (BT), des bétons de fibres de polypropylène, des bétons de fibres métalliques et puis enfin des bétons avec mélange de fibres métalliques et fibres de polypropylène ont été confectionnés ($E/C = 0.483$) puis conservées dans des conditions bien définies.

Les propriétés physiques telles que la perte de masse, et mécaniques telles que la résistance en compression, et en traction par flexion, ont été étudiées. Ces propriétés ont été déterminées aussi bien à température ambiante i.e. à 20°C qu'après un traitement thermique. Ce traitement thermique a consisté à soumettre les éprouvettes de bétons à deux cycles de chauffage-refroidissement à la température de 200°C et 450°C avec une vitesse de chauffage établie de 1°C/min.

Une composition de béton ordinaire sans fibres (BT) a été étudiée. Les résultats ont montré une dégradation et une baisse de propriétés mécaniques et physiques lors de la montée en température, et une perte de masse des éprouvettes au fil de la montée en température, cette dernière est plus importante pour le béton témoin sans fibres (BT) que pour les bétons fibrés.

L'addition des fibres de polypropylène dans le béton permet d'améliorer sa stabilité thermique. En effet pour un dosage de 0.3% (3Kg/m^3), ces bétons soumis aux mêmes cycles thermiques (200°C et 450°C) n'ont pas éclaté. Ce résultat confirme ceux notés dans la littérature concernant l'amélioration de la stabilité thermique des bétons par le biais des fibres de polypropylène.

L'étude des propriétés physiques des bétons de fibres de polypropylène a montré que ceux-ci perdent toujours moins de masse par rapport au béton sans fibre. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, il a été montré l'influence des fibres de polypropylène sur les performances mécaniques du béton telles que la résistance à la compression et à la traction, l'influence étant l'augmentation des résistances mécaniques avec ajout de fibres. L'écart le plus important relevé se situe à la température de 200°C, comparativement, après chauffage à

450°C, plus aucune différence significative en termes de caractéristiques mécaniques entre les bétons avec ou sans fibres de polypropylène n'a été notée.

L'addition des fibres métalliques est utilisée dans le béton pour limiter la propagation des fissures et produire ainsi un matériau plus ductile. L'utilisation des fibres métalliques dans le béton porté à des températures élevées a aussi fait l'objet d'une étude. La composition de béton testée a été confectionnée en utilisant un dosage en fibres de 1%, en proportion volumique.

A l'issu des essais (compression et traction par flexion), il a été noté que les propriétés mécaniques des bétons de fibres métalliques se sont trouvées améliorées dès le chauffage à 200°C, et où, nous avons obtenu une amélioration des résistances en traction et en compression (amélioration supérieure en traction plutôt qu'en compression). L'influence de la variation du volume de fibres métalliques est surtout observée en traction, notamment pour les chauffages à 450°C. En effet, il fut noté une bonne reprise des efforts de traction par les fibres, et ce malgré l'ouverture des fissures (importantes) dans le béton. Concernant la ductilité post-fissuration de ces bétons de fibres métalliques, celle-ci est maintenue même après les cycles de chauffage-refroidissement.

L'étude de la combinaison des fibres métalliques et polypropylène a aussi été menée, l'objectif étant d'améliorer à la fois la stabilité thermique et les propriétés mécaniques. Nous avons remarqué une faible variation de la perte de masse pour une proportion de fibres FMPP supérieure à celles des bétons de fibres métalliques. Concernant les résistances mécaniques des bétons (BFMPP), celles-ci présentent une amélioration de la résistance à la compression initiale (à 20°C) par rapport aux bétons témoin (BT) et aux bétons fibrés de polypropylène (BFPP), et des valeurs similaires à celles des bétons contenant les fibres métalliques si ce n'est de légères baisses de résistances.

Pour l'aspect mécanique, après chauffage à 200°C, la résistance en compression des bétons BFMPP a montré une baisse de 4.41% par rapport à celle des bétons de fibres métalliques. La ductilité post-fissuration de ces bétons est notable, et est conservée après les cycles de chauffage-refroidissement. Une meilleure résistance à la compression des bétons (BFMPP) a par ailleurs été notée en présence de fibres métalliques dans le mélange.

A partir de ces résultats exposés dans ce présent travail, nous pouvons noter l'effet de l'apport des fibres de natures différentes, en l'occurrence métalliques et fibres polypropylène et mélange BFMPP sur les structures. En effet, le béton de fibres métalliques présente l'avantage d'avoir un comportement post-pic ductile plus important quand il est soumis à des

températures élevées. Ce type de béton peut être utilisé dans des structures qui sont exposées au risque d'incendie.

PERSPECTIVES

Karl Jaspers disait : «faire de la philosophie, c'est être en route. Les questions, en philosophie, sont plus essentielles que les réponses, et chaque réponse devient une nouvelle question». A travers cette étude, nous avons montré comment les fibres de polypropylène et métalliques peuvent améliorer le comportement des éléments en béton soumis à une température élevée. Cette étude a mis en évidence l'interaction entre les fibres et la microstructure du béton. Des observations microscopiques seraient utiles pour mieux étayer nos premières conclusions. De plus, des essais supplémentaires sur les bétons de cocktail de fibres à d'autres cycles de chauffage-refroidissement sont nécessaires. Il serait intéressant d'améliorer ce travail par :

- Utilisation d'autres natures de fibres qui seront plus résistantes à des températures élevées.
- Étudier la microstructure de ses fibres et bétons fibrés.
- Augmenter le degré de température de ces bétons fibrés et voir leurs comportements.
- Étudier la simulation numérique de ces bétons fibrés soumis à des températures élevées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **IR. P BOERAEVE**, cours de béton armé, (janvier 2010).
- [2] **BOUFEDAH BADISSI**, Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire, thèse de magister ; université Mentouri Constantine.
- [3] **ADAM M. NEVILLE**, Propriétés des bétons, Eyrolles, Paris, (Septembre 2000).
- [4] **Club CDOA**, Le contrôle non destructif des structures en béton, CETE méditerrané (appartient au réseau scientifique et technique de l'équipement), (juin 2004)
- [5] **BARON J et OLIVIER J-P** : La durabilité des bétons, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, (1995).
- [6] **GEORGES DREUX, JEAN FESTA**, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles, 8ème édition, Paris (mai 2002).
- [7] **Allen H. G**, "Glass fibre reinforced cement strength and stiffness", CIRIA Report 55,(Septembre 1975).
- [8] **Porter H.F**, "The Preparation of Concrete-From Selection of Materials to Final Deposition", ACI Materials Journal, Vol. 6, N° 2, 1910, pp. 287-303, (1910).
- [9] **Coke F., Venstermans J**, "Béton renforcé de fibres d'acier", CSTC Magazine (Bruxelles), N° 3, Septembre 1977, pp. 2-19, (1977).
- [10] **Romualdi, J. P., Baston, G. B**"Mechanics of crack arrest in concrete", Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 89, 1963, EM 3, pp. 147-168,(1963).
- [11] **Marrey B.; Hammoutène F**, "Le béton à Paris", éd. du Pavillon de l'Arsenal, Paris,1999, 223 p, (1999).
- [12] **Chanvillard G., Aitcin P.C., Lupien C., et Do M.T**,"Les resurfaçages minces adhérents en béton renforcés de fibres métalliques", Colloque Francophone, les bétons renforcés de fibres métalliques, recherches en cours et réflexion sur leur développement. Béthune, France, juillet 1994, pp. 93-104,(juillet 1994).
- [13] **Rossi P., Harrouche N., Lemaou F**, "Comportement mécanique des bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et en béton précontrainte", Annales de l'ITBTP, série matériaux 73, , N° 479 bis, pp. 166-183,(décembre 1989).

- [14] **Rossi P** , "Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of French research",ACI Materials Journal, Vol. 91, N° 3, 1994, pp. 273-279, (1994).
- [15] **Rossi P**, "Les bétons de fibres métalliques", Presse de l'ENPC, , 309 p,(Juin 1998)
- [16] **Balaguru P., Nahari R. and Patel M**, "Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 89, N°6, pp. 541-546, (1992).
- [17] **Pierre ROSSI** Laboratoire Central des Ponts & Chaussées (mars/avril 2009).
- [18] **Naaman A.E**, "Fiber reinforced concrete : State of progress at the Edge of the millennium", 9th International Conference on Concrete Engineering and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, May 8-13 2006, pp. 20-48 ,(2006).
- [19] **Di Prisco M**. (2009), "FRC: structural applications and standards"; Materials and Structures Vol. 42, N° 9, pp. 1169-1171, (2009).
- [20] **Chanvillard G, Aitcin P.C, Lupien C, et Do M.T**, "Les resurfaçages minces adhérents en béton renforcés de fibres métalliques", Colloque Francophone, les bétons renforcés de fibres métalliques, recherches en cours et réflexion sur leur développement. Béthune, France, pp. 93-104, (juillet 1994).
- [21] **ROSSI P.**, " Formulation et comportement mécaniques des bétons de fibres métalliques", Annales de LITBTB , N°492, Série : Béton, pp.279, pp.90-107, (1991).
- [22] **KADJOUR N.**, " Laboratoire du béton ".
- [23] www.lejdd.fr/Societe/Images/Galerie-du-8-Decembre-au-14-Decembre-2008/tunnel-manche-travaux-incendie-35953/.
- [24] www.debunking911.com/madrid.htm.
- [25] **Hager, I.**, Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- [26] **Harmathy, T.Z.**, Moisture in materials in relation to fire test, ASTM, Special Technical Publication, n° 385, 1964, pp. 74-95.
- [27] **Hertz K.**, limits of spalling of fire – exposed concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, 2003, pp. 103-116.

- [28] **Noumowé, N.**, Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C, ACI Materials Journal, Title n° 100-M39, pp. 326-330.
- [29] **Both, R.**, The behaviour of unprotected loaded concrete tunnel linings subjected to RWS hydrocarbon fire, TNO report 2000-R01360, 2000.
- [30] **Haddad, R.H.**, Al-Saleh, R.J., Al-Akhras, N.M., Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete, Fire Safety Journal, doi:10.1016/j.firesaf.2007.11.002, 2007.
- [31] **ArupFire, HSE**, Fire resistance of concrete enclosures, Work Package 1: data collection, Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, Work Package 7: look-up tables, Work Package 8: spalling guidance, Rev B, 2005.
- [32] **Mindeguia, J-C.**, Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [33] **Choinska, M.**, Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [34] **Cruz, C.R., Gillen, M.**, Thermal expansion of portland cement paste, mortar and concrete at high temperature, Fire and Materials, Vol. 4, 1980, pp. 66-70.
- [35] **Menou, A.**, Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: approche multi échelles de l'endommagement thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [36] **Pigeon, M., Cantin, R.**, Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperature, Cement and Concrete Composites, 20, 1998, pp. 365-375.
- [37] **Diederichs, U., Jumppanen, U.M.**, High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete, Verlog für architektur und techn.wissencheften, Ernst & schn, 1992, pp. 191-197.
- [38] **Phan, L.T.**, **High-strength** concrete at high temperature- an overview, National institute of standards and technology, High performance concrete 6th International symposium proceeding, Vol. 1, 2002.

- Phan, L.T., Carino, N.J.**, Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature, National institute of standards and technology, Materials and Structures, Vol. 36, N°256, 2003, pp. 91-98.
- [39] Khoury, G. A.**, Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, Magazine of Concrete Research 44, n°161, 1992, pp. 291-309.
- [40] Dias, W.P.S, Khoury, G.A, Sullivan, P.J.E**, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, ACI Materials Journal, title n°87-M18, 1990.
- [41] Kanéma, M.**, Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.
- [42] Min, Li, Chun xiang, Q., Sun, W.**, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 1001-1005
- [43] Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., Furumura, F.**, Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, International seminar on concrete for nuclear reactors, Germany, Vol. 1, 5 October 1970, pp. 377-406.
- [44] Hammer, TA.**, High strength concrete, phase 3, SP6 fire resistance report 6.2, Spalling reduction through material design, SINTEF report STF70 F92156, Trondheim, Norway, 1992.
- [45] Komonen, J., Penttala, V.**, Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes, Fire Technol 2003, 39(1), pp. 23-34.
- [46] Kalifa, P., Pardon, D., Menneteau, F-D., Gallé, C., Chené, G., Pimienta P.**, Comportement à haute température des bétons à haute performances : de l'éclatement à la microstructure, Cahier du CSTB, n°3435, Décembre 2002.
- [47] Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard, D.**, Spalling and pore pression in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 30,2000, pp. 1-13.

- [48] Mindeguia, J-C.,** Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [49] Mindeguia, J-C.,** Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [50] Bayasi, I.Z., Al Dhaheri, M.,** Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete, ACI Materials Journal, Vol. 99, n° 1, 2002, pp. 22-26.
- [51] Sabeur, H.,** Etude du comportement du béton à hautes températures, une nouvelle approche thermo-hydro-mécanique couplée pour une modélisation du fluage thermique transitoire, Thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée, 2006.
- [52] Castillo, C., Durrani, A.J.,** Effect of transient high temperature on highstrength concrete, ACI Materials Journal, title n°87-M7, 1990, pp. 47-53.
- [53] Pimienta, P.,** Le comportement au feu des BHP, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 77-124.
- [54] - G. DREUX et J. FESTA (1995),** "Nouveau guide de béton et de ses constituants". Edition EYROLLES. 7^{ème} Edition 1995.