



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** en génie civil

Option : **Structure**

Thème

**Etude expérimentale des bétons fibrés soumis
à des températures de 600°C et 800°C**

Proposé et dirigé par :
M^{me} O. FEDAOUI - AKMOUSSI

Présenté par:
M^{lle} HADJI Nadia

Promotion 2020/2021

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, 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 remercie aussi **M^rT. DJADOUNE** et **M^rT. BENCHABANE** d'avoir répondu à toutes mes interrogations, en me permettant ainsi de résoudre les problèmes rencontrés dans Excel.

Mes remerciements vont également au personnel du laboratoire de béton, du département de Génie civil, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, en particulier **Mr R. BOUHRAOUA**, **Mme F. BEN AHMED** et le technicien du laboratoire de génie mécanique pour leurs aides et leurs encouragements dans la réalisation de la partie expérimentale de ce travail.

Je remercie également mes camarades de la promotion **DEROUAZ Jugurtha** et **BEN YOUSEF Rabah** pour leur aide et soutien.

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

Dédicaces

*DU PROFOND DU COEUR, JE DÉDIE CE MODESTE
TRAVAIL À MA TRÈS CHÈRE MÈRE SALIHA ET
MON CHÈRE PAPA MOHMED, MES FRÈRES ET MES
SOEURS QUE DIEU LEUR PROCURE BONNE SANTÉ
ET LONGUE VIE.*

*À LA MÉMOIRE DE MON FRÈRE DJAFER ET
À LA MÉMOIRE DE MA TANTE FADMA QUE
DIEU LE MISÉRICORDIEUX, LES ACCUEILLE
DANS SON PARADIS ÉTERNEL.*

À TOUTE MA FAMILLE ET MES AMIS.

À MES CAMARADES. (BOUALEM)

*À MES CHÈRES NIÈCES CÉLIA ET IMANE ET
TINA.*

*ET À TOUS CE QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS
OU DE LOIN POUR LA RÉALISATION DE CE
TRAVAIL, JE VOUS REMERCIE.*

Redouane

Liste des figures

Chapitre I : synthèse bibliographique

Figure I.1: Différents types de granulats[4].	7
Figure I-2 : Fibres de polypropylènes[thèse doctorat 2017 Annaba]	15
Figure I-3 : Différents types de fibres métalliques [15].	16
Figure I-4 : Fibres métalliques [16].	17
Figure I-5: Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres[15].	18
Figure I-6: Exemples d'applications du béton de fibres [17].	19

Chapitre II: Béton soumis a haute température.

Figure II.1 : Aspect normal d'une pâte de ciment n'ayant pas subi d'échauffement (observation au MEB (×400) [**].	20
Figure II.2 : Matrice cimentaire vitreuseprésentant une macroporosité très importante. Ce phénomène se produit au –delà de 1000°C et provient de la fusion puis du refroidissement de la pâte du ciment (Observation au MEB (× 150) [**].	20
Figure II.3 : Dégradation d'ouvrages en béton suite à un incendie [thèse doctorat 2017 Annaba].	21
Figure II.4 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre,2001 thèse doctorat 2007 Anaba.	22.
Figure II.5 : Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre ettempératures d'apparition des pics de pression [25].	23
Figure II. 6 : Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température (Al Nahhas 2004).	24
Figure II.7: Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid), (Hager and Pimienta (2004).	26
Figure II.8 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de béton de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène [EZZIANE].	27
Figure II.9: Différents résultats de la résistance à la traction résiduelle relative[EZZIANE].	28

Figure II. 10: Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène[48].	29
Figure II. 11: Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$, [25].	30
Figure II.12 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température (Tsimbrovska 1997), (Fares 2009) .[EZZIANE].	31
Figure II.13 : Évolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres d'acier.[EZZIANE].	31
Figure II.14 : Évolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres de polypropylène.[EZZIANE].	32
Figure II.15 : Évolution de la résistance résiduelle relative en traction en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres d'acier.[EZZIANE].	33
Figure II.16 : Évolution de la résistance résiduelle relative en traction en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres de polypropylène.[EZZIANE].	34

Chapitre III: Programme expérimentale

Figure III.1 : Le sable utilisé.	36
Figure III.2 : Granulats utilisés.	36
Figure III.3 : Super-plastifiant.	37
Figure III.4 : Tamiseuse	37
Figure III.5: Courbes Granulométriques	40
Figure III.6 : 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)[cours de TMC].	43
Figure III.7 : Les fibres utilisées.	47
Figure III.8 : Les moules utilisés : a) cylindriques, b) prismatiques.	48
Figure III.9 : Eprouvettes après coulage.	49

Figure III.10 : Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes.....	50
Figure III.11 : Disposition des éprouvettes à l’intérieur du four.....	50
Figure III.13 : Presse hydraulique AUTO TEST.....	51
Figure III.15 : Dispositif expérimental pour l’essai de traction par flexion 3 points.	52

Chapitre IV : Interprétation des résultats.

Figure IV.1 : Pertes de masse des différents bétons étudiés.	54
Figure IV.2 : Résistance à la compression des différents bétons.....	55
Figure (IV.3) : Courbes contrainte-déformation du béton de fibres cocktail (BFC)	56
Figure (IV.4) : Courbes contrainte-déformation du béton de fibres métalliques(BFM).....	56
Figure (IV.5) : Courbes contrainte-déformation du béton de fibres de polypropylène(BFP). .	57
Figure (IV.6) : Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 20 °C.....	58
Figure (IV.7) : Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 600 °C.....	58
Figure (IV.8) : Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 800 °C.....	59
Figure (IV.9) : L’aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four	59
Figure (IV.10) : L’aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres métalliques à la sortie du four.	60
Figure (IV.11) : L’aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres cocktail à la sortie du four.	60
Figure (IV.12) : Courbes forces-déplacement du béton de fibres cocktail (BFC).....	61
Figure (IV.13) : Courbes forces-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM).	61
Figure (IV.14) : Courbes forces-déplacement du béton de fibres de polypropylènes (BFP)....	62
Figure (IV.15) : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 20 °C.	62
Figure (IV.16) : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 600 °C.	63
Figure (IV.17) : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 800 °C.	63
Figure (IV.18) : L’aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.	64

Figure (IV.19) : L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres métalliques à la sortie du four. 64

Figure (IV.20) : L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres cocktail à la sortie du four. 65

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I-1: Résistance à la compression.....	5
Tableau I-2 : Les caractéristiques des granulats les plus utilisées.....	7
Tableau I-3 : Désignation, abréviations et description des adjuvants	9
Tableau I-4: Caractéristiques des fibres	14

Chapitre III: Programme expérimentale

Tableau III.1 : Composition chimique du ciment	35
Tableau III.2: Analyse granulométrique du sable (0/3).	39
Tableau III.3 : Analyse granulométrique du gravier (3/8).	39
Tableau III.4 : Analyse granulométrique du gravier (8/16).	40
Tableau III.5 : Masses volumiques absolue et apparente des granulats.....	41
Tableau III.6 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire	42
Tableau III.7 : les pourcentages des constituants.....	45
Tableau III.8 : Composition finale pour 1m ³ de béton.....	46

Sommaire

SOMMAIRE

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction	2
I.1 Les constituants d'un béton	2
I.1.1 Le ciment	3
I.1.2.1 Définition	3
I.1.2.2 Principe de production du ciment portland	3
I.1.2.3 Constituants principaux et additions	4
I.1.2.4 Catégories de ciment	5
I.2.2 Les granulats	6
I.2.2.1 Classification des granulats	6
I.2.3 Les adjuvants	8
I.2.3.1 L'eau de gâchage	9
I-3-Propriétés essentielles des bétons	
I-4 Formulation des bétons	10
I- I-5- Le béton de fibres	10
I-5-1- Historique sur l'utilisation des bétons fibrés	11
I-5-2- Le rôle des fibres	12
I-5-3- Les différents types de fibres	13
I-5-4- Caractéristiques de certains types de fibres	14
I-5-6- Les fibres métalliques	16
I-5-7- Applications des bétons de fibres	18
I-5-8- Fabrication des bétons de fibres	19

Chapitre II : Béton soumis a haute température

Introduction	20
II.1 Microstructure des matériaux a matrice cimentaire soumis a une haute temperature.....	20
II.2 endommagement thermique	21
II.3 Paramètres et phénomènes favorisant l’instabilité thermique du béton	22
II.3.1 La présence d’eau dans le béton	22
II.3.2 Les propriétés physico-mécaniques du matériau.....	23
II.3.3 La vitesse de chauffage.....	23
II.3.4 La nature des granulats	23
II.4.Déformations thermiques du béton.....	24
II.4.1 Déformation thermo hydrique libre du béton	24
II.4.2 Evolution des propriétés physiques	25
II.4.3 Evolution des Propriétés Mécanique	25
II.4.3.1 comportement en compression	25
II.4.3.2 Résistance à la traction	27
II.5 Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis a une température élevée.....	28
II.5.1 Instabilité thermique	28
II.5.2 perte de masse du béton.....	29
II.5.3 Porosité	30
II.6 Influence des fibres d’acier et de polypropylène sur le comportement du béton a haute température.....	31
II.6.1 Résistance en compression	31
II.6.1.1 Comportement avec fibres d’acier.....	31
II.6.1.2 Comportement avec fibres de polypropylène	32
II.6.2 Résistance en traction	33
II.6.2.1 Comportement avec fibres d’acier.....	33

II.6.2.2 Comportement avec fibres de polypropylène	33
--	----

Chapitre III : Programme expérimentale

Introduction	35
III.1 Types d'éprouvettes utilisées	35
III.2 Le Ciment.....	35
III.3 Le sable	36
III.4 Les granulats	36
III.5 Les adjuvants.....	36
III.6 L'eau.....	37
III.7 Analyse granulométrique.....	37
III.7.1 Principe de l'essai.....	38
III.7.2 Equipements utilisés.....	38
III.8 Module de finesse.....	40
III.9 Masse volumique absolue et apparente	41
1.Composition de béton par la méthode de DREUX – GORISSE	41
1.1 Résistance visée.....	42
1.2 Dosage en ciment et en eau	42
2.Les fibres	47
3. Préparation des éprouvettes.....	47
3.1 Confection du béton	48
3.2 Conservation des éprouvettes	49
3.3 Essais thermiques	49
3.4 Essai de compression uni axial.....	51
3.5 Essai de traction par flexion trois points	51
Conclusion.....	51

Chapitre IV : Interprétation des résultats.

Introduction	53
IV.1 Formulations.....	53
IV.2 Perte de masse	53
IV.3 Essai de compression.....	54
IV.3.1 Résistance à la compression.....	54
IV.3.2 Courbes contrainte-déformation à la compression.....	55
IV.4 Essai de flexion trois points.....	61
Conclusion générale	66
Référence bibliographique	

Introduction générale

Introduction générale

La production journalière mondiale du béton est en moyenne de 16 393 442 m³. Ce matériau est utilisé dans la construction des immeubles d'habitation, des tunnels, des bâtiments d'activité industrielle et de commerce, des ouvrages d'art, etc. Le béton est adapté pour rester robuste et durable pendant une longue période. Cependant, lors des situations extrêmes, comme l'incendie, le béton peut présenter des endommagements plus ou moins sévères.

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

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

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

L'objectif de ce travail est d'étudier et mieux comprendre le comportement à haute température des bétons fibrés. Cette étude présente l'effet de l'évolution de la température sur le comportement des bétons étudiés qui sont préparés en ajoutant les fibres métalliques (BFM), les fibres de polypropylène (BFP) et un cocktail de fibres (BFC). Les échantillons sont soumis aux différents cycles chauffage- refroidissement avec les températures suivantes : 600°C et 800°C.

Ce travail est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique détaillant les formes d'instabilité thermique que peut présenter le béton soumis à une haute température, les hypothèses émises pour expliquer ces phénomènes, ainsi que l'insuffisance des preuves sur les principaux processus avancés pour expliquer l'instabilité thermique.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est consacré à une analyse bibliographique des travaux de recherches sur le comportement du béton à haute température. Il comporte une description sommaire de l'effet de la température sur le béton et de l'influence des fibres métalliques et des fibres de polypropylène sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux, aux compositions des bétons étudiés, la présentation du programme expérimental et la méthode de fabrication et de conservation des éprouvettes. La construction du programme expérimental est présentée et justifiée en se basant sur des études-clés de la bibliographie. Quatre formulations de béton ont été formulées en faisant varier la nature des fibres.

Le quatrième chapitre représente les résultats des différents essais sur le comportement mécanique des bétons sans fibres et bétons fibrés. Nous avons évalué la perte de masse, la résistance à la compression et la résistance en traction par flexion trois points pour les différents cycles de températures étudiés.

Nous finalisons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Introduction

Un béton est un matériau composite résultant du mélange dosé d'un squelette granulaire (granulats) et d'une matrice pâteuse durcissable composée de ciment, d'eau et, le plus souvent, d'adjuvants. [1]

Le béton est considéré aujourd'hui le matériau le plus utilisé en 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.

Ainsi, 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.

I.1 Les constituants d'un béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et le plus souvent, adjuvants. 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 conglomérat 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.

I.1.1 Le ciment

I.1.2.1 Définition

Le ciment est un liant, une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte homogène et plastique, capable d'agglomérer en durcissant, des substances variées appelées « agrégat » ou « granulat ». Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau[3].

I.1.2.2 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.

Les ciments dits courants sont décrits, définis, classés et spécifiés dans la norme NF EN 197-1. Tous contiennent du clinker, en proportion très variable, de 100 % éventuel pour un CEM I, à 5 % possible pour un CEM III/C, selon leur type (la norme en distingue vingt-sept).

Le clinker résulte de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respectives moyennes de 80 % et 20 %. Extraits de carrières le plus souvent distinctes, ces matériaux sont intimement mélangés par broyage fin pour constituer ce qu'on appelle le « cru », dont l'aspect est celui d'une farine blanche. Il est ensuite procédé au préchauffage puis à la cuisson du cru, dans un four rotatif cylindrique, légèrement incliné sur l'horizontale, de longueur 100 m environ. Ce traitement thermique d'une durée de l'ordre d'une heure imposé au mélange entraîne la décarbonatation du calcaire (aux alentours de 900 °C) puis au phénomène dit de clinkérisation (vers 1 450 °C). Il est suivi d'un refroidissement énergique permettant de recueillir le clinker sous forme de nodules de dimensions centimétriques. Les constituants

du clinker résultent de la réaction de la chaux (CaO), libérée du calcaire par sa décarbonatation, sur les composants les plus usuels de l'argile [silice (SiO₂) : 60 % ; alumine (Al₂O₃) : 18% ; oxyde de fer (Fe₂O₃) : 7 %] pour former essentiellement des cristaux de silicates et d'aluminates de calcium.

Les corps principalement formés sont :

- le silicate tricalcique [3CaO, SiO₂ (ou, selon la notation « cimentière » abrégée, C₃S)];
- le silicate bicalcique [2CaO, SiO₂; C₂S];
- l'aluminate tricalcique [3CaO, Al₂O₃; C₃A];
- l'aluminoferrite tétracalcique [4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃; C₄AF], soit: C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF.

Le ciment Portland est le produit pulvérulent résultant du broyage fin du clinker associé à du gypse pour réguler ultérieurement la prise [4].

I.1.2.3 Constituants principaux et additions

Ils présentent tous une propriété hydraulique ou pouzzolanique ; la norme Française (NF EN 197-1) définit neuf constituants des ciments :

- clinker Portland (K) ;
- laitier granulé de haut-fourneau (S) : coproduit de la métallurgie ;
- pouzzolanes naturelles (Z) ;
- pouzzolanes naturelles calcinées (Q) ;
- cendres volantes siliceuses (V) : provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des chaudières (installations industrielles, centrales électriques thermiques) alimentées au charbon pulvérisé ;
- cendres volantes calciques (W) ;
- schistes calcinés (T) ;
- calcaires (L) et (LL) ;

– fumées de silice (D) : particules très fines [0,01 à 1 micron (μm) ; $1\mu\text{m} = 1/1\ 000\ \text{mm}$], constituées essentiellement de silice (SiO_2) amorphe, coproduit de l'électrometallurgie du silicium[5].

I.1.2.4 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 artificiel (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-1:Résistance à la compression [1].

[7] Résistance à la compression (en MPa)				
Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	–	≥ 16	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	≥ 10	–		
42,5 N	≥ 10	–	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20	–		
52,5 N	≥ 20	–	$\geq 52,5$	–
52,5 R	≥ 30	–		

I.2.2 Les granulats

Le granulat est un élément essentiel dans le béton. Les granulats consistent en un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 22,4 mm pour la confection des bétons courants. Ils sont divisés, par « dimensions » croissantes, en cinq familles : fillers, sables, graves, gravillons, ballasts[1].

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent être propres et répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité. Ils 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.

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 appelle granulat d/D un ensemble de grains tels que :

- les grains passent par le tamis de maille D ;
- les grains ne passent pas par le tamis de maille d ;
- d et D sont exprimés en mm.

Si $d < 0,5$ mm, le granulat est désigné par $0/D$; d/D ou $0/D$ sont appelées classes granulaires.

Les granulats les plus utilisés pour la confection des bétons sont :

- les fillers [$0/D$; $D < 2$ mm avec ≥ 70 % de passant à 0,063 mm et ≥ 85 % de passant à 1,25 mm]
- les sables [$0/D$; $D \leq 4$ mm]
- les gravillons [d/D ; $d \geq 2$ mm; $D \leq 63$ mm]

Tableau I-2 : Les caractéristiques des granulats les plus utilisées [5].

Les granulats les plus utilisée		
familles	dimensions	caractéristique
Filles	d/D	$D \leq 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70% de passant à 0,063
Sables	d/D	$d=0$ et $D \leq 4$ mm
Graves	d/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ MM
ballasts	d/D	$d= 31,5$ mm et $D=50$ ou 63 mm

**Figure I.1:** Différents types de granulats[6].

B. Selon leur origine et leur nature

On utilise plusieurs sortes de granulats.

- Naturels, roulés ou concassés.

- Artificiels (sous-produits industriels)
- Recyclés (à partir de bétons de démolition).
- Légers (masse volumique $< 2 \text{ t/m}^3$)
- Courants (permettant de fabriquer des bétons de masse volumique de 2 à $2,5 \text{ t/m}^3$).
- Lourds (permettant la fabrication de bétons de masse volumique inférieure à $2,6 \text{ t/m}^3$, utilisés notamment comme isolants aux rayons radioactifs)[8].

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.

I.2.3L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire un béton. La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, le développement des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion[10].

La norme Française (NF EN 1008) définit les critères précis d'aptitude à l'emploi de l'eau de gâchage. Cette dernière doit avoir les propriétés de l'eau potable. L'eau employée pour le gâchage des bétons doit être propre :

- physiquement (pas de déchets solides, minéraux ou organiques) ;
- chimiquement (valeur limitée de la quantité de sels dissous, ce qui exclut en général l'usage de l'eau de mer)[9].

L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment et sa mise en œuvre du béton. Sa quantité varie avec un très grand nombre de facteurs; dont le rapport E/C qui est un critère important des études de béton.

I.2.4 Les adjuvants

Il s'agit de produits, se présentant le plus souvent sous forme liquide à température ordinaire, incorporés à faible dose (moins de 5 % de la masse du ciment), en général lors du malaxage et destinés à améliorer les propriétés d'un béton, d'un mortier ou d'un coulis, à l'état frais ou durci. Chaque adjuvant est ainsi désigné par sa fonction principale [11].

Tableau I-3 : Désignation, abréviations et description des adjuvants [12].

Désignation	Abréviation	Effet
Plastifiant	BV	réduit la demande en eau et/ou augmente l'ouvrabilité
Fluidifiant	FM	réduit fortement la demande en eau et/ou augmente l'ouvrabilité
Entraîneur d'air	LP	création de fines bulles d'air uniformément réparties pour augmenter la résistance au gel/dégel
retardateur de prise	VZ	retarde le temps de début de prise (bétonnage par temps chaud)
Accélérateur de prise	SBE	diminue le temps de début de prise après le malaxage
Accélérateur de durcissement	HBE	augmente la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise
Modificateur de viscosité	VMA	limitation de la ségrégation par l'amélioration de la cohésion du béton
Hydrofuge	DM	réduit l'absorption capillaire du béton durci

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- Formulation des bétons

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... [4].

I-5- Le béton de fibres

Un béton fibré est un béton dans lequel 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 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 [5].

I-5-1- Historique sur l'utilisation des bétons fibrés

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.

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.

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 [6]. 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 [7]. 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 [8]. 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 [9].

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)) [10].

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 [11].

I-5-2- Le rôle 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. Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives [12].

Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à:

- la cohésion du béton frais ;
- la déformabilité avant rupture ;
- la résistance à la traction par flexion ;
- la ductilité et la résistance post fissuration ;
- la résistance aux chocs ;
- la résistance à la fatigue ;
- la résistance à l'usure ;
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges;
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures;
- la tenue au feu ;
- la résistance à l'abrasion.

I-5-3- Les différents 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.

On distingue trois grandes familles de fibres, qui sont : [12]

- Les fibres métalliques (acier, inox, fonte) ;
- Les fibres organiques (polypropylène, carbone, polyester) ;
- Les fibres minérales (verre).

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 dont 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.

I-5-4- Caractéristiques de certains types de fibres

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques.
[13]

Tableau I-4: Caractéristiques des fibres [13].

	Masse volumique (en g/cm ³)	Diamètre moyen (en µm)	Résistance à la traction (en N/mm ²)	Module d'élasticité (en GPa)	Allongement de la rupture (en %)
Fibres métalliques	7,85	50 - 1000	1000 - 2500	150 - 200	3 - 4
Fibres de verre	2,6	9 - 15	2000 - 3000	80	2 - 3,5
Fibres polypropylène	0,9	> 4	500 - 750	5 - 10	10 - 20
<i>Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres</i> Longueur des fibres : 5 à 60 mm Coefficient de dilatation : 1 à 90 µm/m °C					

I-5-5- 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. 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.

I-5-5-1- Les fibres de polypropylènes

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Elles se caractérisent par leur faible densité. Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement, mais peu résistantes au feu (température de fusion d'environ 160°C). Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le

béton. Leur diamètre est de l'ordre de 100 μm et leur longueur comprise entre 10 et 30 mm [12].



Figure I-2 : Fibres de polypropylènes [13]

Les fibres de 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 du béton projeté [14].

Les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène:

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

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

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

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

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

I-5-6- 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 d'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 [15].

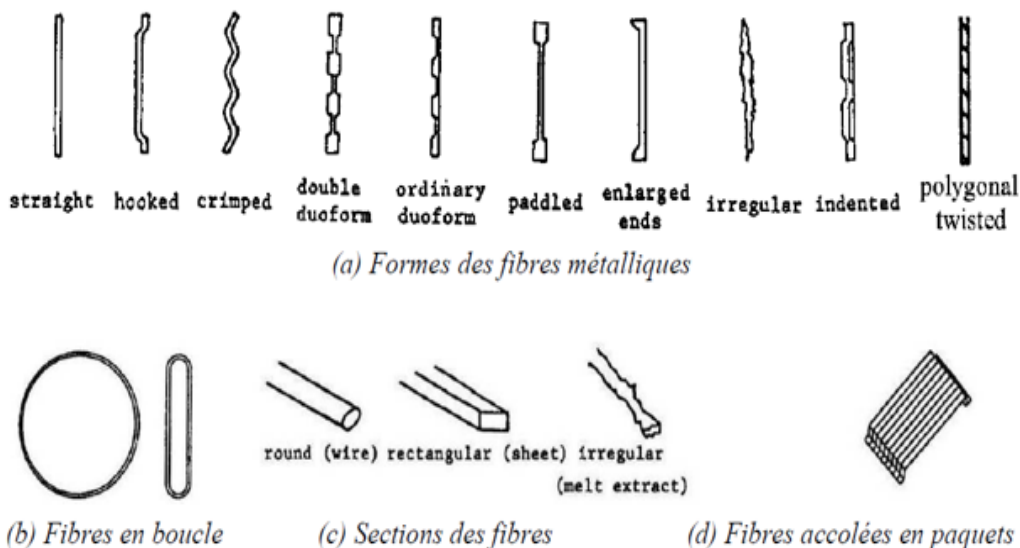


Figure I-3 : Différents types de fibres métalliques [15].

❖ Influence des fibres métalliques dans les bétons structurels

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

Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture.



Figure I-4 :Fibres métalliques [16].

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

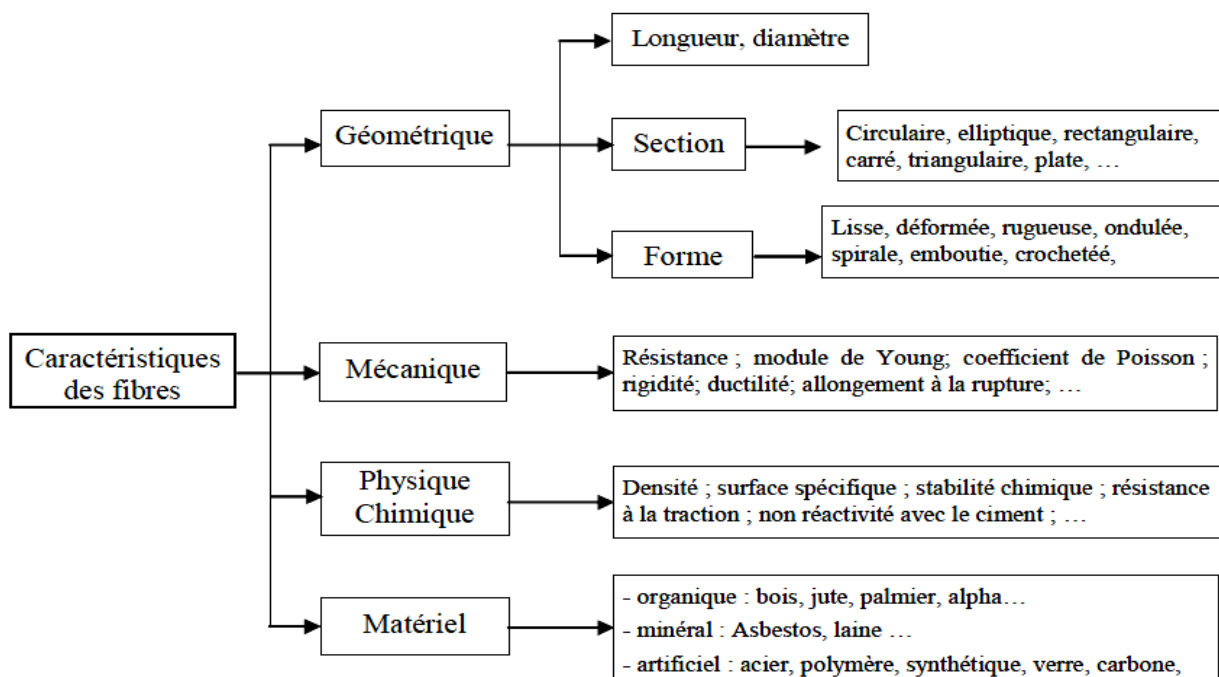


Figure I-5: Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres[15].

I-5-7-Applications des bétons de fibres

Parmi les principales applications à base de béton de fibres on peut citer [17-18] :

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



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 I-6:Exemples d'applications du béton de fibres [17].

I-5-8-Fabrication des bétons 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 le diamètre) qui peuvent influencer d'une part sur l'ouvrabilité et la mise en œuvre et d'autre part sur 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.

I-6- Conclusion

Dans cette partie nous sommes revenus sur les généralités des bétons et ses constituants. Où nous avons présenté les différents types de granulats et l'effet d'utilisation des adjuvants dans les bétons. Par la suite, nous nous sommes focalisées sur le béton de fibres, où nous avons donné les différents types de fibres, leur rôle dans le béton, ainsi que les applications essentielles des bétons de fibres.

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. L'incorporation de fibres dans les bétons améliore significativement leurs performances mécaniques.

Chapitre II

Béton soumis à haute
température

INTRODUCTION

Il est bien connu que la sécurité et la serviabilité des structures en béton ne peut être réalisée sans la connaissance complète des propriétés fondamentales du matériau et les conditions de service auxquelles les structures seront soumises.

L'incendie est l'une des conditions sévères à laquelle le béton peut être soumis. L'exposition du béton à une température élevée provoque des modifications physicochimiques que subissent la matrice cimentaire et les granulats), telles que la déshydratation par séchage du béton et la décarbonatation. Ces phénomènes peuvent produire des retraits et des pertes de résistance et de raideur des matériaux.

II.1 MICROSTRUCTURE DES MATERIAUX A MATRICE CIMENTAIRE SOUMIS A UNE HAUTE TEMPERATURE

L'élévation de température entraîne des phénomènes très complexes dans le béton, dont la prévision s'avère plutôt difficile, notamment à cause de son hétérogénéité et des changements de phases. Ces changements de phases sont dus, en particulier au départ de l'eau chimiquement liée, se traduisant par une augmentation considérable de la porosité du béton (Figure II.1 et Figure II.2) qui entraîne alors de forts changements de la microstructure du béton et donc un changement des propriétés mécaniques, thermiques, hydriques du celui-ci.

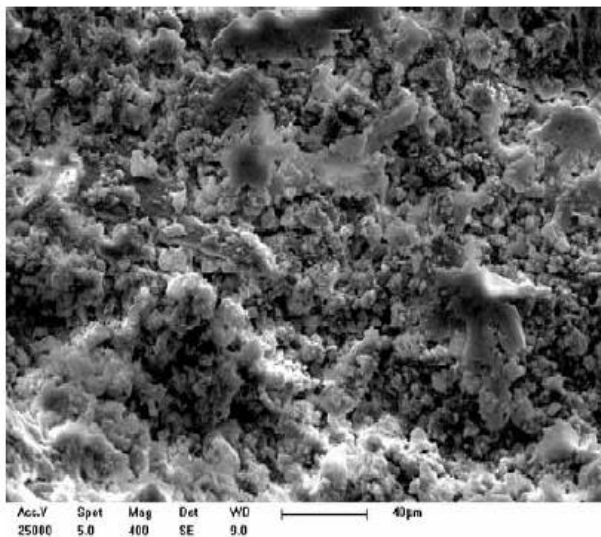


Figure II.1 : Aspect normal d'une pâte de ciment n'ayant pas subi d'échauffement (observation au MEB ($\times 400$) [19].

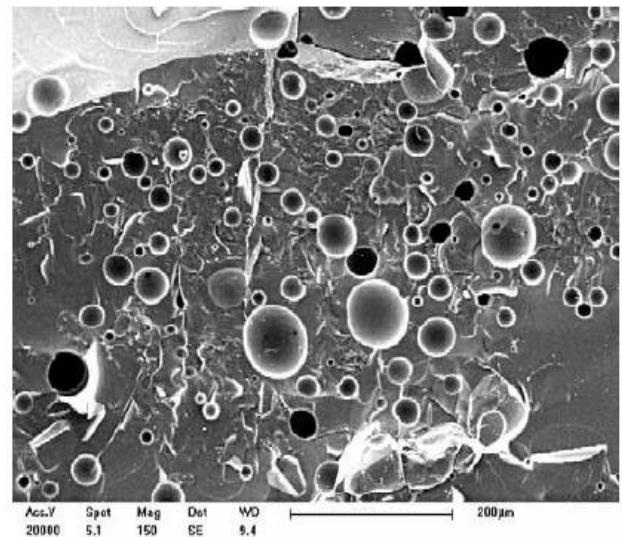


Figure II.2 : Matrice cimentaire vitreuse présentant une macroporosité très importante. Ce phénomène se produit au –delà de 1000°C et provient de la fusion puis du refroidissement de la pâte du ciment (Observation au MEB ($\times 150$) [20].

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées dans le Tableau 1.1 [5].

Après refroidissement du béton, certaines phases minérales de la pâte de ciment, telles que la chaux vive (CaO) ou l'anhydrite (CaSO₄) peuvent se réhydrater lors d'un apport d'eau et produire éventuellement un gonflement.

II.2 ENDOMMAGEMENT THERMIQUE

Les mécanismes de dégradation du béton à haute température ne sont pas encore bien compris [28]. Les effets de la température élevée sur les propriétés du béton ont été rapportés dès les années 1940. L'actualité fournit aussi des exemples dramatiques incendie de bâtiments. Ces différents exemples 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 1 illustre quelques dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'un incendie.



Figure II.3 :Dégradation d'ouvrages en béton suite à un incendie [21].

Selon la durée de l'incendie, les dégâts apparents sur un élément en béton peuvent se présenter sous forme d'un écaillage superficiel, d'une décohésion généralisée du béton (la ruine totale de l'ouvrage) (Figure 2), ou bien d'une chute de caractéristiques mécaniques des armatures de surface (perte d'adhérence, éclatement de l'enrobage).



Figure II.4 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre, 2001 thèse doctorat 2007 Anaba.

II.3 Parametres et phenomenes favorisant l'instabilite thermique du beton

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

II.3.1 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]).

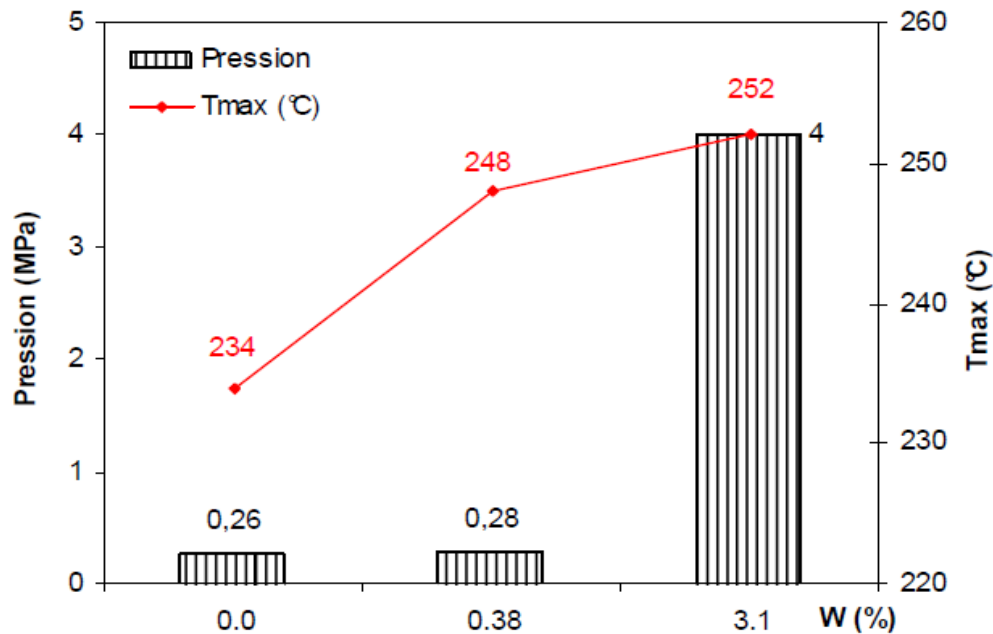


Figure II.5 :Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [25].

II.3.2 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 :

II.3.3 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 bétons soumises à des cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$ conduisent à des éclatements d'éprouvettes tandis que celles soumises à la vitesse de chauffage de $0,1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$ n'éclatent pas.

II.3.4 La nature des granulats

Le comportement des granulats diffère lorsqu'ils sont soumis à une haute température et cela selon leur nature chimique et minéralogique. 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. Les essais de chauffage jusqu'à 200°C de granulats silico-

calcaires réalisés par certains chercheurs montrent un clivage violent des granulats de silex pour une gamme de température de 110°C à 165°C [30 –31].

II.4 DEFORMATIONS THERMIQUES DU BETON

II.4.1 Déformation thermo hydrique libre du béton

La déformation thermique libre du béton dépend de sa composition, de la nature des granulats et de différentes transformations physico-chimiques, qui ont lieu durant le chauffage. Lors du chauffage, la pâte de ciment subit deux phases : la phase d'expansion et ensuite la phase de retrait. La comparaison des déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats, menée par Pista (Piasta 1989), montre que le coefficient de dilatation thermique du béton dépend de celui des granulats. La déformation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéaire dépendante de la température. Après 150°C, la pâte de ciment se rétracte. L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment provoque à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. La Figure 3 présente l'évolution de dilatation thermique apparente de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température.

Les travaux de Kodur (Kodur 2014) sur le béton ordinaire montrent une augmentation de la déformation thermique de 1,3 % à 700°C. L'auteur explique cette augmentation par l'expansion thermique des granulats et le retrait de la pâte de ciment au sein du béton. Il est intéressant de noter que la déformation thermique libre du béton reste constante de 700°C à 1000°C.

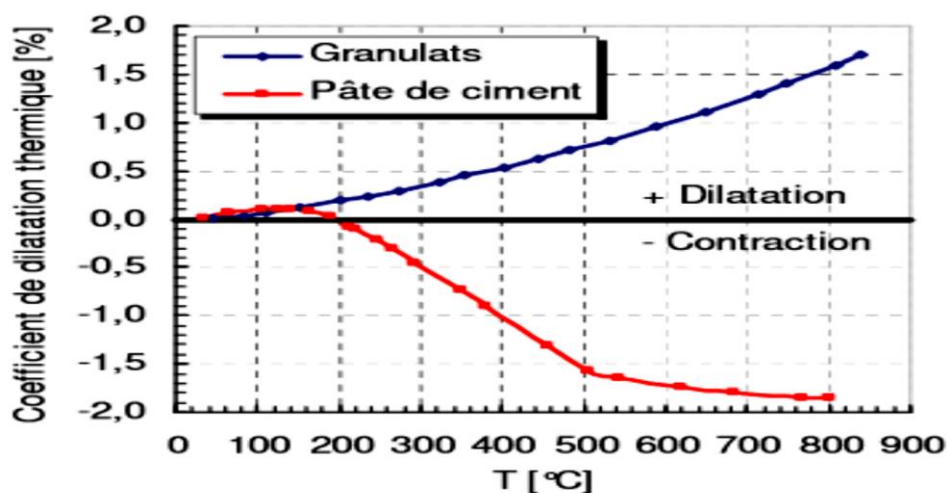


Figure II. 6 : Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température .

II.4.2 Evolution des propriétés physiques

Les phénomènes entraînés par la variation de température ont des conséquences sur les propriétés de transfert du béton. La perméabilité et la porosité évoluent sous l'effet de la température. Multiples travaux ont démontré l'augmentation de ces deux paramètres après l'exposition du béton à hautes températures (Noumowé 1995), (Kalifa, Chéné, and Gallé 2001), (Menou 2004), (Hager 2004), (Zeiml et al. 2006), (Choinska 2006), (Mindeguia 2009). Les interactions entre les propriétés physiques et mécaniques sont évidentes, par exemple, la croissance de la porosité et de la perméabilité induit, dans la majorité des cas, une diminution de résistance mécanique du matériau.

II.4.3 Evolution des Propriétés Mécanique

II.4.3.1 comportement en compression

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

De nombreux essais montrent une diminution de la résistance à la compression du béton entre 20 et 80°C.

Plusieurs études regroupent en deux zones le comportement résiduel du béton à la compression :

- De la température ambiante à 250°C (400°C) : une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance est observée (Bilodeau, Kodur, and Hoff 2004), (Kanema 2007), (Phan 2008).
- De 250°C (400°C) à 600°C : une chute de la résistance à la compression est notée (Hager 2004), (Pliya 2010).

La variation des propriétés mécaniques des bétons évolue différemment selon que l'essai soit réalisé à chaud ou à froid (essai résiduel). La Figure (II.7) présente une évolution de la résistance à la compression relative du même béton à chaud et à froid. Nous constatons que la résistance à chaud est supérieure à la résistance résiduelle pour toutes les températures après 150°C. Ceci peut être expliqué par un endommagement supplémentaire du béton au cours du refroidissement (réhydratation de la chaux, décomposition des granulats, changement du signe de gradient thermique) (Hager and Pimienta 2004).

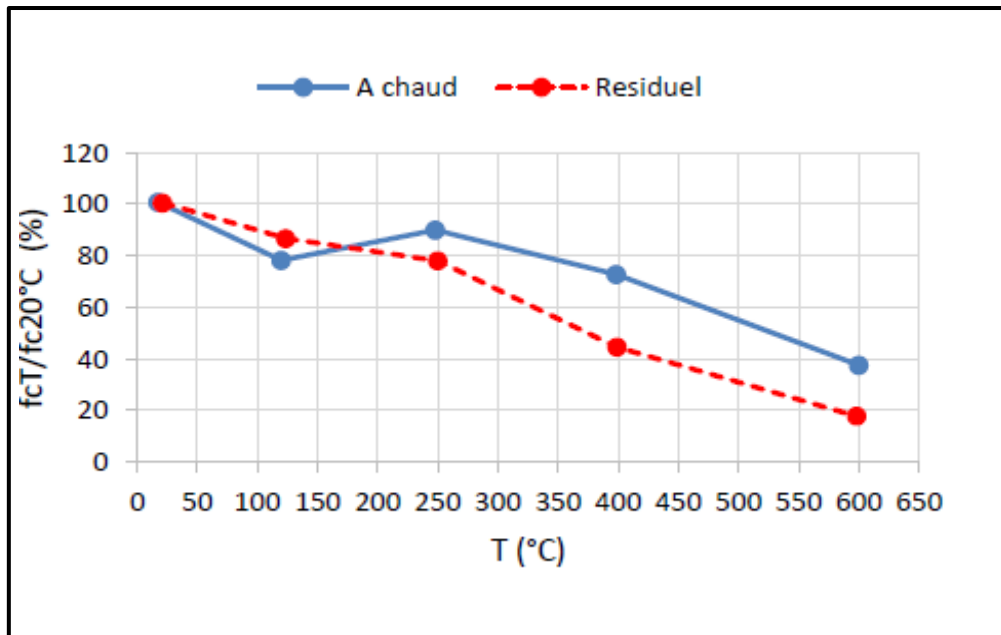


Figure II.7: Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid).

Behnood (Behnood and Ghandehari 2009) a testé les bétons de fibres de polypropylène avec des dosages de 1 kg/m^3 ; 2 kg/m^3 ; 3 kg/m^3 (Figure II.8). Les résultats ont montré une légère amélioration de la résistance à la compression des bétons fibrés par rapport aux bétons de référence. Le dosage de 2 kg/m^3 présente les meilleures performances mécaniques de 200 à 600 $^{\circ}\text{C}$. L'auteur préconise le dosage de 2 kg/m^3 comme un optimum parmi les trois dosages testés. Les résultats de Khaliq (Khaliq and Kodur 2011) et de Behnood (Behnood and Ghandehari 2009) sur les bétons de fibres de polypropylène (1 kg/m^3) n'ont pas montré d'amélioration significative de la résistance à la compression avec l'évolution de température. Il est possible que l'incorporation de fibres de polypropylène génère des porosités supplémentaires lors du traitement thermique du béton et réduit la résistance à la compression. De plus, les fibres métalliques (42 kg/m^3) et le cocktail de fibres ($42 \times 1 \text{ kg/m}^3$) n'ont pas donné d'effet favorable vis-à-vis de la résistance à la compression (Khaliq and Kodur 2011).

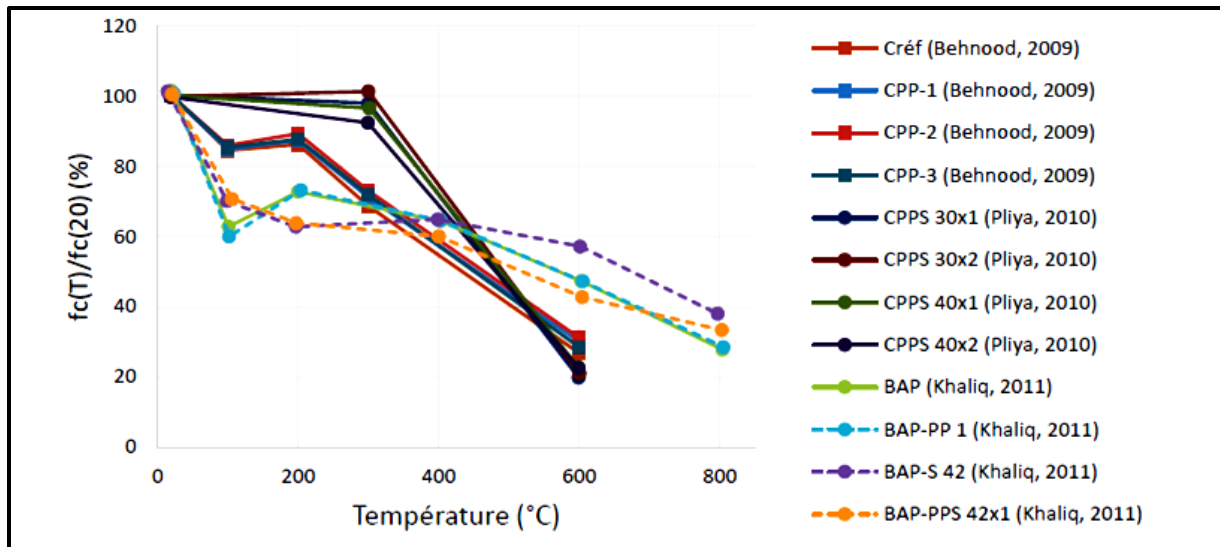


Figure II.8 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de béton de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène [22].

II.4.3.2 Résistance à la traction

Lors des incendies, des microfissurations apparaissent sur les parties sous tension de la structure. Une résistance élevée à la traction permet de limiter les dommages structurels de l'élément en limitant la propagation des fissurations notamment lorsque le processus d'écaillage est entamé.

Sur la Figure 20 nous avons collecté plusieurs résultats de résistance à la traction résiduelle par fendage des bétons de référence et des bétons fibrés.

Chen et al. (Chen and Liu 2004) ont testé la résistance à la traction par fendage des bétons à hautes performances (HSC) contenant des fibres de polypropylène (HSC-P), des fibres de carbone (HSC-C), des fibres métalliques (HSC-S) et trois cocktails de fibres métalliques (S), carbone (C) et polypropylène (P) (HSC-C-S, HSC-C-P et HSC-S-P) (Figure II.9). La résistance à la compression des bétons sans fibres à 28 jours était de 82 MPa. Les bétons de fibres de polypropylène (0,6 % en volume) montrent une amélioration de la résistance résiduelle à la traction d'environ 20 % par rapport aux bétons sans fibres pour les températures de 600 et 800°C. En ce qui concerne les bétons de fibres métalliques, les auteurs trouvent que la fraction volumique de 1 % (78 kg/m³) de fibres métalliques génère une amélioration de 40 % de la résistance résiduelle relative à une température de 400°C. A la température de 800°C, cette amélioration atteint 30 %.

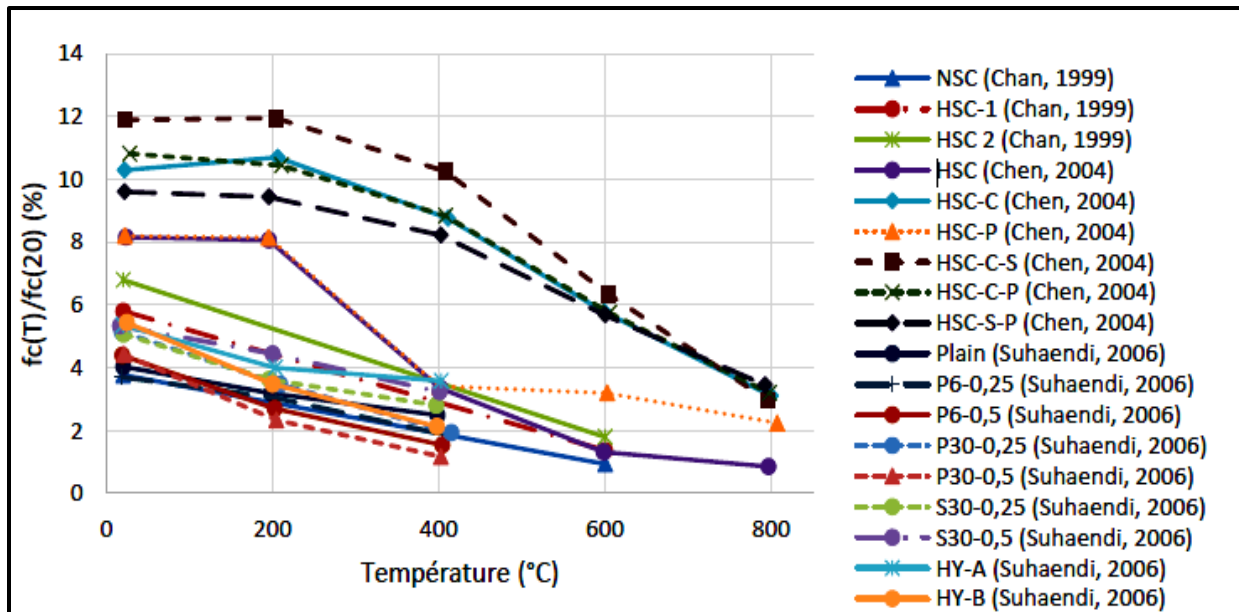


Figure II.9: Différents résultats de la résistance à la traction résiduelle relative [22].

II.5 Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis a une température élevée

L'étude des bétons contenant des fibres de polypropylène montre une baisse de pic de pression de vapeur avec la montée en température. Cette diminution est liée au volume de fibres. 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'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. Alors que d'autres chercheurs constatent une diminution des propriétés mécaniques.

II.5.1 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.

Certains auteurs, [33 – 34] ont montré que l'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton réduit considérablement l'éclatement. 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. [32] montre des pics sur les courbes d'ATD des fibres (Figure II.10). 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.

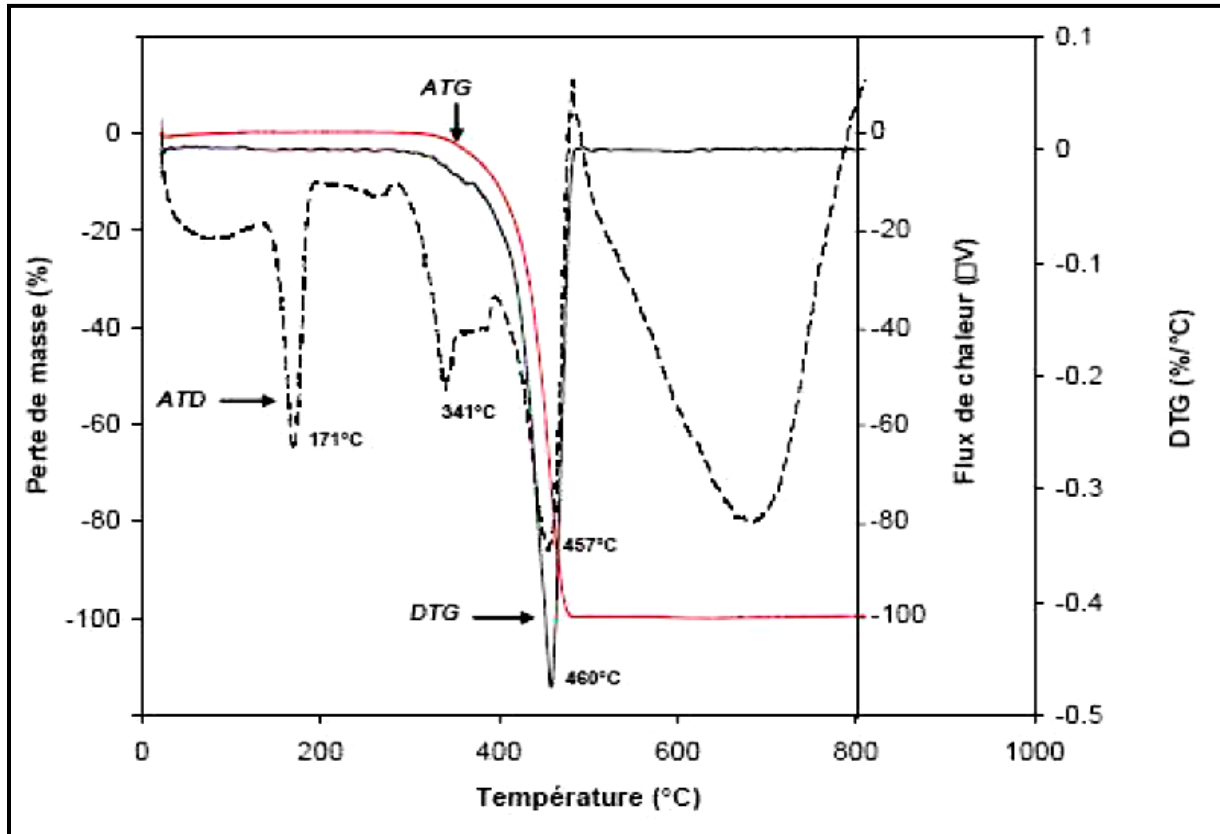


Figure II. 10: Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène[48].

II.5.2 perte de masse du béton

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 [35].

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 [36].
- 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[37]

- 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 [38] et [25].

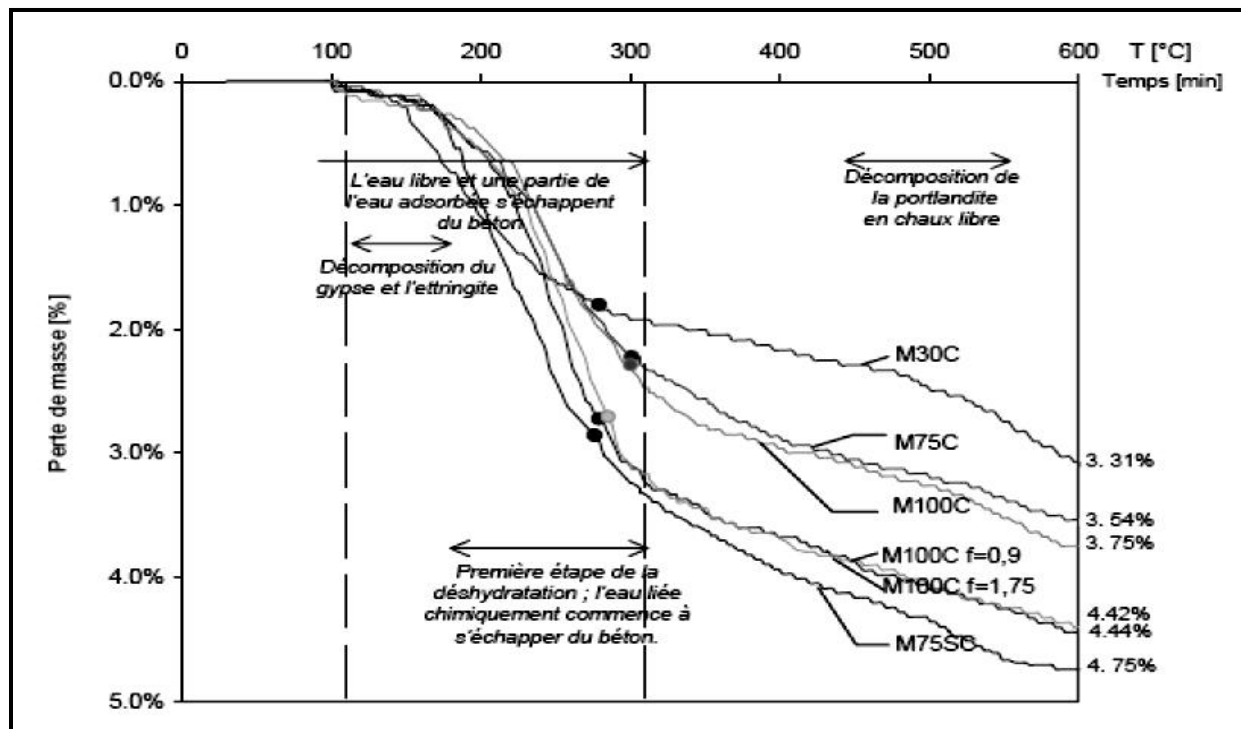


Figure II. 11: Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$, [25].

II.5.3 Porosité

Différentes études ont été réalisées sur la variation de la porosité de béton en fonction de la température. Les travaux sur les bétons ordinaires, les bétons à hautes performances, les bétons autoplacants ont montré une augmentation progressive de la porosité de ces bétons en cours de l'élévation de la température. La Figure (II.12) regroupe les études réalisées par Tsimbrovska (Tsimbrovska 1997) et Fares (Fares 2009) sur l'évolution de la porosité à l'eau en fonction de la température. Les travaux de Tsimbrovska (Tsimbrovska 1997) portent sur un BO (36 MPa) et un BHP (110 MPa) soumis à un chauffage à $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A la température de 200°C , l'auteur observe une augmentation de 0,9 % et 1,8 % de porosité pour le BO et le BHP respectivement. Fares (Fares 2009) a testé les bétons autoplacants (BAP) (54 MPa), les bétons vibrés (41 MPa) à un chauffage à $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à 600°C . L'auteur a constaté que la porosité augmente, quel que soit le béton (BO, BHP ou BAP).

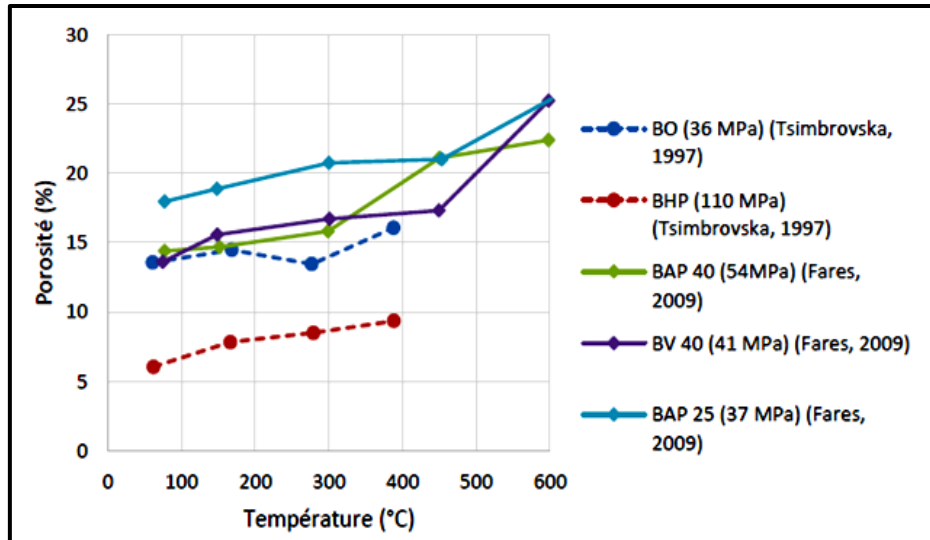


Figure II.12 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température (Tsimbrovska 1997), (Fares 2009) .[22].

II.6 Influence des fibres d’acier et de polypropylène sur le comportement du béton a haute températures

II.6.1 Résistance en compression

II.6.1.1 Comportement avec fibres d’acier

La Figure (II.13) regroupe les études de plusieurs auteurs sur l’évolution de la résistance résiduelle et la résistance à chaud de bétons à hautes performances non renforcés et renforcés de fibres d’acier.

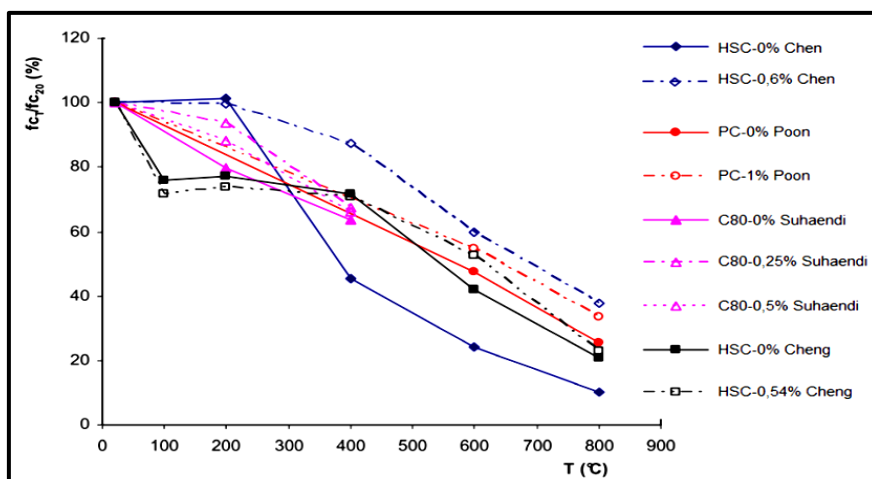


Figure II.13 : Évolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres d’acier.[22].

L'ensemble des résultats indique une diminution progressive de la résistance avec l'élévation de la température. La Figure (II.13) révèle que l'introduction de fibres d'acier améliore nettement les résistances résiduelles ou à chaud en compression [22].

II.6.1.2 Comportement avec fibres de polypropylène

La Figure (II.14) récapitule les études de plusieurs auteurs sur l'évolution de la résistance résiduelle et la résistance à chaud de bétons à hautes performances non renforcés et renforcés de fibres de polypropylène.

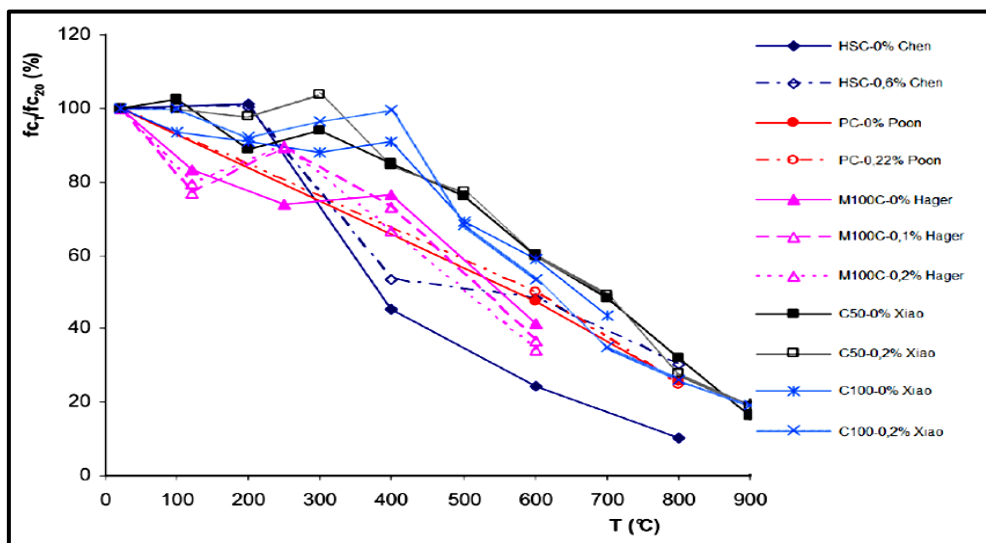


Figure II.14 : Évolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres de polypropylène.[22].

Les travaux menés par Chen et ses collaborateurs sur l'évolution de la résistance résiduelle des bétons fibrés de 0,6% de polypropylène montrent une augmentation plus significative après la température de 400°C (vitesse de montée en température 10°C/min).

L'étude de Poon et al est axée sur l'influence des fibres de polypropylène (0,22% en volume) dans les différentes compositions de béton avec ou sans fumée de silice. Deux cycles de chauffages 600°C et 800°C ont été réalisés avec une vitesse de chauffe de 2,5°C/min. Les résultats obtenus montrent, en présence de fumée de silice, une baisse de résistance résiduelle relative en compression de 4% et 7% après le chauffage à 600°C et 800°C (fibres de polypropylène) [22].

II.6.2 Résistance en traction

II.6.2.1 Comportement avec fibres d'acier

La Figure (II.15) rassemble les courbes de comportement en traction en fonction des températures d'essais.

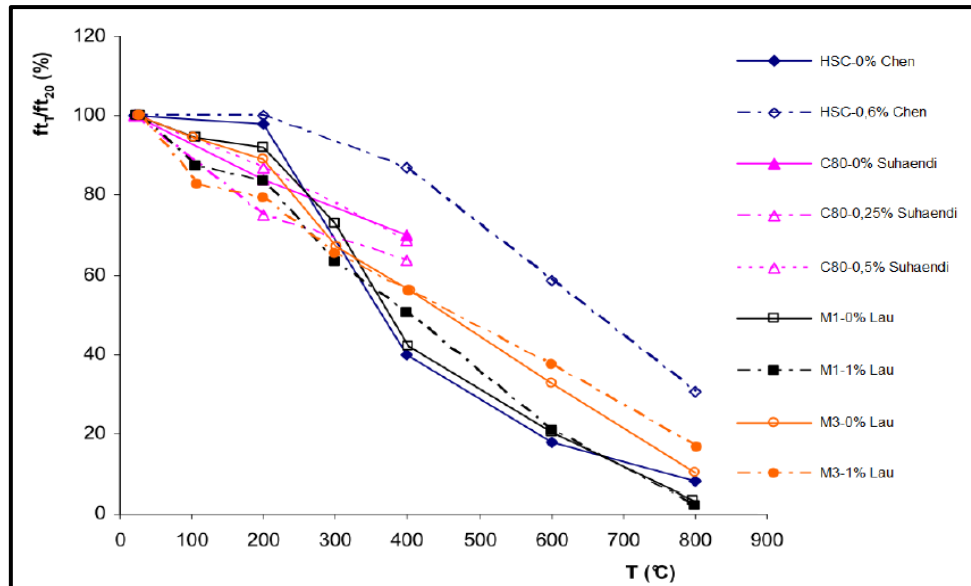


Figure II.15 : Évolution de la résistance résiduelle relative en traction en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres d'acier.[22].

Les résultats montrent une diminution progressive avec la température de la résistance en traction avec fibres d'acier tout comme les bétons sans fibres. Les auteurs, à travers leurs études, ont montré que l'addition de fibres d'acier améliore nettement les résistances résiduelles [22].

II.6.2.2 Comportement avec fibres de polypropylène

L'évolution de la résistance résiduelle relative à la traction obtenue par différents auteurs est illustrée par la Figure (II.16).

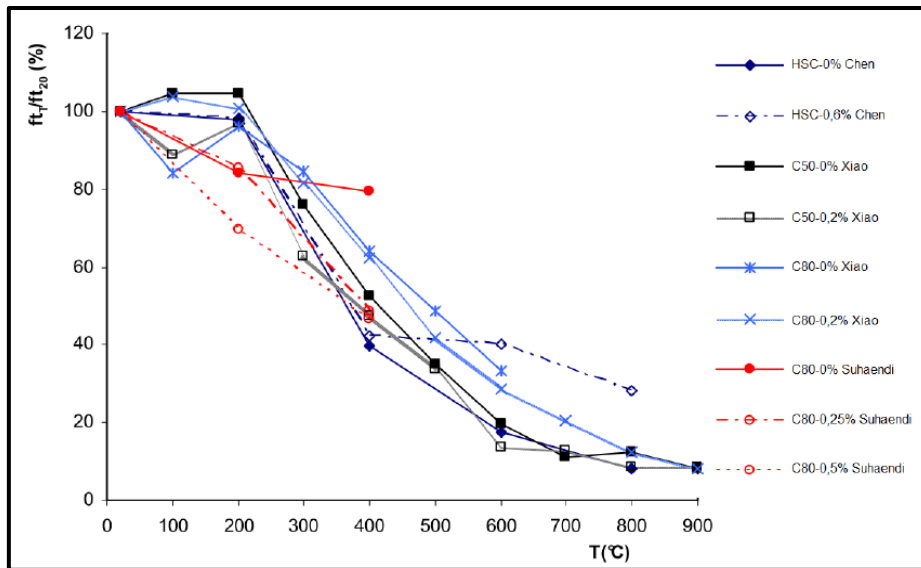


Figure II.16 : Évolution de la résistance résiduelle relative en traction en fonction de la température de bétons renforcés par différentes fractions volumiques en fibres de polypropylène.[22].

Sur un BHP renforcé de 0,6% de fibres de polypropylène, Chen et al n'observent pas d'influence significative des fibres jusqu'à la température de 400°C. Par contre, au-delà de cette température, la résistance résiduelle relative augmente d'environ 20% par rapport aux bétons non fibrés pour des cycles de chauffage de 600°C et 800°C. En revanche, les travaux de Xiao montrent que l'influence de fibres de polypropylène sur la résistance en traction par flexion n'est pas significative [22].

CONCLUSION

Le comportement à haute température du béton nous permet de mettre en évidence certains phénomènes physiques qui peuvent apparaître notamment lors de la dégradation du matériau. Cette étude, dans sa première partie, a révélé que l'évolution des propriétés mécaniques est fortement liée à l'évolution de la microstructure, au départ de l'eau et aux réactions de déshydratation. Ceci se traduit par l'évolution de la microfissuration thermique, et par l'augmentation non négligeable de la perméabilité des matériaux à matrice cimentaire (que ce soit après traitement thermique ou sous température).

Parmi les principaux paramètres significatifs qui influencent le comportement du mortier ou du béton à haute température sont la présence et la quantité d'eau dans le matériau.

Chapitre III

Programme expérimental

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. Nous avons confectionné plusieurs éprouvettes de béton. 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.

III.1 Types d'éprouvettes utilisées

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

- Les éprouvette de forme cylindrique normalisées et d'élanement 2 (10×20) cm norme NF P 18-400, NA 2600) utilisées pour la détermination des résistances à la compression.
- Les éprouvettes prismatiques normalisées (NF P18-400, NA2600) de dimensions 7x7x28 cm³ pour la détermination des résistances à la flexion 3 points.

III.2 Le Ciment

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

Tableau III.1 : Composition chimique du ciment

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

III.3 Le sable

Nous avons utilisé un sable roulé qui provient de l'oued, de diamètre maximum égal à 3 mm. Il est lavé pour réduire les impuretés puis séché à l'étuve à température 105°C pendant 24 heures.



Figure III.1 : Le sable utilisé.

III.4 Les granulats

Les granulats que nous avons utilisés, sont de nature concassés (3/8 et 8/16). Leur diamètre varie de 3 à 16 mm. Ils ont été lavés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24 heures puis conservés dans des sacs à l'intérieur du laboratoire afin d'avoir des granulats sec et propres.



Figure III.2 : Granulats utilisés.

III.5 Les adjuvants

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

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



Figure III.3 : Super-plastifiant.

III.6 L'eau

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

III.7 Analyse granulométrique

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 meilleurs 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 III.4 : Tamiseuse.

III.7.1 Principe de l'essai

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

III.7.2 Equipements utilisés

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

Description de l'essai

- Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme concassée, leur diamètre est de 0/3, 3/8 et 8/16. 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'éviter 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 (1,2,3).

Tableau III.2: Analyse granulométrique du sable (0/3).

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
3.15	0	0	0	0
2	55	2.75	2.75	97.25
1.25	740	37	39.75	60.25
0.5	820	41	80.75	19.25
0.315	275	13.75	94.5	5.5
0.16	95	4.75	99.25	0.75
0.125	10	0.5	99.75	0.25
Fond de tamis	5	0.25	100	0

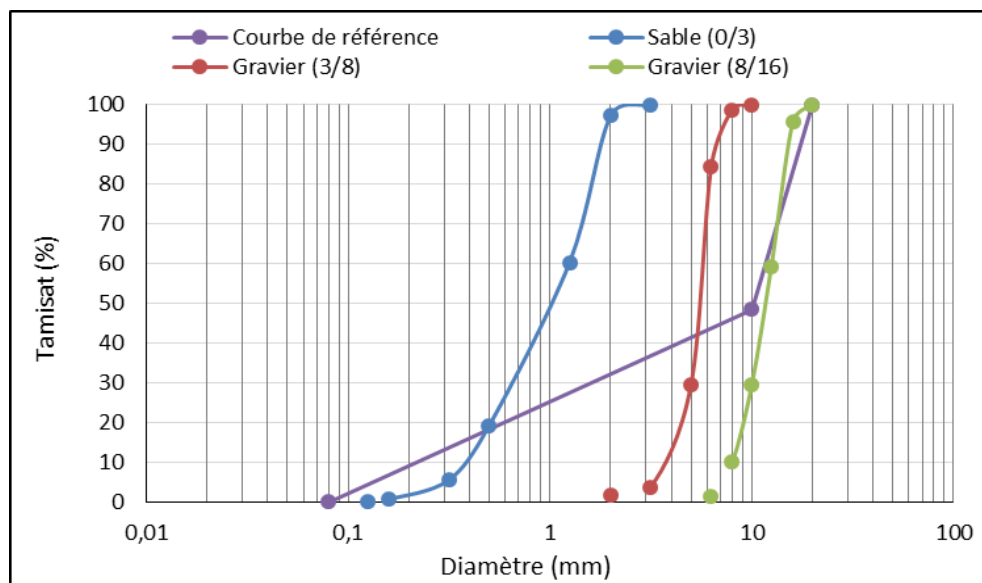
Tableau III.3 : Analyse granulométrique du gravier (3/8).

Dimension des tamis [mm]	Refus[g]	Refus cumulés[g]	Refus cumulés[%]	Tamisât[%]
10	0	0	0	100
8	25	25	1.25	98.75
6.3	285	310	15.5	84.5
5	1095	1405	70.5	29.5
3.15	520	1925	96.25	3.75
2	40	1965	98.25	1.75
Fond de tamis	35	2000	100	0

Tableau III.4 : Analyse granulométrique du gravier (8/16).

Dimension des tamis[mm]	Refus[g]	Refus cumulés[g]	Refus cumulés[%]	Tamisât[%]
20	0	0	0	100
16	85	85	4.25	95.75
12.5	730	815	40.75	59.25
10	595	1410	70.5	29.5
8	390	1800	90	10
6.3	170	1970	98.5	1.5
Fond de tamis	30	2000	100	0

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

**Figure III.5:** Courbes Granulométriques.

III.8 Module de finesse

Dans le tableau (III.1), la somme des refus nous donne 1995 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 : 3.15, 2, 1.25, 0.5, 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 : $2,8 < \text{Mf} < 3,2$
- Un module de finesse moyen correspond à un sable préférentielle $2,2 < \text{Mf} < 2,8$
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin $1,8 < \text{Mf} < 2,2$

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

$$\text{Mf} = \frac{99.25 + 94.5 + 80.75 + 39.75 + 2.75}{100} = 3.17$$

Mf= 3.17 on déduit que notre sable est un sable grossier

III.9 Masse volumique absolue et apparente

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue la masse volumique absolue et la masse volumique apparente. Les résultats sont représentés dans le tableau (III.4).

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

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.61	2.72	2.72
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.71	1.55	1.51

1. Composition de béton par la méthode de DREUX – GORISSE

Pour la formulation du béton ordinaire (béton témoin), nous avons choisi la méthode de DREUX-GORISSE qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour 1m³ 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].

Après calcul, les résultats de la composition sont donnés dans le tableau (III.5).

1.1 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 :

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

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

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

1.2 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 :

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

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 III.6 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire [6].

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 16mm	25 ≤ D ≤ 40mm	D ≥ 63mm
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 16 mm, ce qui donne un coefficient granulair $G=0,45$ donc c'est une bonne qualité de granulats.

➤ **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 m³ de béton :**

Connaissant le rapport C/E et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit, grâce à l'abaque (Figure III.7), le dosage en ciment correspondant :

$C/E = 2,069$
 $A \approx 6\text{cm}$ } L'abaque (Figure III.7) donne la valeur du dosage en ciment égale à $C = 400\text{Kg}$

$C/E \approx 2,069$
 $C = 400\text{Kg}$ } D'où, $E = 193,33\text{ Kg}$

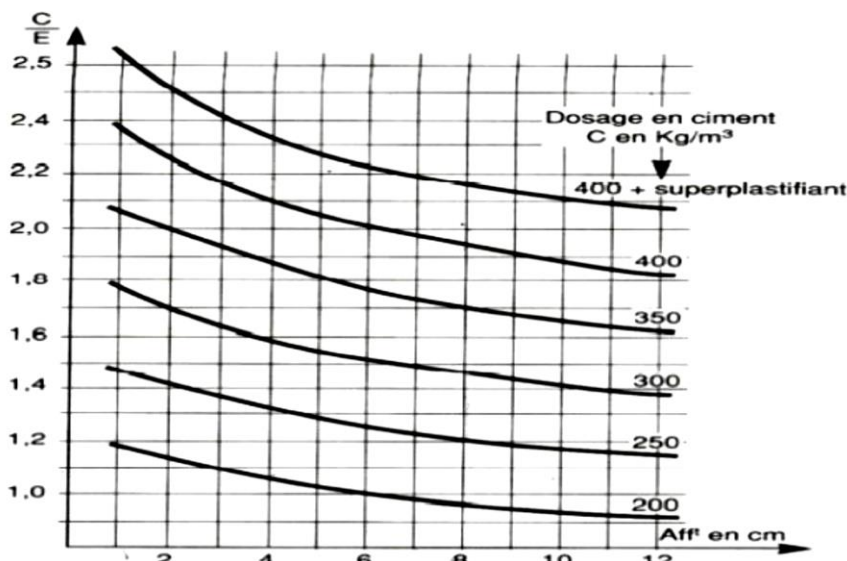


Figure III.6 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)[6].

➤ **Tracé de la courbe granulair de référence**

Cette courbe correspond au mélange des granulats (sable+gravier, 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 granulair 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 400 Kg/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 3.17, la valeur de K_s est calculée par la formule suivante :

$$K_s = 6M_f - 15 = 4.02$$

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

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

$$D'où : \quad Y = 50 - \sqrt{20} + 3.02 + 0 + 0 = 48.55$$

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 III.7 : les pourcentages des constituants.

Sable (0/3)	34%
Gravier (3/8)	9%
Gravier (8/15)	57%

➤ **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 et 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 :**

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

Avec :

m_c : dosage (en masse) de ciment.

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

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

$$V_G = 1000\gamma - V_C = 1000 \times 0.81 - 129.03 = 680.97 \text{ litre.}$$

• **Volume absolu du sable :**

$$V_S = V_G \times \frac{35.9}{100} = 680.97 \times \frac{34}{100} = 231.53 \text{ l/m}^3$$

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

$$V_{g(3/8)} = V_G \times \frac{10}{100} = 680.97 \times \frac{9}{100} = 61.3 \text{ l/m}^3$$

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

$$V_{g(8/15)} = V_g * 54.1/100 = 680.97 * 57/100 = 388.15 \text{ l/m}^3$$

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

- **Masse du sable :** $MS = VS * \gamma_s = 604.3 \text{ kg}$
- **Masse du gravier (3/8):** $M_{g(3/8)} = V_{g(3/8)} * \gamma_g(3/8) = 166.74 \text{ kg}$
- **Masse du gravier (8/16) :** $M_{g(8/16)} = V_{g(8/16)} * \gamma_g(8/16) = 1055.77 \text{ kg}$

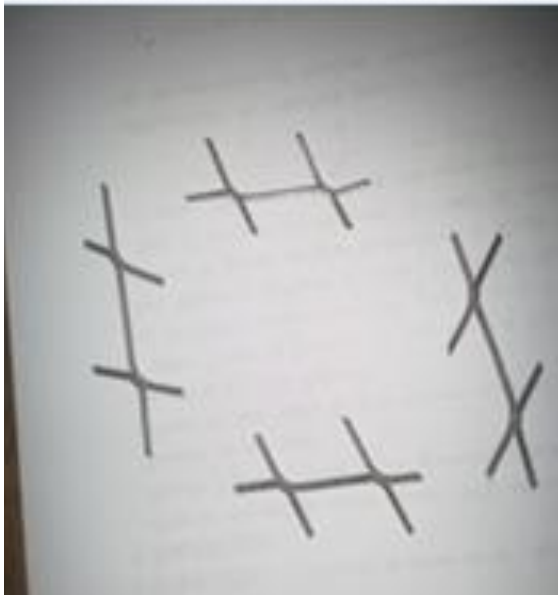
La composition pour 1 m³ de béton est donnée dans le tableau (III.7).

Tableau III.8 : Composition finale pour 1 m³ de béton.

Constituants	Dosage (kg/m ³)
Sable	604.3
Gravier 3/8	166.74
Gravier 8/15	1055.77
Eau	193.33
Ciment	400
E/C	0.483
Adjuvant	4
Fibres métalliques (FM)	0,490
Fibres de polypropylènes (FP)	0,147
Cocktail (FM + FP)	(0,245+0,0735)

2. LES FIBRES

Nous avons utilisé deux types de fibres : les fibres de polypropylène (FP) et les fibres métalliques (FM) voir figure (III.7). Leurs dimensions sont données dans le tableau (III.8).



Fibres Métalliques



Fibres polypropylènes

Figure III.7 : Les fibres utilisées.

Tableau III.9 : Les dimensions et caractéristiques des différentes fibres utilisées.

Dimension	Longueur [mm]	Largueur [mm]	Epaisseur [mm]	Densité [g/cm ³]
Fibres de polypropylènes	45	2	2	0.91
Fibres métalliques	60	2	2	7,85

3.PREPARATION DES EPROUVETTES

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

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

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

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

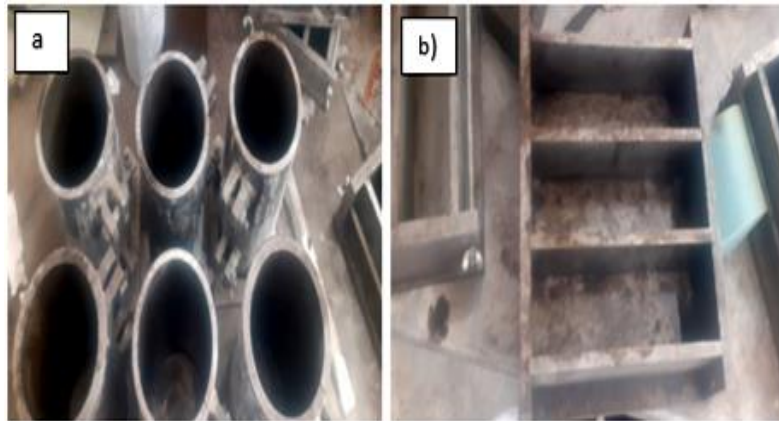


Figure III.8 : Les moules utilisés : a) cylindriques, b) prismatiques.

3.1 Confection du béton

Le gâchage comme le malaxage sont des opérations délicates. Il faudrait, d'une part, s'assurer d'une qualité d'enrobage acceptable, une bonne dispersion des fibres et d'autre part, éviter la ségrégation des granulats. La durée du malaxage et la vitesse de malaxage sont des facteurs primordiaux dans l'homogénéité du mélange. De plus, l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur peut éventuellement influencer les caractéristiques du béton.

Tous les mélanges ont été gâchés en suivant le même protocole, le béton a été réalisé dans un malaxeur à axe verticale. Pour chaque gâchée, 09 éprouvettes prismatiques et 09 éprouvettes cylindrique sont été réalisés.

Le malaxage du béton se fait comme suit :

- Déversement du sable, gravier et ciment dans le malaxeur et mise en marche pendant 1 min jusqu'à homogénéisation des matériaux,
- Introduction de l'eau de gâchage et super-plastifiant et malaxage pendant 2 min.
- L'introduction des fibres se fait dans cette dernière phase. Cette dernière phase permet d'assurer une meilleure dispersion des fibres dans le béton et une bonne homogénéisation du mélange.
- Les moules sont remplis en trois couches d'égale épaisseur, chaque couche étant compactée par la mise en marche de la table vibrante pendant 20 secondes.

3.2 Conservation des éprouvettes

Après la confection des échantillons, ces derniers sont recouverts d'un sac en plastique afin d'éviter toute évaporation de l'eau.



Figure III.9 : Epreuves après coulage.

Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans un bac à eau pendant 28 jours. Après cette cure toutes les éprouvettes ont été stockées dans la salle du laboratoire pour bien sécher jusqu'à la stabilisation de leurs masses. Les éprouvettes ainsi préparées seront soumises aux cycles thermiques (cycles chauffage-refroidissement).

3.3 Essais thermiques

Chaque cycle (chauffage-refroidissement) est composé de trois phases. La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$. 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.

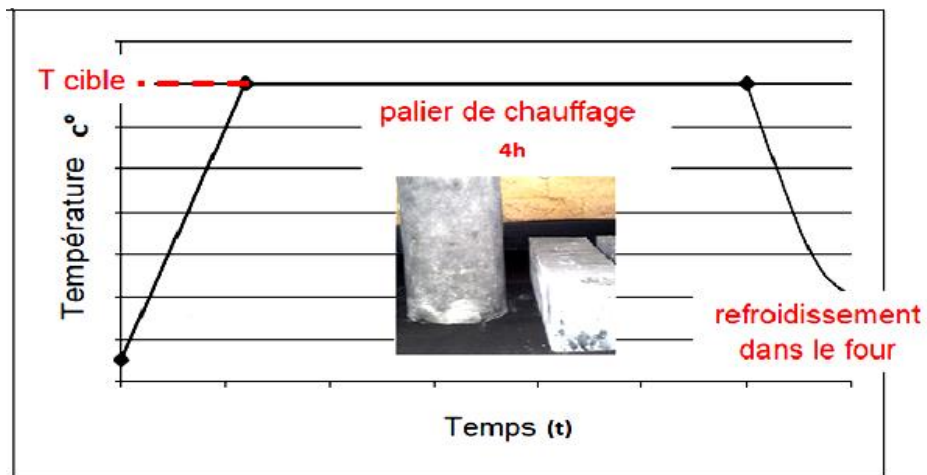


Figure III.10 : Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes.

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 III.11 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.

3.4 Essai de compression uni axial

Les essais sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques (ϕ 10 – 20) cm pour tous les cycles de chauffage. L'éprouvette est placée et centrée sur une presse hydraulique AUTO TEST puis soumise à un taux de chargement de 0.5 MPa/s jusqu'à la rupture (Figure III.12). La charge maximale atteinte est enregistrée et la contrainte de rupture en compression est obtenue par la formule suivante :

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

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

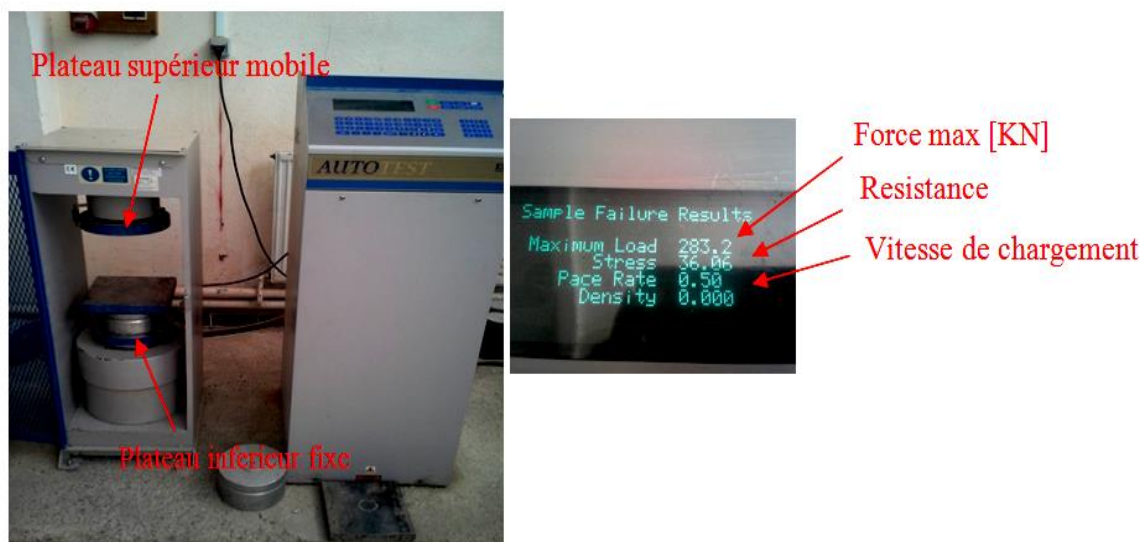


Figure III.13 : Presse hydraulique AUTO TEST.

3.5 Essai de traction par flexion trois points

Les essais sont menés sur des éprouvettes prismatiques de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen d'un rouleau supérieur et de deux rouleaux inférieurs (Figure III.14). Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs distancés de l ($l = 18 \text{ cm}$) et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieur et inférieur) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette. Conformément à la norme NF EN 12390-525 [Afnor, 2001], le chargement en deux points est effectué à une vitesse de 0.25 mm/mn jusqu'à la

rupture. La charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que la courbe contrainte-déplacement. La résistance en traction est obtenue par la formule suivante:

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

Avec :

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

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

b : largeur de la poutre, b = 70 mm

h : hauteur de la poutre, h = 70 mm.



Figure III.15 :Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés avec leurs caractéristiques ainsi que la formulation du béton. Deux paramètres ont été variés : le type de béton et la température des cycles de chauffage-refroidissement.

Chapitre IV

Interprétation des résultats

Introduction

Dans ce chapitre, on a étudié le comportement mécanique des bétons fibrés soumis à des températures de 600°C et 800°C. Les bétons sont formulés en faisant varier le type de fibres (métalliques, polypropylène et cocktail). Les bétons renforcés par des fibres sont caractérisés en compression et en flexion trois points. Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques (ϕ 10 – 20) cm et ceux de flexion ont été réalisés sur des prismes de dimension $(7 \times 7 \times 28)$ cm³.

Une synthèse des résultats des caractéristiques mécaniques (résistance en traction par flexion, résistance en compression) obtenus est présentée dans ce chapitre. Pour chaque condition opératoire, trois essais au moins ont été réalisés pour caractériser la reproductibilité et la dispersion des résultats obtenus. Les courbes de comportement sont présentées et analysées en parallèle pour chaque variante.

IV.1 Formulations

Plusieurs formulations de béton ont été confectionnées. Nous avons au total quatre familles de béton:

- ❖ BT : béton témoin (béton sans fibres),
- ❖ BFP: béton avec des fibres de polypropylène (0.3%),
- ❖ BFM: béton avec des fibres métalliques (1%),
- ❖ BFC :les bétons avec une association de fibres de polypropylène (0,15%) et fibres métalliques (0,5%).

IV.2 Perte de masse

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

L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière (ou de masse) qu'ont subi 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 :

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

Avec :

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

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

Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g.

Les résultats sont présentés dans la figure (IV.1).

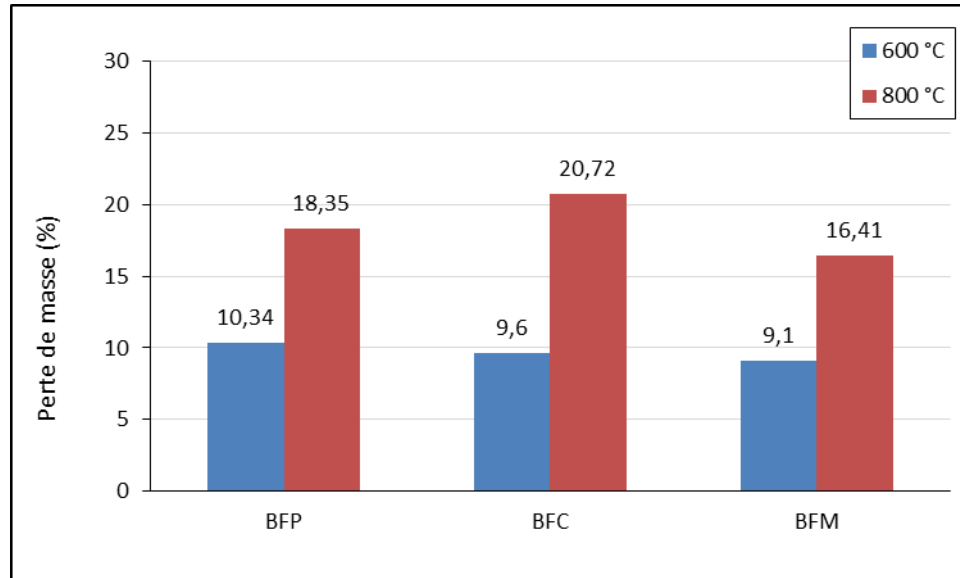


Figure IV.1 : Pertes de masse des différents bétons étudiés.

Le calcul de la perte de masse est une moyenne de trois valeurs, effectuée sur les éprouvettes cylindriques. On constate que plus la température augmente la perte de masse augmente. A 600°C, les différents bétons fibrés ont présenté une perte de masse presque de même grandeur. Alors que pour une température de 800°C, c'est le béton de fibres cocktail qui a présenté une perte de masse assez importante.

IV.3 Essai de compression

IV.3.1 Résistance à la compression

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

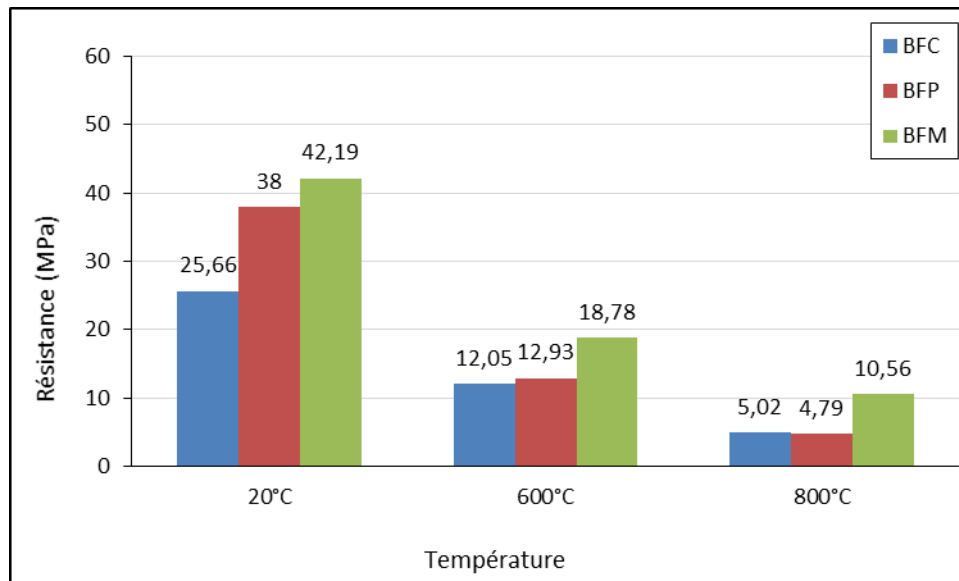


Figure IV.2 : Résistance à la compression des différents bétons.

Sur la figure (IV.2), pour toutes les températures, on remarque que les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté des résistances à la compression supérieures par rapport aux bétons de fibres de polypropylène (BFP) et au béton de fibres cocktail (BFC). A 800°C, on a une importante chute de résistance importante pour tous les types des bétons comparés aux bétons à 20°C. Elle est de l'ordre de 80% pour les bétons de fibres cocktail (BFC), de 87% pour les bétons de fibres de polypropylène et de 75% pour les bétons de fibres métalliques (BFM).

IV.3.2 Courbes contrainte-déformation à la compression

a) Influence de la température

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

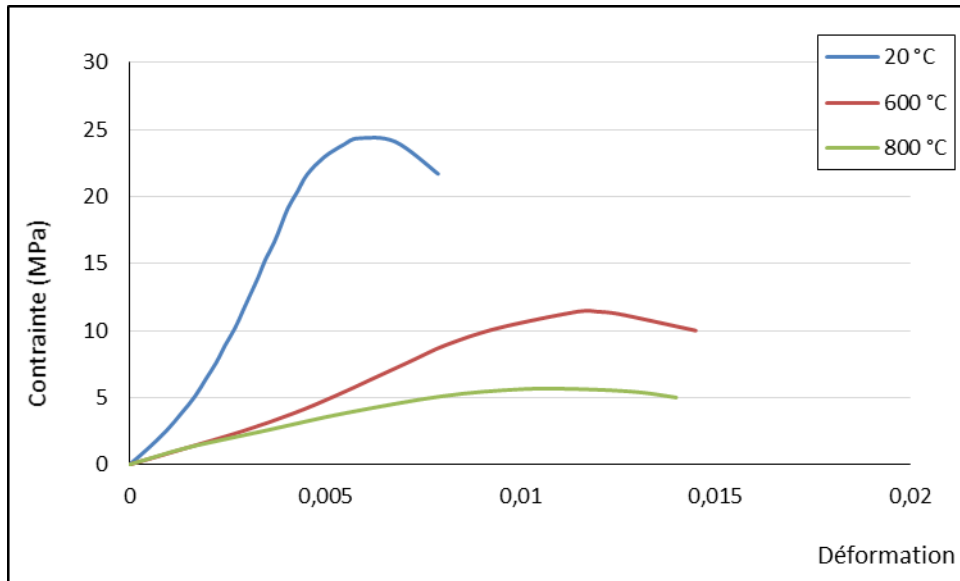


Figure (IV.3) : Courbes contrainte-déformation du béton de fibres cocktail (BFC).

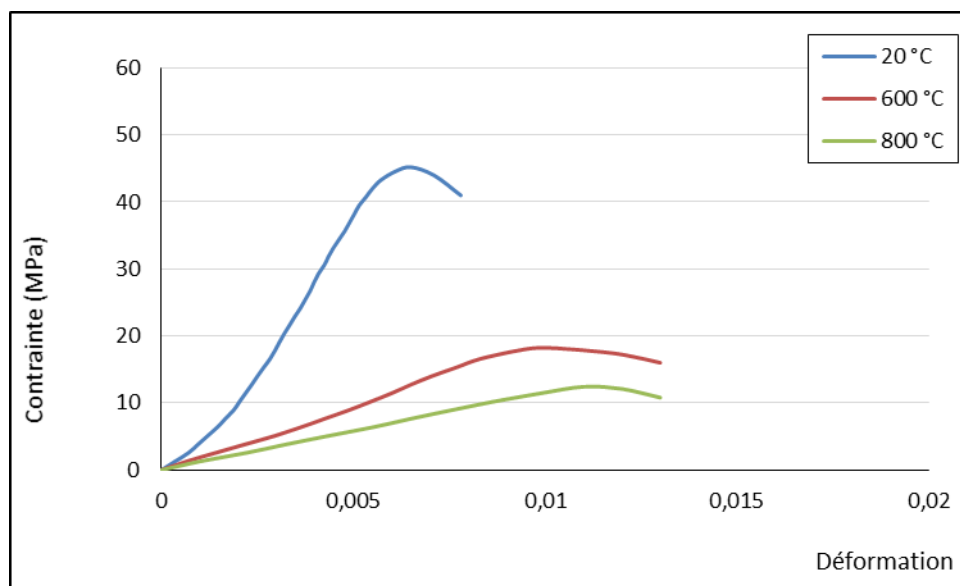


Figure (IV.4) : Courbes contrainte-déformation du béton de fibres métalliques(BFM).

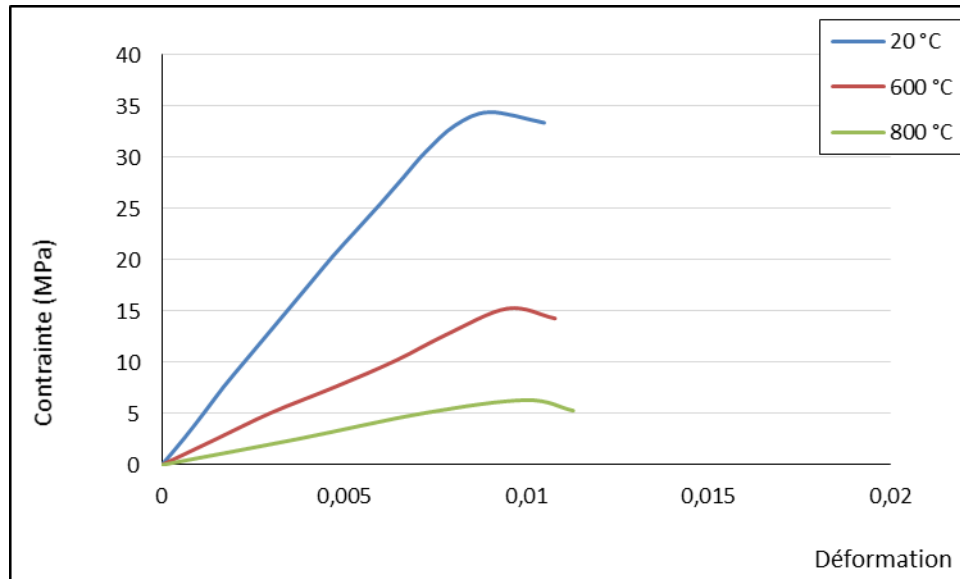


Figure (IV.5) : Courbes contrainte-déformation du béton de fibres de polypropylène(BFP).

Pour tous les types de béton étudié, on a constaté que les bétons soumis à des cycles chauffage-refroidissement pour les températures de 600°C et 800°C ont présenté des résistances inférieures ainsi qu'une diminution de la pente des courbes contrainte-déformation comparés aux bétons qui n'ont pas été soumis aux cycles de chauffage-refroidissement. Pour les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons de fibres cocktail (BFC), on a constaté une amélioration de la déformabilité.

b) Influence du type de fibres

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

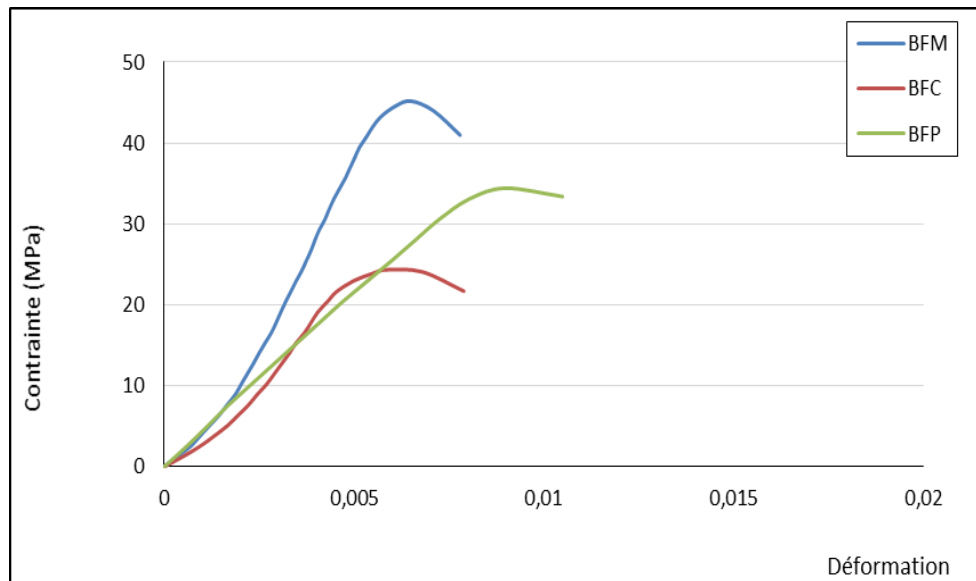


Figure (IV.6) : Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 20 °C.

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

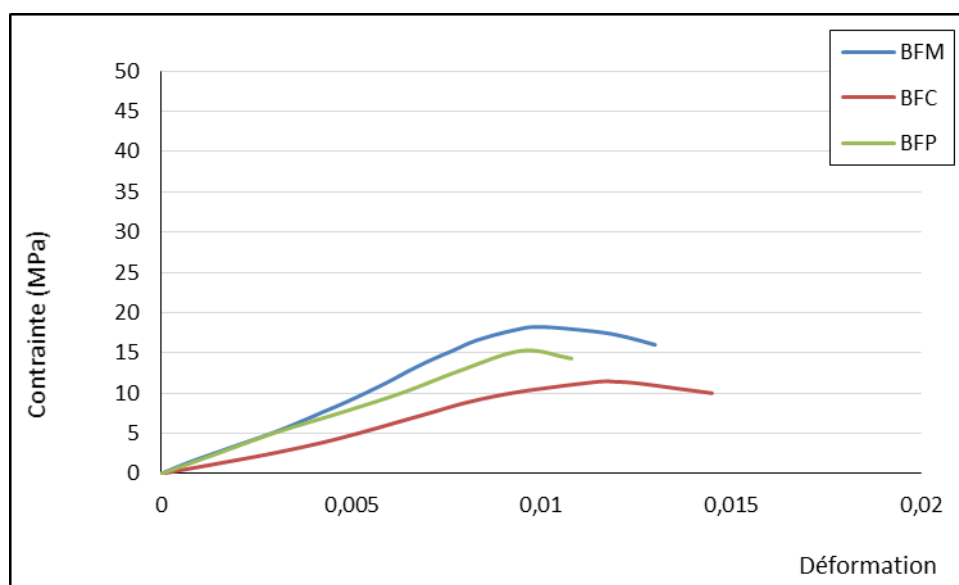


Figure (IV.7) : Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 600 °C.

A 600°C la contrainte de rupture de tous les bétons ne dépasse pas 20 MPa. Le béton de fibres métalliques a présenté une pente légèrement sur à celle des bétons de fibres de polypropylène et béton de fibres cocktail.

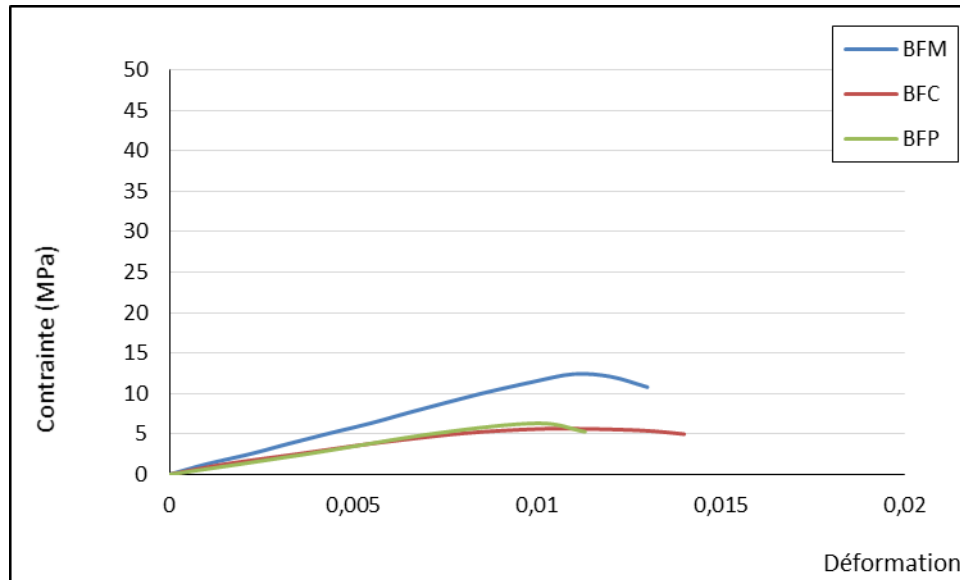


Figure (IV.8) : Courbes contrainte-déformation des bétons étudiés à 800 °C.

A 800°C, le béton de fibres de polypropylène et béton de fibres cocktail ont présenté les mêmes contraintes de rupture et même pente. Le meilleur comportement est donné par le béton de fibres métalliques.



Figure (IV.9) : L'aspect des éprouvettes cylindriques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.



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



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

En regardant l'aspect des éprouvettes à la sortie du four, on constate qu'il y'a apparition de fissures sous forme de faïençage pour les bétons de fibres métalliques et bétons de fibres de polypropylène. Le béton de fibres cocktail soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié de la surface latérale des cylindres.

IV.4 Essai de flexion trois points

La résistance en traction par flexion 3 points a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$. Les courbes force-déplacement ont été tracées pour chaque type de béton et pour chaque température étudiée.

a) Influence de la température

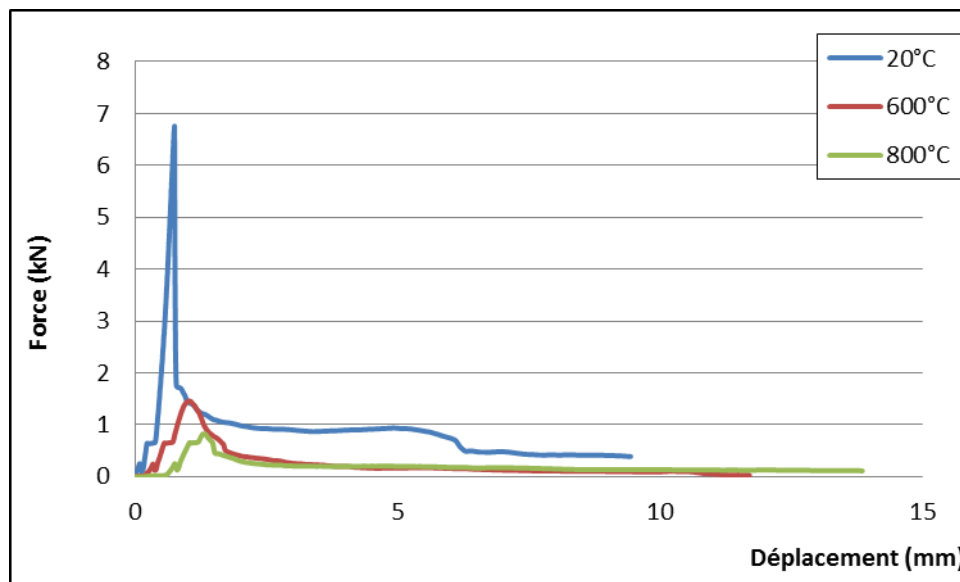


Figure (IV.12) : Courbes forces-déplacement du béton de fibres cocktail (BFC).

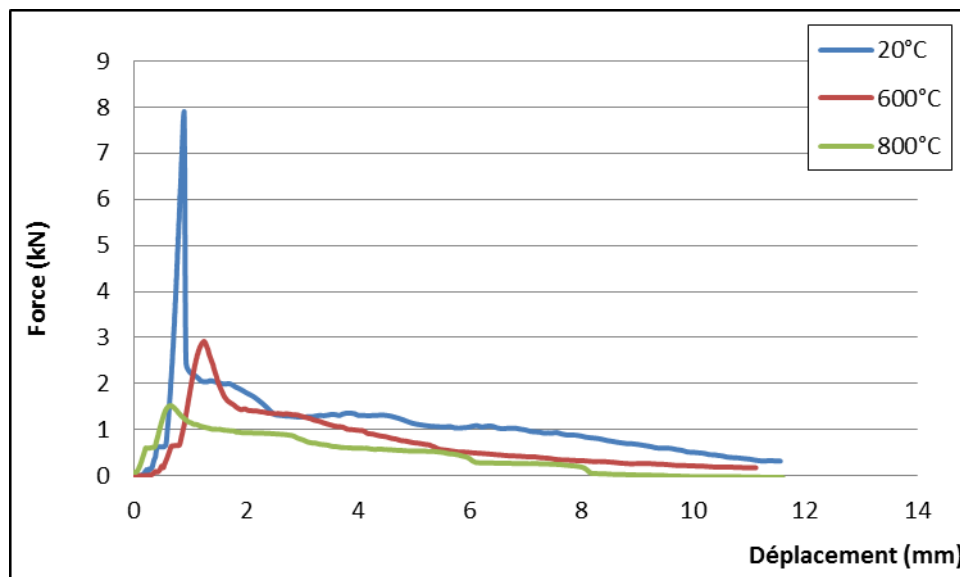


Figure (IV.13) : Courbes forces-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM).

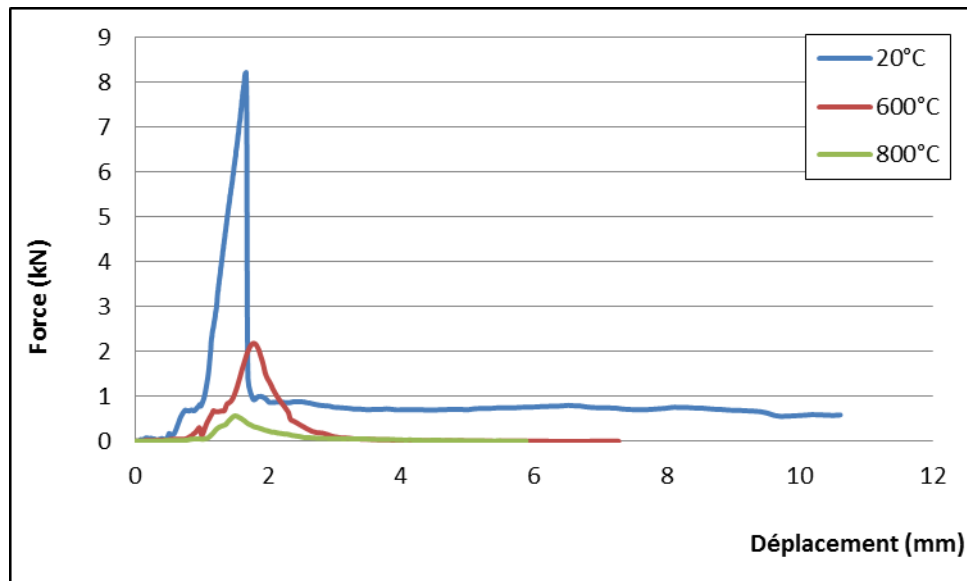


Figure (IV.14) : Courbes forces-déplacement du béton de fibres de polypropylènes (BFP).

En augmentant la température, la résistance à la flexion des différents types de béton étudié diminue. A 800°C, on constate une diminution assez importante des résistances.

b) Influence du type de fibres

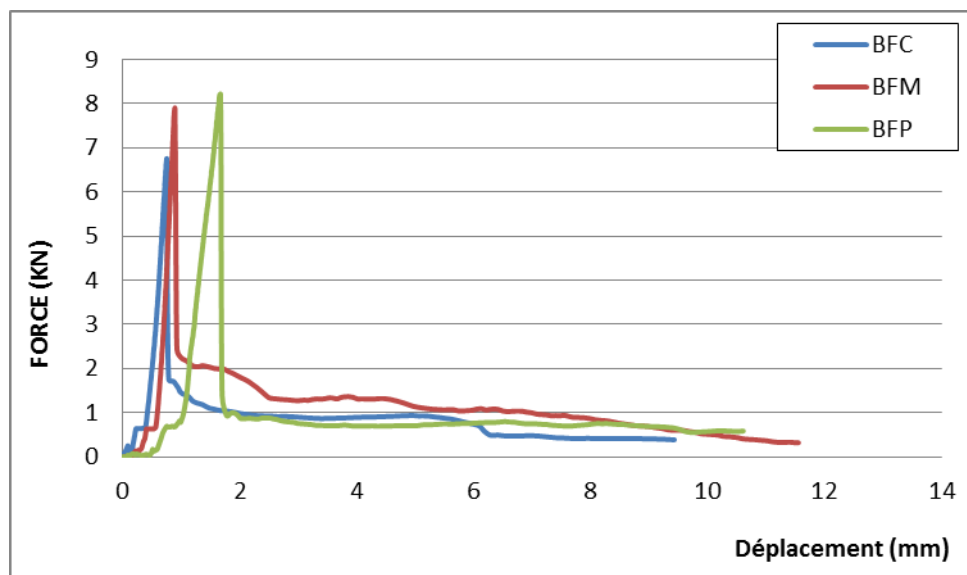


Figure (IV.15) : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 20 °C.

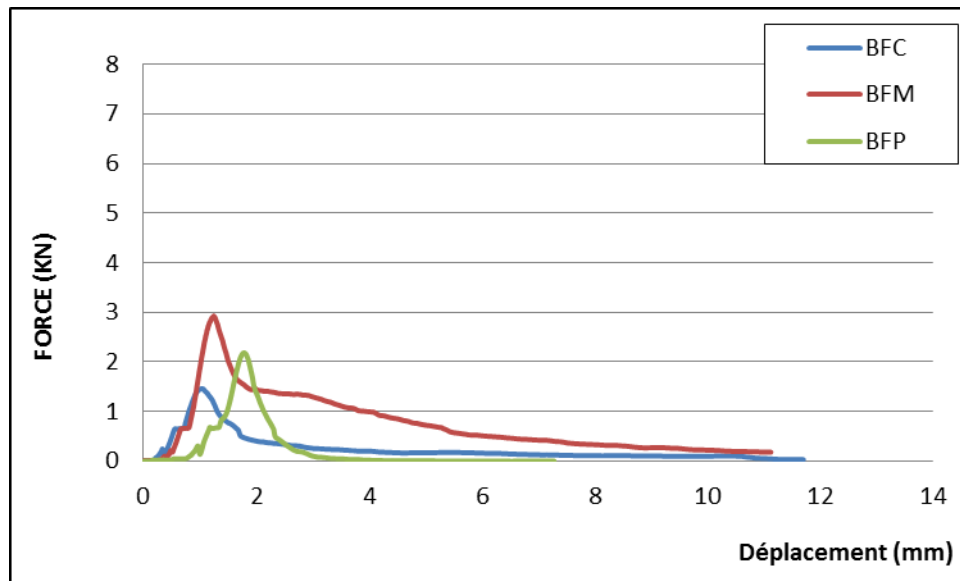


Figure (IV.16) : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 600 °C.

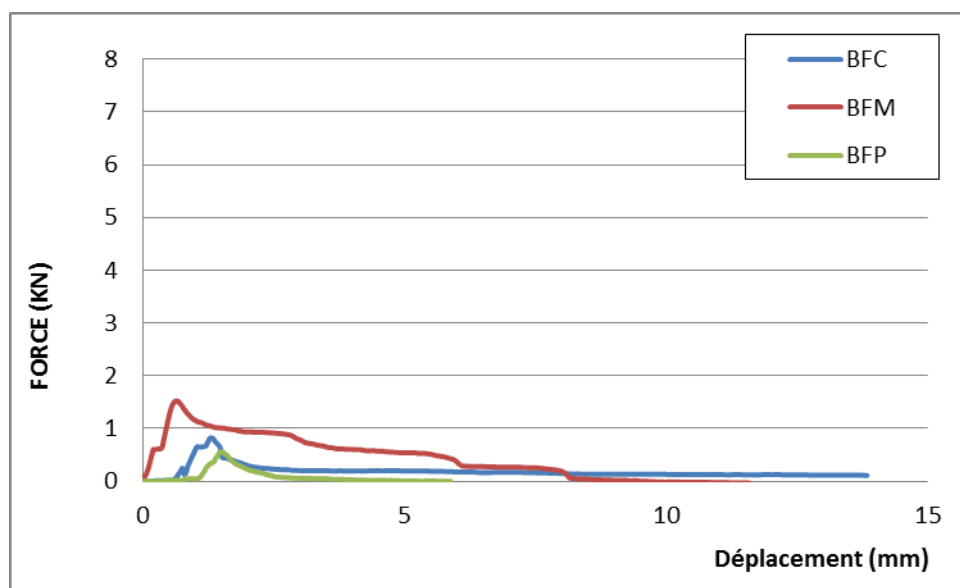


Figure (IV.17) : Courbes forces-déplacement des bétons étudiés à 800 °C.

Les courbes force-déplacement des bétons de fibres métalliques ont présenté un meilleur comportement à la flexion trois points pour toutes les températures étudiées. Leur comportement post-pic est meilleur par rapport aux autres bétons (BFP) et (BFC). En augmentant la température, on constate une chute de résistance assez importante pour tous les bétons fibrés étudiés.



Figure (IV.18) : L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres de polypropylène à la sortie du four.



Figure (IV.19) : L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres métalliques à la sortie du four.



Figure (IV.20) : L'aspect des éprouvettes prismatiques du béton de fibres cocktail à la sortie du four.

A la sortie du four, les bétons de fibres cocktail et les bétons de polypropylène ont présenté des fissures assez importantes et bien visibles à la surface des éprouvettes.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail de recherche était de contribuer de façon expérimentale à une meilleure connaissance du comportement du béton porté à hautes températures et de l'influence des fibres de polypropylène et/ou métalliques. Des corps d'épreuve de bétons avec ou sans les fibres ont été confectionnés.

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

La perte de masse a diminué avec l'augmentation de la température pour tous les bétons étudiés. Une température de 600°C se caractérise par une forte augmentation de perte de masse. Cette forte perte de masse correspond au départ de l'eau liée chimiquement. Pour une température de 800°C, la perte de masse est provoquée par la dégradation de la matrice cimentaire. A 600°C, les différents bétons fibrés ont présenté une perte de masse de même grandeur. A 800°C, le béton de fibres cocktail a présenté une perte de masse assez importante.

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

L'ajout des fibres métalliques dans le béton engendre une amélioration des propriétés mécaniques aux températures 600°C et 800°C. Le gain sur la résistance en traction est meilleur que sur la résistance en compression après le chauffage à 600°C. Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour améliorer sa ductilité. Les essais réalisés en compression comme en traction montrent un bon comportement ductile du béton de fibres métalliques non seulement à température ambiante mais aussi à la suite des différents cycles de chauffage-refroidissement.

Pour l'aspect des éprouvettes cylindriques à la sortie du four, on a constaté une apparition de fissures sous forme de faïençage pour les bétons de fibres métalliques et bétons de fibres de polypropylène. Le béton de fibres cocktail soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié de la surface latérale des cylindres. Alors que pour les éprouvettes prismatiques, on n'a pas constaté de détachement de matière.

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] IR. P BOERAEVE, cours de béton armé, (janvier 2010).

[2] Stefano D. P., « *Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température* », thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004

[3] Mindeguia J. C., « *Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons* », thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.

[4] Baroghel-Bouny V., « *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons-Méthode, analyse, interprétations* », publié par Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Ministère de l'Equipement, des Transports et du Tourisme, 1994

[5] Guillon. E., « *Durabilité des matériaux cimentaires - Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles* », ENS de Cachan.

[6] Bidossessi A. Prosper P., « *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée* », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010.

[7] Belkacem T., « *Etude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton* », thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.

[8] Flore B., « *Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo*

[9] Baroghel Bouny V., « *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances* », thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.

[10] Richardson I. G., « *The calcium silicate hydrates* », Cement and Concrete Research, vol. 38, p. 137-158, 2008.

[11] Yurtdas I., « *Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire: étude expérimentale sur mortiers* », thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2003.

[12] Ruiz A. L., « *Analyse de l'évolution de la microstructure de la pâte de ciment sous chargements thermiques* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et de Chaussées, 2003.

[13] Dreux G., Festa J., « *Nouveau guide du béton et de ses constituants* », huitième édition, Edition Eyrolles, 2002.

[14] Benmarce A., « *Résistance du Béton à Hautes Performances vis-à-vis du feu* », thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2005.

[15] Agostini F., Lafhaj Z., Skoczylas F., and Loosveldt H., « *Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar* », Cement and Concrete Research, vol. 37, p. 71–78, 2007.

[16] Diamond S., « *The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer* », Cement and Concrete Composites, vol. 26, p. 919-933, 2004.

[Réf] thèse doctorat 2007 Annaba.

[17] INERIS, « *Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)* », Rapport intermédiaire Comportement de structures soumises à un incendie, Premières Réflexions Direction des Risques Accidentels, 2001

[18] Billard Y., « *Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton* », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003.

[19] DeSa C., « *Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton : influence des gradients et des incompatibilités de déformation* », Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2007.

[20] Fares H., « *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplacants exposés à une température élevée* », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.

[Réf] thèse doctorat EZIANE

[21] ACI Committee 363, « *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-92)* ». ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Detroit, MI, Part 1-55p., 1993.

[22] Forster S. W., « *High-Performance Concrete - Stretching the Paradigm* », Concrete International, Vol. 16, No. 10, p. 33-34, 1994.

[23] Goodspeed C. H., Vanikar S., et Cook R. A., « *Haut-Performance Concrete Defined*

pour Highway Structures », International Concret, vol. 18, N° 2, p. 62-67, 1996.

[24] Xing Z., « *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température* », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[25] Xiao-Ting C., « *Effet du chauffage sur le comportement mécanique et poro-mécanique de matériaux cimentaires -propriétés hydrauliques et changements morphologiques* », Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2009.

[26] Sliwinski J., Leonard R., Tracz T., « *Influence of High Temperature on the Residual Permeability of High Performance Concrete (in Polish)* », Proc. Of 2nd Conf. Dni Betonu, Polski Cement, Wisła 2004.

[27] Kalifa, P. et Menneteau F. D., « *Mesures de pression, température et perte en masse dans les bétons à hautes températures* », Rapport BHP 2000.

[28] Noumowé N. A., Clastres P., Debicki G., Costaz J. L., « *Transit heating effect on high strength concrete* », Nuclear Engineering and Design, vol. 166, p. 99-108, 1996.

[29] Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., Vandeveldel P., « *Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature* », Cement and Concrete Research, vol. 37, p. 978-987, 2007.

[30] **Lion M., Sckoczylas F., Lafhaj Z., Sersar M., (2005)**

Experimental study on a mortar, temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or measurements under temperature. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1937-1942.

[Réf] thèse doctorat Nonna Yermak 2015

[31] **Mounajed G., Obeid W., (2001)** Modélisation du comportement thermo-hygro-mécanique des bétons à hautes températures - rapport intermédiaire pour le livre BHP 2000. Technical report, CSTB, division MOdélisation CALcul et Développement MOCAD.

[32] **Collet Y., (1977)** Etude des propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900°C. *Annales des Travaux Publics Beiges*, vol. 4, pp. 332–338.

[33] **Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan G.P.E., (1985)** Strain of concrete during first heating to 600°C under load. *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, pp. 195-215.

[34] Felicetti R., Gambarova P.G., Sora M.N., Khoury G.A., (2000) Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling. Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concretes, n°5, pp. 749-758, France, Lyon.

[35] TC44-PHT, Rilem Technical Committees 44-PHT, (1985) Behaviour of Concrete at high temperature. Technical Report Ed. by, U. Schneider, Dept. of Civil Engineering. Germany.

[36] Bamonte P., Felicetti R., (2007) On the tensile behaviour of thermally-damaged concrete. Proceedings of the 6th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure - FraMCoS6, vol. 3:8. **[37] Pimienta P., (1999)** Evolution des caractéristiques des BHP soumis à des températures élevées (tranche 1), résistances en compression

RESUME

À température ambiante, les bétons de fibres présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques très satisfaisantes. Cependant, plusieurs questions restent encore posées notamment en ce qui concerne leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des conditions extrêmes de hautes températures tels que les incendies. L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier et mieux comprendre le comportement à haute température des bétons fibrés et l'effet de l'évolution de la température sur leurs comportement mécanique, par évaluation de la perte de masse résiduelle, la résistance résiduelle en compression et en traction.

Les bétons sont soumis à des différents cycles de chauffage- refroidissement jusqu'à une température maximale de 600°C et 800°C à l'âge de 28 jours. Cette étude a montré que la résistance résiduelle des bétons fibrés soumis à une très grande température a diminué par rapport au béton (non soumis à une très grande température). Pour toutes les températures étudiées, les bétons de fibres métalliques ont montré une très grande résistance par rapport aux bétons de fibres polypropylène et bétons cocktail. A 800°C, les bétons de fibres cocktail ont présenté des zones écaillées, alors que pour les bétons de fibres métalliques et polypropylènes, on a constaté que des réseaux de microfissures mais pas d'écaillage.

Mots-clés : Béton de fibres, haute température (600°C et 800°C), fibres polypropylène, fibres métalliques, caractéristiques mécaniques.

ABSTRACT

At room temperature, fiber concretes have very satisfactory intrinsic mechanical characteristics. However, several questions still remain, particularly with regard to their behavior when subjected to extreme conditions of high temperatures such than fires. The objective of this research work is to study and better understand the behavior at high temperature of fiber concretes and the effect of the evolution of the temperature on their mechanical behavior, by evaluation of the loss of residual mass, the resistance residual in compression and tension.

The concretes are subjected to different heating-cooling cycles up to a maximum temperature of 600°C and 800°C at the age of 28 days. This study showed that the residual strength of fiber-reinforced concrete subjected to a very high temperature decreased compared to concrete (not subjected to a very high temperature). For all the temperatures studied, the metal fiber concretes showed a very high resistance compared to the polypropylene fiber concretes and cocktail concretes. At 800°C, the cocktail fiber concretes showed spalling areas, while for the metal and polypropylene fiber concretes, only networks of microcracks but no spalling were observed.

Keywords : Fiber concrete, high temperature (600°C and 800°C), polypropylene fibers, metallic fibers, mechanical characteristics.