

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département de Génie civil et d'hydraulique



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية  
المرجع: .....

Réf:.....

Thèse présentée  
en vue de  
l'obtention Du  
diplôme de :

## Doctorat en sciences : GÉNIE CIVIL

Option : MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

THEME

# Comportement physico-mécanique et durabilité du béton fibré

Présentée par

**BENALI REDHA**

Soutenue publiquement le : 12 /05/2022

Devant le jury composé de :

Pr.Mabrouki Abdelhak	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. Mellas Mekki	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Pr.Baheddi Mohamed	Professeur	Coencadreur	Université de Batna
Pr.Merdas Abdelghani	Professeur	Examineur	Université de Setif
Pr.Blachia Mouloud	Professeur	Examineur	Université de Guelma
Pr.Benmeddour Djamel	Professeur	Examineur	Université de Biskra

## *Remerciement*

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.*

*En second lieu, je souhaite exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **Mellas Mekki**. Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'être l'encadreur de mon travail, J'ai pu apprécier ses qualités pédagogiques et scientifiques, comme il a su me faire profiter de son expérience, de ses judicieux conseils ainsi que ses fructueuses directives.*

*J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de l'examiner.*

- Monsieur Mabrouki Abdelhak professeur de l'université de Biskra
- Monsieur Mellas Mekki professeur de l'université de Biskra
- Monsieur Baheddi Mohamed professeur de l'université de Batna
- Monsieur Merdas Abdelghani professeur de l'université de Sétif
- Monsieur Blachia Mouloud professeur de l'université de Guelma
- Monsieur Benmeddour Djamel professeur de l'université de Biskra

*Je tiens à présenter mes plus chaleureux remerciements à mes parents qu'ils trouvent ici tout mon amour, toute ma reconnaissance et toute ma gratitude.*

*Je remercie ma femme pour ses encouragements et son soutien permanent, mes enfants ainsi que mes frères et sœurs.*

## **Résumé :**

Le phénomène d'incendie qui se déclenche dans les immeubles peut causer des dégâts importants au niveau des éléments de structures en béton, pour cela la sécurité des usagers, la stabilité et la pérennité des structures dépendent de la stabilité thermique des composants du béton ainsi que de ces caractéristiques mécaniques. D'importants dommages au niveau du béton peuvent être considérés suite aux incendies d'immeubles et tunnels. De multiples travaux de recherche dans le domaine ont permis d'éclaircir les phénomènes observés sur le comportement du béton soumis à de hautes températures.

L'objectif du présent manuscrit est de décrire l'impact des fibres de polypropylène sur les propriétés du béton exposé à des cycles de traitement thermiques, à des températures de 200°C, 450°C et 600°C respectivement pendant six heures, à travers une série d'essais expérimentaux sur la perte de masse, l'absorption d'eau, la porosité, la résistance à la compression et à la traction. A cet effet, des mélanges ont été préparés avec un rapport eau/ciment constant et comportant des fibres de polypropylène suivant un taux variant de 0,5% à 1,5%. Ces fibres ont été ajoutées afin d'améliorer la stabilité thermique et d'empêcher le béton de se fendre. Les résultats montrent qu'une perte considérable de résistance a été constatée notamment au-delà de 450°C pour tous les spécimens testés. Les résistances à la compression des bétons contenant des fibres de polypropylène étaient plus hautes que celles des bétons non fibrés. La résistance à la traction du béton était plus sensible aux températures élevées que la résistance à la compression. Pour ce qui est des propriétés physiques, une plus grande perte de masse des bétons fibrés relativement à ceux non fibrés a été enregistrée lors de l'élévation de la température, un accroissement rapide de la porosité a été observé pour le béton renforcé de fibres comparativement au béton témoin. De plus, l'absorption d'eau par les fibres est proportionnelle à la teneur en fibres du béton.

**Mots clés :** Béton, Température, Fibres de polypropylène, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques, Chauffage - Refroidissement.

## **Abstract:**

The phenomenon of fire in buildings can cause significant damage to concrete structural elements, for this the safety of users, the stability of structures depends on the thermal stability as well as the mechanical properties of concrete. Damage to concrete can be observed as a result of fires in buildings and tunnels. Various research works in the field have shed light on the phenomena observed on the behaviour of concrete subjected to high temperatures.

The objective of the present manuscript is to describe the impact of polypropylene fibers on the behaviour of heated concrete subjected to heating and cooling cycles at temperatures of 200°C, 450°C and 600°C respectively for six hours, through a series of experimental tests on mass loss, water absorption, porosity, compressive and tensile strength. For this purpose, mixtures were prepared with a water/cement ratio with the incorporation of polypropylene fibers at a rate varying from 0.5% to 1.5%. These fibers were added to improve the thermal stability and to prevent the concrete from cracking. The results show that a considerable loss of strength was observed for all specimens tested. The relative compressive strengths of the concretes containing polypropylene fibers were higher than those of the concretes without fibers. Similarly, a greater loss of mass of the polypropylene fibers compared to the concrete without fibers was observed when the temperature was increased. The flexural tensile strength of the concrete was more sensitive to elevated temperatures than the compressive strength and a rapid increase in porosity was observed for the fiber-reinforced concrete compared to the reference concrete. Furthermore, the water absorption by the fibers is proportional to the fiber content of the concrete.

**Key words:** Concrete, Temperature, Polypropylene fibers, Mechanical properties, Physical properties, Heating - Cooling.

## ملخص

يمكن لظاهرة الحريق التي تندلع في المباني أن تسبب أضرارًا كبيرة للعناصر الهيكلية الخرسانية، لذلك تعتمد سلامة المستخدمين واستقرار الهياكل على الثبات الحراري بالإضافة إلى الخصائص الميكانيكية للخرسانة. يمكن ملاحظة تدهور الخرسانة بعد الحرائق في المباني والأنفاق. ألفت الأعمال البحثية المختلفة في هذا المجال الضوء على الظواهر التي لوحظت على سلوك الخرسانة المعرضة لدرجات حرارة عالية.

الهدف من هذه المخطوطة هو وصف تأثير ألياف البولي بروبيلين على سلوك الخرسانة المسخنة المعرضة لدورات تسخين وتبريد عند درجات حرارة 200 درجة مئوية و450 درجة مئوية و600 درجة مئوية على التوالي لمدة ست ساعات، من خلال سلسلة من التجارب. اختبارات على فقدان الكتلة وامتصاص الماء والمسامية وقوة الانضغاط وقوة الشد. لهذا الغرض، تم تحضير الخلائط بنسبة الماء / الإسمنت مع دمج ألياف البولي بروبيلين بمعدل يتراوح من 0.5% إلى 1.5%. تمت إضافة هذه الألياف لتحسين الاستقرار الحراري ومنع الخرسانة من الانقسام. أظهرت النتائج أنه لوحظ فقد كبير في القوة لجميع العينات المختبرة. كانت مقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة المحتوية على ألياف البولي بروبيلين أعلى من مقاومة الانضغاط للخرسانة الخالية من الألياف. وبالمثل، لوحظ فقدان أكبر في كتلة ألياف البولي بروبيلين مقارنة بالخرسانة غير الليفية أثناء زيادة درجة الحرارة. كانت مقاومة الشد الانحناء للخرسانة أكثر حساسية لدرجات الحرارة المرتفعة من مقاومة الانضغاط ولوحظت زيادة سريعة في المسامية للخرسانة المسلحة بالألياف مقارنة بالخرسانة المرجعية. بالإضافة إلى ذلك، فإن امتصاص الألياف للماء يتناسب مع محتوى الألياف في الخرسانة.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة، درجة الحرارة، ألياف البولي بروبيلين، الخواص الميكانيكية، الخواص الفيزيائية. تسخين- تبريد.

## Table des matières

Résumé .....	I
Abstract .....	II
ملخص .....	III
Table des matière .....	IV
Liste des Tableaux .....	VII
Liste des Figures .....	VIII
Liste des Notations.....	X

Introduction générale .....	13
-----------------------------	----

### CHAPITRE I ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	16
I.2 Les différents constituants du béton.....	16
I.2.1 Microstructure de la matrice cimentaire .....	16
I.2.2 L'eau dans la microstructure.....	19
I.2.3 Les granulats .....	21
I.2.4 L'interface pâte-granulats .....	22
I.2.5 Structure poreuse du béton .....	23
I.3 Béton de fibres.....	24
I.4 Aperçu historique sur le béton de fibre .....	24
I.5 Caractéristiques, choix, et rôles des fibres .....	28
I.6 Principales fibres utilisées.....	29
I.6.1 Fibres minérales.....	29
I.6.2 Fibres végétales .....	29
I.6.3 Fibres synthétiques .....	29
I.6.4 Fibres artificielles .....	29
I.6.5 Fibres d'amiante .....	29
I.6.6 Fibres de cellulose .....	30
I.6.7 Fibres de polypropylènes .....	30
I.6.8 Fibres de verre .....	31
I.6.9 Fibres métalliques.....	31
I.7 Critères de choix des fibres .....	33
I.8 Rôles des fibres dans le béton.....	34
I.9 Fabrication des fibres : cas des fibres d'acier .....	36
I.10 Application du béton renforcé de fibres .....	38
I.11 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées .....	39
I.11.1 Différentes formes d'endommagement thermique .....	39
I.11.2 Mécanismes du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé.....	41
I.11.3 Paramètres favorisant l'instabilité thermique du béton .....	44
I.11.4 Transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire.....	46
I.11.5 Evolution des granulats .....	48
I.11.6 Déformations thermiques du béton.....	49
I.11.7 Evolution des propriétés mécaniques.....	51
I.11.7.1 Résistance en compression.....	50

I.11.7.2	Résistance en traction.....	52
I.11.7.3	Module d'élasticité en compression.....	53
I.12	Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée.....	56
I.12.1	Sur l'instabilité thermique.....	56
I.12.2	Sur la perte de masse du béton.....	57
I.12.3	Sur la porosité du béton.....	60
I.12.3.1	Porosité à l'eau.....	59
I.12.3.2	Porosité au mercure.....	60
I.12.4	Sur les caractéristiques mécaniques.....	62
I.12.3.1	Porosité à l'eau.....	61
I.12.3.2	Porosité au mercure.....	63
I.12.5	Module d'élasticité.....	66
I.12.6	Synthèse sur l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée.....	69

## CHAPITRE II MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

II.1	Introduction.....	71
II.2	Programme expérimental.....	71
II.3	Caractéristiques des matériaux.....	71
II.3.1	Ciment.....	71
II.3.2	Granulats :.....	72
II.3.3	Superplastifiant.....	73
II.3.4	Eau :.....	74
II.3.5	Fibres de polypropylènes.....	74
II.4	Formulations.....	75
II.5	Fabrication et conservation des éprouvettes.....	76
II.5.1	Fabrication et mise en œuvre.....	76
II.6	Dispositif expérimental.....	77
II.6.1	Cycle de chauffage refroidissement.....	77
II.7	Résistances de compression.....	78
II.7.1	Résistance en traction par flexion.....	78
II.8	Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores.....	79
II.9	Essais physiques.....	80
II.9.1	Evolution de la porosité.....	80
II.9.2	L'absorption d'eau.....	81
II.9.3	Perte de masse.....	82

## CHAPITRE III COMPORTEMENT DES BETONS SANS FIBRES

III.1	Introduction.....	85
III.2	Evolution de la propriété physique en fonction du chauffage.....	85
III.2.1	Perte de masse.....	85
III.2.2	L'absorption à l'eau.....	87
III.2.3	Evolution de la porosité.....	88
III.3	Evolution des propriétés mécaniques en fonction du chauffage.....	90

III.3.1 Résistances en compression.....	90
III.3.4 Essai de traction par flexion .....	90
III.3.5 Conclusion sur le comportement des bétons sans fibres .....	91

**CHAPITRE IV COMPORTEMENT DES BETONS AVEC FIBRES POLYPROLENE**

IV.1 Etude de la stabilité thermique .....	93
IV 2 Evolution de la propriété physique en fonction du chauffage .....	93
IV 2.1 Perte de masse .....	93
IV 2.2 Evolution de la porosité .....	96
IV.2.3 Absorption en eau .....	98
IV.3 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage .....	98
IV.3.1 les essais de compression .....	98
IV.3.2 Essai de l’ultrason .....	99
IV.3.2.1 Essai de vitesse de propagation d’ondes ultrasonores .....	99
IV.3.3 Les essais de traction par flexion.....	100
IV.4 Conclusion sur le comportement des bétons de fibres de polypropylène .....	101
Conclusion générale .....	104
Références.....	107



## Liste des Tableaux

*CHAPITRE I ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE*

Tableau I.1 Principaux constituants d'un ciment portland.....	16
Tableau I.2 Propriétés physiques et mécaniques des fibres de propylène .....	31
Tableau I.3 Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier .....	32
Tableau I.4 Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier .....	33
Tableau I.5 Quelques sites où le béton de fibre a été utilisé.....	39

*CHAPITRE II MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE*

Tableau II.1 caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	72
Tableau II.2 Caractéristiques de l'adjuvant .....	73
Tableau II.3 Caractéristiques desFibres de polypropylène.....	74
Tableau II.4 Le détail de la composition des bétons .....	75
Tableau II.5 Le détail du nombre d'éprouvettes .....	76

*CHAPITRE III COMPORTEMENT DES BETONS SANS FIBRES*

Tableau III.1 Pertes de masse moyenne des bétons sans fibres .....	85
Tableau III.2 Absorption d'eau du béton ordinaire .....	87
Tableau III.3 porosité moyenne de bétons sans fibres .....	89

*CHAPITRE IV COMPORTEMENT DES BETONS AVEC FIBRES POLYPROLENE*

Tableau IV.1 Masses des éprouvettes de bétons avant et après immersion et chauffage à 600°C. ....	93
Tableau IV.2 valeurs des pertes de masse des bétons avec 0.5% de fibres .....	94
Tableau IV.3 Pertes de masse des bétons avec1.0% de fibres .....	94
Tableau IV.4 Pertes de masse des bétons avec fibres dosages de1.5%.....	94
Tableau IV.5 Porosité moyenne bétons avec fibres avant chauffage.....	96
Tableau IV.6 Porosité moyenne des bétons chauffés avec fibres dosés à 0.5%. ....	96
Tableau IV.7 Porosité moyenne bétons chauffé avec fibres de1% .....	96
Tableau IV.8 Porosité moyenne bétons chauffé avec fibres de1.5%. ....	97

## Liste des Figures

*CHAPITRE I ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE*

Figure I.1 Vue au Microscope électronique à balayage .....	17
Figure I.2 Molécule de C-S-H d'après le modèle de Feldman et Sereda [Feld, 1968]. [3] et [4] .....	18
Figure I.3 Etat de l'eau dans les C-S-H ([Sier, 1974] cité par [4]) .....	20
Figure I.4 Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO [7]. .....	22
Figure I.5 Différentes formes des fibres d'acier (a) .....	32
Figure I.6 La fissuration dans : (a) le béton non armé de fibres .....	34
Figure I.7 La propagation de la micro-Fissures dans un béton sollicité à la traction .....	35
Figure I.8 La ruine d'un composite .....	35
Figure I.9 Procédé de production de fibres métalliques par extraction d'un bain liquide.....	36
Figure I.10 Schéma de la méthode fraisage .....	38
Figure I.11 Méthode de la trempe d'un jet de métal sur une roue en rotation.....	38
Figure I.12 Illustrations de dégradation d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique. ....	40
Figure I.13 Faciès de béton sans fibres montrant l'apparition de la zone de forte saturation au bout de 10, 15 et 20 minutes d'exposition au feu standard, [43]. ....	42
Figure I.14 Illustration du mécanisme d'écaillage du béton [44]. ....	42
Figure I.15 Principales hypothèses de l'éclatement du béton :.....	43
Figure I.16 Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre .....	45
Figure I.17 Illustration du caractère instable des granulats de silex comparé aux granulats calcaires [48] .....	46
Figure I.18 Evolution des composantes du ciment sous l'échauffement [59] .....	48
Figure I.19 Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats 1 : Siliceux, 2 : Grès, 3 : Calcaire, 4 : Basalte, 5 : Argiles expansées, 6 : Pâte de ciment, [70]. ....	51
Figure I.20 Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures [49]. ..	52
Figure I.21 Résistances résiduelles en traction .....	54
Figure I.22 Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C [7].....	55
Figure I.23 Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène [84].....	56
Figure I.24 Evolution de la pression maximale de vapeur et du pic .....	57
Figure I.25 Perte de masse en régime transitoire des bétons avec .....	58
Figure I.26 Évolution de la perte de masse des bétons C3 (BHP ou E/C=0,3), .....	59
Figure I.27 Perte de masse de béton (C) et avec mélange de 0,75 Kg de fibres de polypropylène et 60 Kg de fibres métalliques (CPPS0, 75-60) et béton avec fibres métallique 60kg (CS60) en fonction de la température [113].....	60
Figure I.28 Evolution de la porosité relative à l'eau en fonction.....	61
Figure I.29 Distribution de tailles des pores sur des bétons non chauffés.....	62
Figure I.30 Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en.....	63
Figure I.31 Évolution de la résistance résiduelle en traction des .....	65
Figure I.32 Évolution de la résistance relative en traction .....	66
Figure I.33 Évolution avec la température du module d'élasticité relatif d'un béton sans fibres en fonction de E/C [49], [57], et [95] .....	67
Figure I.34 Evolution de module d'élasticité relatif résiduel .....	68

*CHAPITRE II MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE*

Figure II.1 Courbe granulométrique du sable .....	73
Figure II.2 Courbe granulométrique du gravier .....	73
Figure II.3 Fibres de polypropylène .....	74
Figure II.4 Dispositif de chauffage des éprouvettes Mesure .....	78
Figure II.5 L'essai de l'écrasement.....	78
Figure II.6 Essai de traction par flexion.....	79
Figure II.7 Appareillage de l'essai de l'ultrason.....	80
Figure II.8 Pesée Hydrostatique .....	81
Figure II.9 Balance d'une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g.....	82

*CHAPITRE III COMPORTEMENT DES BETONS SANS FIBRES*

Figure III.1 Evolution de la perte de masse du béton sans fibres .....	86
Figure III.2 Graphe de L'absorption d'eau du béton ordinaire.....	87
Figure III.3 Pycnomètre.....	88
Figure III.4 Courbe de L'évolution de la porosité en fonction de la température .....	89
Figure III.5 Courbe de l'évolution de la résistance à la compression .....	90
Figure III.6 Courbe de l'évolution de la résistance à la traction par flexion .....	90

*CHAPITRE IV COMPORTEMENT DES BETONS AVEC FIBRES POLYPROLENE*

Figure IV.1 Courbe de l'évolution de la perte de masse .....	95
Figure IV.2 Courbe de l'évolution de la porosité en fonction de la température .....	97
Figure IV.3 Variation de l'absorption en fonction du temps .....	98
Figure IV.4 Variation de la résistance à la compression en fç de T.....	98
Figure IV.5 Appareillage des essais ultrasoniques.....	99
Figure IV.6 Variation de la résistance a la compression par ultrason en fç de T .....	100
Figure IV.7 courbe de La variation de la résistance à la flexion.....	100

## Liste des Notations

CSH	Silicate de Calcium Hydraté
Ca(OH <sub>2</sub> )	Portlandite
CaO	Chaux
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> ·26(H <sub>2</sub> O))	l'ettringite
ATG	Les analyses thermogravimétriques
(SiOH),	décomposition des silanols
E/C	Eau /Ciment
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires
MEB	Microscope Électronique à Balayage
F <sub>c</sub>	Résistance en Compression
f <sub>c20</sub>	Résistance en compression à la température ambiante
f <sub>cT</sub>	Résistance résiduelle en compression après un cycle
dechauffage	
f <sub>t</sub>	Résistance en traction
f <sub>t20</sub>	Résistance en traction à la température ambiante
f <sub>tT</sub>	Résistance résiduelle en traction après un cycle de
chauffage	
E	Module d'élasticité
E <sub>20</sub>	Module d'élasticité à la température ambiante
P	La porosité à l'eau
END	Essais non destructifs
DTA	Analyse thermique différentielle
TGA	Analyse gravimétrique thermique
PUNDIT	Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating. Tester
L	Distance considérée entre émetteur et récepteur
$M_{sat}$	La masse de l'échantillon saturé immergé
$M_{sat d'eau}$	La masse de l'échantillon saturé d'eau
V	Vitesse de son
T	Température
t	Le temps de propagation
P	Porosité
k <sub>a</sub>	Perméabilité à l'eau
R <sub>h</sub>	Rebond
BHP	Béton à hautes performances
BO	Béton ordinaire
BHR	Béton haute résistance
BP	Béton contenant les fibres de polypropylène
BM	Béton contenant les fibres métalliques

## Introduction générale

Le béton est un composite employé pour l'exécution des bâtiments et ouvrages en génie civil, sa facilité de mise en œuvre et la disponibilité de ses différents constituants lui offre cette qualité ; il présente des caractéristiques mécaniques qui ont connu de meilleurs exploits. L'utilisation d'éléments fins nous a permis d'excéder du béton classique à d'autres types de béton plus compétitifs tels que le béton à hautes performances et béton fibré à ultra hautes performances.

Le béton peut présenter en cas d'incendie une instabilité thermique malgré son meilleur comportement à la température ambiante, l'instabilité thermique de ce dernier peut se présenter sous plusieurs formes.

Les différentes études de recherche menées par les auteurs sur l'analyse des propriétés du béton soumis à des températures élevées ont pu éclaircir les phénomènes observés. La présence de l'eau au sein du béton, la porosité, la perméabilité, les types de granulats influent sur l'équilibre thermique.

L'introduction des fibres de polypropylène dans la combinaison du béton s'avère une méthode efficace pour palier au risque de l'instabilité thermique.

D'autre part il a été constaté une porosité et une perméabilité additionnelle due à la fonte du polypropylène présent dans le béton chauffé, ses paramètres ont une influence instable à cause des conditions expérimentales.

Le but de ce travail est de découvrir l'importance des fibres de polypropylène dans l'amélioration du comportement du béton chauffé.

Le contenu de cette thèse est formé de quatre chapitres :

**Le premier chapitre** présente un examen de travaux de recherche sur l'effet de la température sur les propriétés physico mécaniques du béton ainsi que son instabilité thermique, il sera basé sur quatre parties :

La première partie tiendra sur les différents composants du béton et fibres ; la deuxième partie portera sur la variation des caractéristiques du béton soumis à des traitements thermiques. La troisième partie comporte quelques formes d'endommagement thermiques suivi des facteurs favorisant ce phénomène ainsi que son effet sur les propriétés mécaniques du béton, enfin la quatrième partie s'articulera sur l'effet des fibres de polypropylènes sur les propriétés du béton chauffé notamment la stabilité thermique, la perte de masse, la porosité et aussi les performances mécaniques.

**Le deuxième chapitre** expose la méthode expérimentale définie dans le cadre de ce travail. Il a été procédé à la description des formulations de bétons, des matériaux et instruments, du type de traitement et des essais de caractérisation.

**Le troisième chapitre** définit les aboutissements des divers tests relatifs aux propriétés des bétons non fibrés. A savoir : la perte de masse, la porosité, l'absorption d'eau la résistance en compression, et la résistance en traction.

**Le dernier chapitre** a été axé sur le rôle des fibres de polypropylène dans le béton. Les taux des fibres de polypropylène en matière de volume sont de 0.5%, 1% et 1,5%.

Les résultats de propriétés physiques et mécaniques ont été analysés.

**Enfin**, une conclusion générale a permis de faire une analyse des résultats obtenus concernant l'influence des fibres de polypropylènes, l'instabilité du béton chauffé ainsi que ces caractéristiques physiques et mécaniques.



*CHAPITRE I*

*ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE*

## I.1 Introduction

Le béton est un corps hétérogène composé d'une mixtion de ciment, de granulats et d'eau. Son exposition à des températures élevées engendre sa dégradation physico-chimique. Pour cela, il est indispensable de connaître le rôle de ces divers composants ainsi que leurs comportements pendant la période d'élévation en température.

Ce chapitre décrit les principaux éléments du comportement thermique et mécanique du béton à haute température.

## I.2 Les différents constituants du béton

### I.2.1 Microstructure de la matrice cimentaire

Le ciment est un liant hydraulique, malaxé avec l'eau, donne une pâte qui fait prise et durcit en préservant sa durabilité et son équilibre voire sous l'eau.

Le ciment Portland, le plus usuel entre les liants hydrauliques, est une mixtion de gypse et clinker. La manière de préparer du clinker conçoit à cuire une mixtion de 80% de calcaire et de 20% d'argile dans un four porté à une température d'environ 1450°C. Le rôle du gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) dans le ciment Portland est d'empêcher le phénomène de "fausse prise" grâce à l'élaboration de cristaux d'ettringite à la surface des grains de  $\text{C}_3\text{A}$  très réactifs à l'eau. Ceci freine l'hydratation de  $\text{C}_3\text{A}$  et évite par la suite le phénomène de prise rapide. La combinaison des principaux éléments anhydres du ciment portland est récapitulée dans le tableau ci-dessous

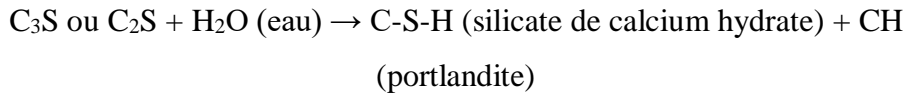
*Tableau I.1 Principaux constituants d'un ciment portland.*

Désignation	Formule chimique exacte	Formule chimique simplifiée	Proportion dans un ciment portland
Silicate tricalcique (oualite)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60 à 65%
Silicate bicalcique (oubélite)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	20 à 25%
Aluminate tricalcique (oucélite)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	8 à 12%
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8 à 10%

La formation des hydrates est due à une réaction chimique engendrée par un mélange

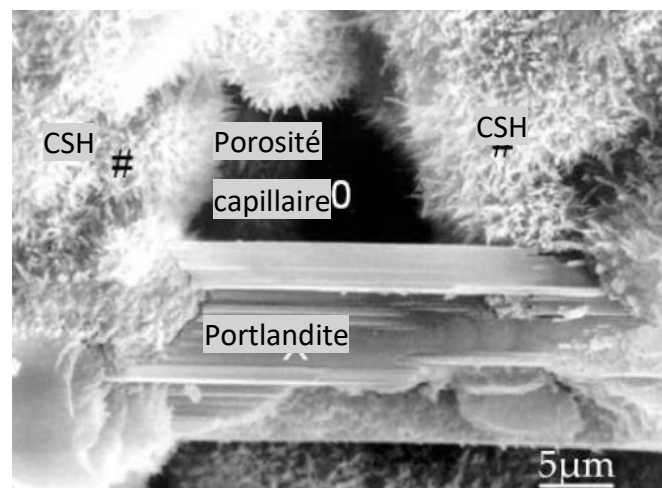


d'eau avec les composants du ciment. Les réactions d'hydratations du (C<sub>3</sub>S) et du (C<sub>2</sub>S) mènent à l'élaboration de (C-S-H) et de Ca(OH)<sub>2</sub> nommé portlandite. Le C-S-H fournit au liant sa durabilité. L'hydroxyde de calcium se configure avant le C-S-H et sa participation en matière de résistance est minimisée. La formule de l'hydratation des silicates de calcium est la suivante :



Le **CSH** demeure l'essentiel composant du ciment hydraté, il constitue de (50% à 70%) de sa masse. C'est lui qui procure au ciment sa résistance.

Les tests exécutés sous un microscope spécifient que les C-S-H sont des formes d'alliage amorphe conçus de particules nanométriques incorporés les unes sur les autres [1]. A cause de la petite dimension des grains qui forment le C-S-H, il a une dimension caractéristique très haute (de l'ordre de 250 m<sup>2</sup>/g) [Kant, 1961] ainsi qu'une dense charge électrique.



*Figure I.1 Vue au Microscope électronique à balayage d'une pâte de ciment [2]*

Suivant les différences morphologiques, Diamond [Diam, 1986] rassemble, les gels C-S-H en quatre modèles de configuration :

- *Modèles I* : ils se présentent sous forme de feuillets considérablement fins qui s'enfilent sur eux-mêmes afin de créer des canaux évidés radiants encerclant des particules de ciment. Ils sont perceptibles aux moments initiaux d'hydratation.
- *Modèles II* : ils s'étalent sous aspect caverneux en nids d'abeilles.

- *Modèles III* : ils s'exposent sous une configuration de courts disques ou de sphères assemblées pour former des molécules plus grosses.
- *Modèles IV* : ils se présentent sous forme de structures denses et amorphes

Les caractéristiques physiques et ceux mécaniques de la matrice cimentaire sont maniées par l'humidité relative, ceci est interprété par le modèle de Feldman et Sereda [Feld, 1968] [3] et [4]. Les éléments de C-S-H s'exposent sous l'aspect de lame très mince (Modèle I) formée de 2 à 4 feuilles élémentaires (Figure I.2)

Au sein du gel C-S-H sec, les petites parties sont au stade de raccourcissement à cause des forces de pression appartenant à la surface. Ces forces sont diminuées par l'eau retenue par les petites parties.

La liaison entre les éléments est due aux efforts se trouvant en surface ou par des durs liens électrovalents. Les liens entre feuilles se consolident au cours de l'assèchement et sont écroulées au moment de son imbibition dans l'eau. Ce qui dénote qu'à l'état humide la résistance du béton est inférieure à celle développée à l'état sec. Les efforts physiques appliqués entre les feuillets sont de type imperméable. Ces forces sont :

- Forces de VAN DER WAALS (captivantes),
- Forces électrostatiques (repoussantes),
- Interférences stériques et des forces dues à la constitution de l'eau

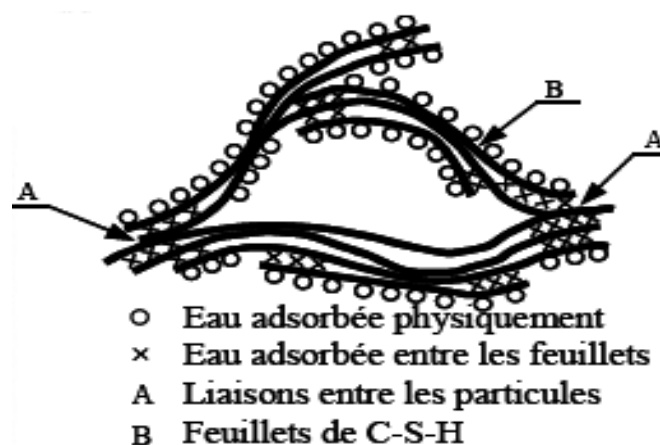


Figure I.2 Molécule de C-S-H d'après le modèle de Feldman et Sereda [Feld, 1968]. [3] et [4]

La portlandite est l'unique étape qui fond dans la matrice cimentaire elle est présentée sous une forme relativement pure. Sa dissolubilité dans l'eau à 25°C est égale à 22 mmol.L-1 mais elle décroît avec la température [1].

Elle se cristallise en plaquettes de formes hexagonales, de temps à autre épaisses et entassées entre les grains de ciment partiellement hydratés. L'hydroxyde de calcium est une substance qui se délaye brusquement dans l'eau ce qui peut engendrer une restriction de la pérennité du béton. Afin de remédier à ce problème, on ajoute de la fumée de silice à la combinaison de la matrice cimentaire ce qui entraîne une réaction pouzzolanique permettant de consommer la portlandite donnant ainsi le gel C-S-H responsable du gain des performances mécaniques.

Les différents essentiels produits provenant de l'hydratation du ciment sont les aluminates ou sulfo-aluminates de calcium hydratés et l'ettringite.

### I.2.2 L'eau dans la microstructure

L'eau est une substance primordiale dans la pâte de ciment. Celle-ci hydrate le ciment et rend la mixtion maniable. Toutes les poches de la matrice cimentaire sont pratiquement occupées par l'eau. Néanmoins, elle est responsable par son existence et sa mobilité durant la vie d'une structure en béton des principaux défauts (augmentation de la porosité et diminution de la résistance mécanique, présence d'agents agressifs, retrait et fluage) et également les dégradations considérées lors des cycles de gel – dégel. Elle a un rôle primordial quand la température du béton grimpe. Au sein du béton, l'eau se manifeste sous plusieurs aspects :

- **Eau libre** : constitue l'étape condensée qui a pour rôle d'occuper le volume des pores par-delà la couche adsorbée, par condensation capillaire (obéissant ainsi aux lois de la capillarité) dans les pores de dimensions  $< 10 \mu\text{m}$ .  
Cette eau est habituellement la première à partir et à disparaître par un échauffement toléré entre 30°C et 120°C.
- **Eau adsorbée** : L'existence de liens émancipés en surface procrée la création d'une tension superficielle du solide et d'un effet de champ électrique. L'adsorption est le phénomène qui, par immobilisation de particules ou d'ions du milieu extérieur, soit liquide ou gazeux, a tendance à simplifier cette énergie libre en surface. Suivant l'importance des énergies mises en jeu, on distingue l'adsorption physique et celle chimique :

- **L'adsorption physique** : prend en considération les énergies de genre Van der Waals de courte intensité (énergie de l'ordre d'une dizaine de  $\text{kJ mol}^{-1}$ ). Elle se traduit par une condensation instantanée d'atomes, de molécules ou d'ions à la surface du solide.
- **L'adsorption chimique** : convient à l'élaboration d'un lien chimique entre les particules de la surface du solide et les molécules de l'adsorbat. L'énergie prise en considération est plus grande que dans l'adsorption physique car le squelette de la particule est transformé.
- **Eau chimiquement liée** : Cette eau réagit avec les éléments anhydres du ciment consommée au cours des réactions d'hydratation du ciment est associée à chaque type d'hydrate. [4] reconnaît dans la structure des C-S-H la quantité d'eau sous trois aspects comme illustré sur la Figure I.3
- **L'eau hydroxyle** : Cette eau est reliée aux particules de silice ou de calcium trouvés sur la surface des feuilles par un groupement hydroxyle.
- **L'eau interfoliaire** : elle est attachée aux feuilles par des groupes hydroxyles. Celle-ci contribue instantanément dans l'adhérence de la lamelle. Les particules d'eau interfoliaire sont triplement unies par des ponts hydrogènes comme dans l'ossature de la glace. D'après [3], seul un puissant séchage permet d'extraire de manière irréversible les molécules d'eau.
- **L'eau interlamellaire** : Cette eau est liée par des ponts hydrogènes à la surface des lamelles ou à des molécules d'eau.

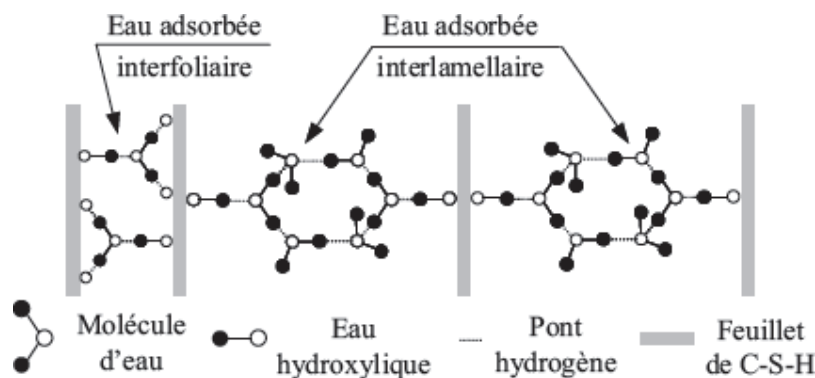


Figure I.3 Etat de l'eau dans les C-S-H ([Sier, 1974] cité par [4])

### I.2.3 Les granulats

La structure du béton est composée par des granulats qui représentent environ 60 à 80% du volume de ce dernier. Les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leurs courbes granulométriques doivent être maximisées pour remplir le plus possible les vides dans le béton. C'est pour cette raison qu'on doit utiliser plusieurs classes granulaires dans un même béton à savoir les sables, gravillons et les graviers.

Au contact avec la matrice cimentaire, on remarque des granulats réactifs et des granulats neutres. Les granulats réactifs tels que les calcaires, montrent de puissants liens avec la matrice cimentaire. Pour ce qui est des granulats neutres, ces derniers n'ont pas d'interaction avec la matrice cimentaire et exposent de faibles liens. Les granulats peuvent être classés par :

- **Leurs provenances**

- **Naturels** :(source minérale sans modification)
- **Artificiels** :(source minérale et modifiés, exemple du schiste expansé, laitier granulé de haut fourneau)
- **Recyclés** :(prototype du béton broyé). Les agrégats utilisés pour la préparation du béton sont habituellement des agrégats bruts. Ces granulats dérivent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques ou de roches éruptives.

- **Leurs aspects** : peuvent être roulés ou concassés

- **Leurs rugosités et leurs dimensions.**

Concernant les propriétés thermiques des granulats, il faut spécifier qu'ils n'exposent pas tous une bonne conduite à température élevée. On veut aboutir à des agrégats avec un bas indice d'expansion thermique et ce, pour palier au risque de générer des contraintes et par conséquence des fissurations. De plus, les agrégats peuvent ingérer de la chaleur, notamment lorsque ces derniers sont susceptibles à des mutations endothermiques à haute température : citons comme exemple, les agrégats d'origine calcaire, ces types absorbent, entre 700°C et 900°C, 1420 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de magnésium et 1800 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de calcium.

La provenance des minéraux, leurs aspects ainsi que leurs granulométries sont des grandeurs primordiales dans la sélection des agrégats pour la fabrication d'un béton.

### I.2.4 L'interface pâte-granulats

Les performances mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires dépendent non seulement de la qualité de la pâte de ciment de la nature et la granulométrie des agrégats, mais aussi de la liaison qui s'effectue entre celle-ci et les éléments granuleux. Ce lien forme une bande dénommée « auréole de transition » ou « bande de transition inter faciale ».

La qualité de l'auréole de transition est strictement jointe au type d'agrégat [3] [6]. D'après le modèle de Diamond [7] sur la Figure I.4. On considère, autour des granulats, une bande de pâte hydratée originale. La première couche de cette pâte est proche de la surface des granulats, elle est très compacte est composée de cristaux de portlandite perpendiculaire aux granulats. La deuxième couche d'épaisseur  $0,5 \mu\text{m}$ , est composée de feuillets de CSH. Puis on constate une grande porosité dans une bande ou les particules sont de grande dimension et présentent une faible cohérence. Cette bande évoque l'anneau faible des bétons, elle est sous l'effet des sollicitations mécaniques agréant aux fissures de transpercer la matrice.

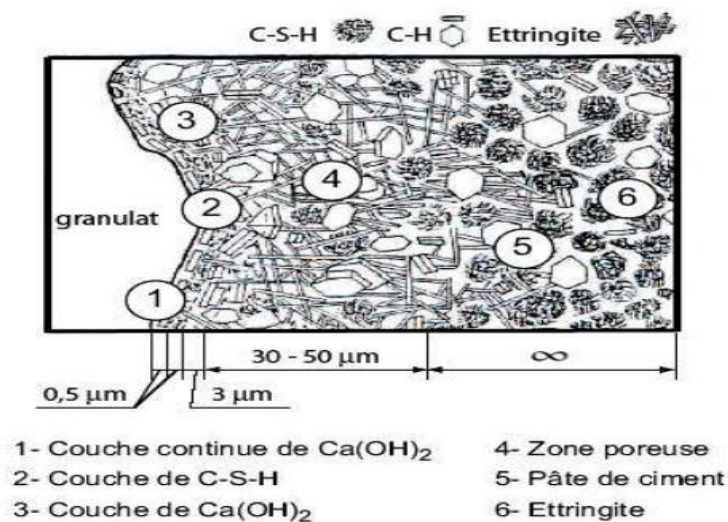


Figure I.4 Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO [7].

La valeur de l'auréole de transition est exclusivement liée à l'origine des composants granulaires [8]. Avec la matrice cimentaire on remarque les granulats réactifs et ceux neutres. Pour ce qui est des granulats calcaires on constate une amélioration de la liaison pâte – granulats du fait de leur réaction continue avec les éléments de la pâte de ciment. En effet le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) présent dans les granulats calcaires réagit avec le  $\text{C}_3\text{A}$  et les  $\text{C}_4\text{AF}$  pour former des monocarbo– aluminates de calcium  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_{11}$ . De ce fait, la zone de passage entre les composés granulaires de type calcaires et la matrice cimentaire est moins pénétrable

et plus durable. Les granulats calcaires donnent une résistance au béton plus grande que celle des granulats siliceux, ces derniers sont neutres par rapport à la pâte de ciment [9] et l'interface qu'il forme avec celle-ci présente une résistance mécanique plus faible et une grande perméabilité aux gaz. D'autre part, on constate des liaisons plus rigides, au niveau de l'auréole de transition, pour des granulats concassés et pour ceux roulés [10].

D'après les études faites par [11] il a été constaté que la liaison établie entre la pâte de ciment et les composés granulaires pulvérisés est supérieure à celle formée avec les granulats roulés.

En ce qui concerne les bétons ordinaires la zone de passage inter faciale est mécaniquement plus basse. Elle concrète une porosité plus grande que le restant de la matrice. D'après [12], [5] les gros orifices deviennent un réseau d'accès incité pour les transferts des agrégats. [11] considère que l'épaisseur de l'auréole de transition est reliée à la dimension des granulats et au quotient E/C mais, demeure toujours en dessous de 50  $\mu$  m. Avec les bétons à hautes performances comportant de la fumée de silice, l'épaisseur de l'auréole de transition est bornée à 12  $\mu$ m. La fumée de silice réagit avec le CH pour donner naissance au gel de C-S-H agréant à rendre le squelette du matériau plus consistant. [13], [14] aperçoivent que l'ajout de la fumée de silice agrée à diminuer la porosité et par conséquent à progresser le lien entre la matrice et les granulats.

### 1.2.5 Structure poreuse du béton

La porosité d'un béton varie de manière remarquable. À l'état durci l'hydratation des constituants, donne un matériau poreux. D'après [15], elle est de l'ordre de 10% dans un béton ordinaire. Cette porosité est provenue d'une part de la microstructure des hydrates, particulièrement des CSH, et d'autre part, des vides générés par l'eau lors de l'hydratation. Certains éléments physiques sont utilisés pour décrire la porosité à savoir : le volume total poreux et le diamètre des pores.

Selon les travaux menés par [16] la composition perméable et la dispersion des pores dans le béton ont un grand effet sur le comportement mécanique, et sur les phénomènes de transfert et par conséquent sur la durabilité.

On distingue deux types de pores : les pores liés aux capillaires et les pores liés aux hydrates.

- **Les pores capillaires** : ce sont les vestiges des espaces intergranulaires de la pâte à l'état frais. Ils peuvent être ou non remplis d'eau et leur volume décroît au cours



de l'hydratation pour un rapport eau/ciment préalablement fixé [17]. Selon [18] leurs dimension caractéristique se situe entre 0.01 et 50  $\mu\text{m}$ .

- **La porosité intrinsèque aux CSH :** Elle a une dimension spécifique, de l'ordre du nanomètre, elle est beaucoup plus faible que la porosité capillaire, d'une façon générale, les représentations qui sont faites donnent deux types de pores [16].
  - *Les pores inter-cristallites* (espace inter-lamellaires) sont localisés entre les particules de gel.
  - *Les pores intra-cristallites* (espace inter-feuillets) sont localisés au sein des molécules du gel, il s'agit d'espaces très petits de quelques Angströms de largeur.

### I.3 Béton de fibres

Constituée d'un corps solide et maniable, la fibre peut avoir une forme sensiblement cylindrique, avec un diamètre qui aboutit à quelques millimètres et une longueur qui fait plusieurs fois ce diamètre. On peut aussi distinguer des fibres de longueur réduite que l'on nomme fibre courte dont la longueur se situe entre 20 et 150 mm et des fibres de grande longueur qu'on appelle tissus continus.

Un béton de fibres résulte d'un mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et de fibres irrégulières, ces dernières constituent les éléments de renfort.

Ces éléments de renforts sont intégrés de ce fait au moment du gâchage (béton de fibres) par inclusion directe de fibres séparées ou par projection (méthode utilisée pour le béton de fibres projeté). En plus de ce socle, ce type de béton peut contenir comme pour le béton ordinaire de la pouzzolane ou tout autre adjuvant usuel.

Une autre définition a été donnée par le comité 544 de American Concrete Institutes en 1973 [19] dans un récit sur l'état de l'art du béton de fibres "Le béton de fibres est un béton formé d'un ciment hydraulique, d'un granulat fin ou gros et des fibres asymétriques". Cela veut dire qu'à part l'ajout de fibres de longueurs discontinues durant la préparation de la mixtion, le béton de fibres est un béton habituel.

### I.4 Aperçu historique sur le béton de fibre

Dans l'histoire, il n'y a pas eu de déclaration à propos du lieu de commencement du réconfort du béton de fibres.



D'après Exode 5:6 les Egyptiens ont employé les pailles pour consolider la brique de boue. En Finlande il ya 5000 ans au paravent, une conviction s'est instaurée que les fibres d'amiante ont été employées dans l'affermissement des terres en argile [20]. Selon [21, 22], chez les antiquités, les pailles ont été employées pour consolider les briques, par contre les poils des animaux et les fibres d'amiante ont été administrés pour raffermir le plâtre et la pâte de ciment Portland. Il ya lieu de signaler aussi l'exécution d'alliages métalliques avec fibres de carbone au milieu du XV<sup>ème</sup> siècle.

[23] avec d'autres chercheurs ont confirmé cette évidence et ont rapporté que l'homme a produit le premier matériau renforcé par des fibres, et ce en incluant de la paille et d'autres produits conformes dans des matériaux de construction tel que le mortier, et le plâtre.

D'après [23], il a été observé qu'un petit oiseau vivant en Amérique latine, bâti son nid avec concentration en utilisant de l'argile qu'il mixe avec de la paille et cela depuis des siècles avant l'humanité. Les matériaux artificiels fibreux ont prélué à s'imposer dans l'utilité publique à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, et depuis, leurs usage a conquis plusieurs domaines, c'est ce qui a permis beaucoup d'innovation dans ce nouveau type de matériau.

Néanmoins, dans notre pays on a toujours utilisé le Pisé; un matériau de construction produit à partir de terre argileuse délayée, à laquelle est ajouter de la paille, le Pisé ainsi ajusté dans des moule en bois, compressé et puis séché à l'air libre. Au final on acquérait des briques de terre stabilisée ou non qu'on appelle-le "Toub". On peut constater l'usage du Pisé dans plusieurs endroits notamment au centre et au sud en tant que matériau de maçonnerie et joint de murs.

Le travail établit par [21] a été certifié en 1847, devant les difficultés de dégradation des bétons, il a suggéré l'ajout de fils ininterrompus ou de treillis en métal dans le but de procréer un nouveau matériau qui peut-être, à son avis, une solution face à ces problèmes. Les développements de ce concept ont découlé sur les technologies actuelles du béton armé. Cette idée qui conduit néanmoins à un matériau anisotrope renforcé d'armatures ininterrompues, nécessitant à la construction, un travail manuel considérable, se voie confrontée au fait que ce matériau ne travaille que dans un régime favorisé, et il est relativement inefficace face aux fissures microstructurales.

Après Vingt-sept ans, aux états unis d'Amérique, [21] est arrivé à concevoir une pierre artificielle par l'incorporation de granulats en fer recuit dans une mixtion de béton.

Ultérieurement, et en 1899, il a élaboré un procédé de confection de matériaux composites fondé sur du ciment et d'amiante.

En 1910 suite à plusieurs essais effectués par des chercheurs afin d'améliorer la durabilité du béton ils ont retenus que l'existence de petites fibres dans le béton accroît sa résistance à l'écrasement et à la traction des renforcements avec incorporation de petits bouts d'acier, procreant une résistance aux particules, notamment à la traction, faisant du béton un matériau structural réellement homogène".Depuis, [24] a déposé un brevet sur les bétons de fibres. Constituant de ce fait le premier acte américain où l'emploi des tranches d'acier comme renforts fibreux dans les matériaux de construction qui a été établi.

Aux U.S.A en 1912 [25] déposa un brevet sur l'utilisation des bandes en fils fabriquées avec deux fils d'acier, et ce avec l'intermédiaire d'un anneau, dans le but d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En Grande Bretagne le premier brevet a été établi en 1914 par [26], il a préconisé l'usage de différentes pièces métalliques arrondies. Il a constaté que dans ce cas la résistance à la fissuration et à la fatigue a été nettement améliorée, en l'occurrence aucune amélioration dans la résistance du composite n'a été notée que ce soit à la traction ou à la compression. A l'inverse de [26], les travaux de [21] confirment une amélioration de la résistance à la traction d'un béton renforcé par de petits éléments longitudinaux en fer (fibres), en bois ou en tout autre matériau. Il a également constaté une amélioration selon l'état de surface des renforts. En effet, la condition sine qua none pour obtenir une bonne adhérence à la matrice en béton est que les renforts doivent être rugueux et arrondis aux extrémités.

Dans les années vingt, l'élaboration du premier brevet décrivant une synthèse concernant l'inclusion d'un grand volume de particules de fer au béton pour constituer une masse capable d'être usinée semblable à une masse d'acier.

Sept années après, en Californie [27] et [28], déposent deux brevets sur les bétons renforcés par des fibres. [28] dans son procédé recommande l'ajout de plaquettes d'acier embouties ou des fils d'acier qui servait à la fabrication des tuyaux, alors que [27] préconise, pour bâtir un immeuble en béton armé, le malaxage avec le béton de sections de fil tordu.

Quelques années après, a New Jersey 1933, il a été inventé une technique pour améliorer la forme des fibres. et ce pour optimiser la participation de ces dernières dans le matériau final, Il a été conseillé pour le cas du béton utilisé dans la construction des voies ferrées.

L'incorporation de fibres en forme d'anneaux de différentes dimensions et de différents diamètres. Convaincus que cela pourrait améliorer la résistance à la fissuration et à la fatigue.

En l'année 1938, des chercheurs ont effectués des travaux en Grande Bretagne. Ils ont enregistré et ce après avoir introduit dans le béton des petits morceaux en fer de dimensions : 100 mm de long et 1 mm de diamètre qu'il y a un gain au niveau du comportement mécanique du béton à savoir la résistance à la compression, à la traction et celle au cisaillement. Ces morceaux en métal sont très semblables aux fibres utilisées de nos jours pour armer le béton.

Dépassant les années quarante, l'incorporation des fibres dans le béton pour augmenter sa performance s'est propagée dans le monde, on adoptant différents procédés.

Toutefois en 1943, en Angleterre et en 1954 aux U.S.A, des travaux de recherches ont pris de l'ampleur et méritent une grande concentration. Les variables de renforcement préconisés dans le temps sont identiques à ceux utilisés récemment pour le béton de fibres. Il a été conseillé aussi pour l'obtention d'une grande résistance à la fissuration l'utilisation de fibres dans le béton. Il a été préconisé l'application de ce nouveau composite dans plusieurs usages notamment la construction, les pistes aéroportuaires et les fondations pour machines.

Cette étape évoque la première phase de l'évolution des bétons de fibres, déterminée par l'incertitude sur les vrais exploits de ce composite.

Au commencement des années soixante, plusieurs recherches ont été effectués par [29]. L'auteur a procédé à l'incorporation de petits fragments d'acier pour conforter le béton. Sauf que les méthodes expérimentales disponibles durant cette époque étaient restreintes à de simples tests de compression ou flexion à charge contrôlée.

Un gain au niveau des performances mécaniques notamment dans la résistance à la traction, l'absorption de l'énergie et la résistance à l'usure a été mentionné dans ces initiatives.

[30] a édité deux écrits en 1963, le titre du premier est. "*La technique de l'arrêt des fissures dans le béton*", le deuxième s'intitule "*Comportement des poutres en béton armé avec des armatures rapprochées*". Dans ce concept, une interprétation abstraite des aboutissements offerte par les travaux de Battelle Development Corporation a été conçue avec des hypothèses expérimentales acquises à travers l'essai de flexion.

Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de [31]. Ces travaux qui ne sont en fait que des essais pilotés en déformation, ont permis aux chercheurs de mettre en évidence de nouvelles propriétés de ce composite. Ils ont

aussi énoncé les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure dans une matrice fragile. En outre, et sur la base des résultats donnés par les brevets de Battelle Development Corporation, ils ont développé une analyse théorique où ils mettaient l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres sur le comportement du composite.

A la fin des années soixante, plusieurs chercheurs étaient convaincus par l'intérêt de l'utilisation du béton de fibres et ils ont dirigé un grand nombre de leurs recherches sur la fiabilité de ce matériau. Depuis, les travaux sur ce domaine se multiplient et découlent sur la mise en marché d'une multitude de types de fibres proposant ainsi de nouvelles applications dans les domaines de la construction. Parmi les plus grands progrès dans ce domaine c'est l'incorporation des fibres d'acier dans l'industrie réfractaire dans les années c.

Effectivement à partir des années soixante-dix, une sorte d'engouement s'est produit pour la technologie des bétons renforcés de fibres. L'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles a donné une confiance dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres et a étendu son usage à plusieurs autres domaines. Mais, aujourd'hui, avec le développement des moyens expérimentaux, l'utilisation de ce type de matériaux s'est dirigée vers les bétons ordinaires où les structures présentent des phénomènes de fissuration. Les premiers travaux dans ce domaine peuvent être accordés à [32].

Dans ce concept, ils ont certifié une amélioration marquante de la résistance, la ténacité et la durabilité d'un béton réfractaire si on lui incorporait 1 à 2% de fibres.

Les travaux guidés par [33], montrent que, soumis à une température de 1600 ° un béton réfractaire avec fibres présente un accroissement important de sa ténacité et de sa résistance à la flexion.

## I.5 Caractéristiques, choix, et rôles des fibres

Elles sont amalgamées suivant leurs origines, leurs formes et leurs dimensions. Leurs origines peuvent être naturelles, synthétiques ou artificielles, leurs formes ; droites, ondulées ou en aiguille, ainsi que leurs dimensions, sans oublier leurs performances mécaniques. Cependant, le choix de fibres à utiliser pour chaque application, doit tenir compte de l'adéquation de celle-ci avec la matrice, ainsi que du degré de performance du composite.

## I.6 Principales fibres utilisées

### I.6.1 Fibres minérales

Elles regroupent un grand nombre de fibres (amiante, alumine,...etc.), et sont employées dans de multiples circonscriptions classiques.

Pendant plusieurs années les fibres d'amiantes étaient employées pour l'isolation, bien que efficaces, leur utilisation est proscrite aujourd'hui après qu'on a prouvé ces conséquences cancérogènes.

### I.6.2 Fibres végétales

La cellulose est l'importante fibre végétale qui contrecarre les substances basiques, tels que les alcalis. Habituellement, les fibres végétales contrecarrent aussi la majorité des acides organiques, à l'inverse, elles sont détruites par des acides minéraux puissants. On peut évoquer quatre types de fibres végétales : les fibres issues du tissu végétal du Cambium qu'on appelle Liber, les fibres provenant des poils, les fibres vasculaires ainsi que les fibres extraites des troncs de certaines graminées tels que le Lin. Elles sont employées particulièrement dans la confection du papier ainsi que les parties de bâtiment.

### I.6.3 Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques collectionnent plusieurs types de fibres comme le nylon, le polypropylène, l'acrylique et le polyester. Elles ont vu le jour à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et sont nommées irradiées. Elles sont réalisées à partir de cellulose naturelle. De nos jours, les produits dérivés du pétrole et les polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques sont à l'origine de la plupart des fibres synthétiques.

### I.6.4 Fibres artificielles

Habituellement, ce modèle de fibres est plus exploité dans l'usage industriel, néanmoins, son utilisation est tout aussi intéressante dans le génie civil. On peut citer les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et bien d'autres. Elles trouvent aujourd'hui un grand nombre d'exploitation dans l'industrie de la construction. Ci-après nous allons présenter les principales fibres que l'on peut utiliser pour renforcer les bétons et les mortiers.

### I.6.5 Fibres d'amiante

Ce modèle de fibre est employé pour la consolidation des pâtes cimentaires et également pour la confection de tissus pouvant tenir devant les feux. Elle se fusionne aux alentours de

1500°C et elle est composée par des bûchettes de microfibrilles très fines, cette fibre présente de grands avantages en plus de son invincibilité par les ciments, elle dispose d'un très bon maintien au feu [34], une bonne résistance à la traction et un grand module d'élasticité. Elle est également plus tenace aux attaques chimiques et aux micro-organismes.

L'utilisation de la fibre d'amiante est propagée dans plusieurs domaines à savoir : voiles, tuyaux, panneaux, parements de mur, matériaux d'isolation thermique, conduites pour assainissement, lames de toitures de diverses formes.

#### I.6.6 Fibres de cellulose

La cellulose est acquise suite à plusieurs actions chimiques et mécaniques sur du bois, les fibres de cellulose repèrent un terrain d'application dans la confection des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments analogues. Elles ont essentiellement pour rôle de renforcer les matrices organiques et celles cimentaires. Les modes de fabrication de ce modèle de fibres, influent sur ces propriétés physiques finales. Ces fibres, peuvent avoir un diamètre qui peut aller de 1 à 4 mm, et leurs longueurs de 10 à 50 mm

#### I.6.7 Fibres de polypropylènes

Confectionné à l'intention de l'industrie textile depuis 1954 ; le polypropylène est un polymère de la famille des polyoléfines acquis par cristallisation. Du fait de sa bonne résistance à la traction pouvant atteindre les 800 MPA, sa déformabilité élevée et son imputrescibilité, cette fibre a connu une extension progressive.

L'acquisition de ces fibres se fait par le mouvement d'extrusion, ce qui consiste à leurs donner une forme régulière et déterminée, par étirage, ce qui impose une orientation particulière aux molécules, dans le but d'optimiser leurs propriétés mécaniques.

Dans les mortiers et les bétons, l'emploi des fibres de polypropylène, était depuis 1960 mais, la naissance des accomplissements captivants débutaient en 1967 en Angleterre, ces fibres étaient employées dans des panneaux ornementaux de 33 cm d'épaisseur et aussi pour décorer les devantures des édifices et aussi pour l'exécution des branchements et la réalisation des pieux [35].

Par ailleurs il a été enregistré qu'une exposition prolongée au soleil provoque l'oxydation du polypropylène, mais noyée dans la matrice, la fibre est défendue des ultra-violets.

Les caractéristiques principales de ces fibres sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.2 Propriétés physiques et mécaniques des fibres de polypropylène

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique Kg/dm <sup>3</sup>	Résistance En traction Mpa	Module D'élasticité Mpa	Elongation à la rupture (%)	Volume typique à la composite (%)
Polypropylène (fibrillated)	0.5 à 4	5 à 75	0.9	400 à 800	4000 à 8000	8	0.2 à 1.2

Le béton peut renfermer en matière de fibres de polypropylène un volume allant de 0.2 à 0.7, qui s'exprime en poids de 0.9 à 6.3 kg/m<sup>3</sup>. Les comportements relatifs à l'écoulement et à la déformation du béton frais consolidé par ces fibres sont causés par l'existence des fibres de polypropylène qui sont très flexibles.

#### I.6.8 Fibres de verre

La matière première de ces fibres se compose du verre fusionné qui parade dans un tube, réchauffé par effet Joule, elle comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 µm. Elles sont utilisables dans le commerce sous aspect de rouleaux (découpage à la demande) ou sous configuration de bouts prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont rassemblés en trois modèles : La fibre de verre habituel (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et les fibres de verre au borosilicate.

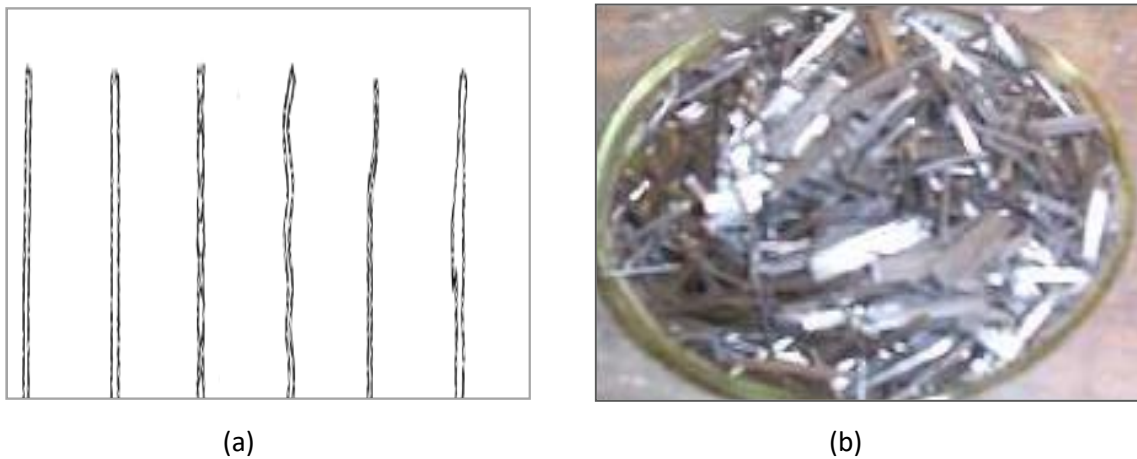
Ces fibres sont couramment déterminées par les caractéristiques suivantes :

- Bonne adhésion avec la pâte
- Disposition sous tous les aspects (coupées, ininterrompues, ...)
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion
- Conductivité thermique partiellement basse

#### I.6.9 Fibres métalliques

Ce modèle de fibre, qui rassemble les fibres d'acier et ceux de fonte amorphe, a été et demeure l'objet de très importantes prospections mondiales. On se borne aux fibres d'acier qui sont désormais les plus employées dans l'usage de génie civil.

Certainement, les caractéristiques mécaniques du béton consolidé par ces fibres sont animées par la résistance de cohésion entre les fibres et la pâte.



*Figure I.5 Différentes formes des fibres d'acier (a)  
Types de fibres métalliques dramix(b)*

Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface des fibres, ces efforts déployés ont menés ces constructeurs à de multiples types de ces fibres, ces dernières se distinguent par leurs diamètres, leurs dimensions, leurs longueurs et leurs utilités opérante. La Figure.I.5 évoque les divers aspects des fibres d'acier utilisées en tant que soutien pour les divers types de béton.

Les importantes caractéristiques physiques et mécaniques des fibres d'acier sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

*Tableau I.3 Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier*

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique Kg/dm <sup>3</sup>	Résistance En traction Mpa	Module D'élasticité Mpa	Coefficient de dilatation Micro/m	Résistance Au feu (°)
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.8	1000 à 3000	200000	11	1500μ



## I.7 Critères de choix des fibres

L'adéquation de la fibre avec la pâte de ciment et spécialement avec le liant est un point primordial pour la sélection de cette fibre, pour cela la fibre choisie doit maintenir ses caractéristiques constantes au fil du temps et avoir un prix abordable, compte tenu des exploits qu'elle attribue à la matrice cimentaire.

Sa sélection est liée aussi au domaine de son utilisation (pièces fines, pièces épaisses, rafistolage de construction, jet, consolidation d'une pâte pure...etc.) et des comportements mécaniques de la fibre (résistance, module d'élasticité, adhésion avec la matrice... etc.).

*Tableau I.4 Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier*

Nature des Fibres	Diamètre (μ m)	Masse Volumique Kg/dm <sup>3</sup>	Résistance à la traction Mpa	Module D'élasticité Mpa	Allongement A la rupture %
Amiante	20	2.55	3000 à 4500	165000	2 à 3
Verre	9 à 15	2.6	2000 à 4000	70000 à 80000	2 à 3.5
Graphite	8 à 9	1.9	1500 à 3000	240000 à 415000	0.5 à 1
Acier	5 à 500	7.81	1000 à 3000	200000	3 à 4
Polypropylène	20 à 200	0.91	500 à 750	5000 à 7000	20
Aramide	10	1.45	3600	65000 à 133000	2.1

D'après le Tableau I.4 présenté ci-dessus, on peut déduire que pour progresser les exploits mécaniques du matériau on doit choisir les fibres ayant une grande résistance à la traction, un haut module d'élasticité, une compatibilité appropriée avec la pâte de ciment notamment avec le liant. Elles nécessitent également leur non agressivité par le milieu basique du liant, gardent leurs caractères purs au cours de leur vie, n'exposent pas de danger pour les manuteneurs et finalement conserver un cout accessible.

Ces types de fibres sont couramment d'origine inorganique ou artificielle.

On peut conclure que la sélection des fibres doit être orientée vers des aptitudes nécessaires pour être mises avec crédibilité aux capacités d'un composite.

## I.8 Rôles des fibres dans le béton

Les savants veulent dans les premiers temps accroître, par l'incorporation de fibres dans le béton ses compétences mécaniques telle la résistance à la compression ou la résistance à la traction, malheureusement l'effet désiré était limité. L'industrialisation récente des matériaux de construction ne se borne pas à avoir uniquement une résistance croissante du béton, elle suggère d'autres produits ou procédés plus économiques et plus efficaces

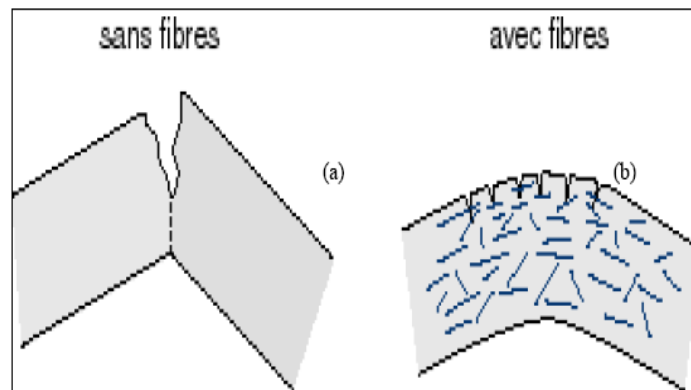


Figure I.6 La fissuration dans : (a) le béton non armé de fibres  
(b) béton armé de fibres

Cela nous permet d'enregistrer que la tâche essentielle des fibres dans un matériau peut-être reliée à deux éléments importants :

- La vérification du développement d'une fissure dans un matériau pendant sa prestation en diminuant la taille des fissures.
- Modification de la conduite faible d'un matériau en une conduite ductile pour augmenter sa sécurité.

Par conséquent, on doit savoir que toute matrice cimentaire a des endroits intérieurs fragiles. Ces bandes sont déterminées soit par des petites fissures dues à divers phénomènes tels que (retrait, contraintes thermiques,) soit par une grande porosité.

Concernant un béton dégradé, à partir d'un tirage sur ce corps, les lignes de tension doivent s'infléchir, car la fissure ne translate pas la charge, par contre les tensions aux bouts de la fissure s'accroissent, ce qui permet à ces dernières de se répandre sans obstruction et donnent naissance à une rupture fragile (Figure.I.6 (a))

Pour ce qui est d'un matériau consolidé de fibres d'acier, une tranche de la force de traction peut être communiquée le long de cette fissure par le biais des fibres qui garantissent le raccord des petites fissures. Ces microfissures ne peuvent augmenter que si la fibre formant un pont entre les deux bords de la crevasse agrandit l'ouverture de celle-ci par un déversement malléable de la fibre

Habituellement, l'effet d'une fibre se distingue nettement au moment où le composite se détruit, cela est causé par la transmission de la fissure (Figure I.8)

Ces bandes sont déterminées soit par des petites fissures causées par plusieurs phénomènes citons parmi eux (retrait, contraintes thermiques), ou bien par une grande porosité.

Le microscope à balayage employé sur des spécimens d'un béton à fibres courtes nous a autorisé à constater que l'accroissement de la contrainte en amont d'une fissure en état de croissance provoque un excès de charge et la ruine des fibres de consolidation (a), tracte les fibres en dehors de la matrice (b) dissocie la matrice des fibres (c). Lorsque la fissure se répand parmi les fibres, elle force d'une manière graduelle la matrice à s'altérer et à s'abandonner (d).

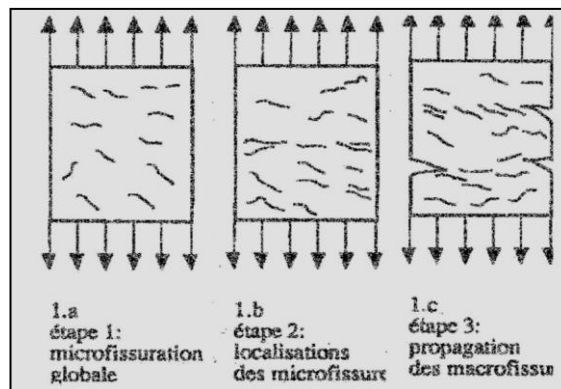


Figure I.7 La propagation de la micro-Fissures dans un béton sollicité à la traction

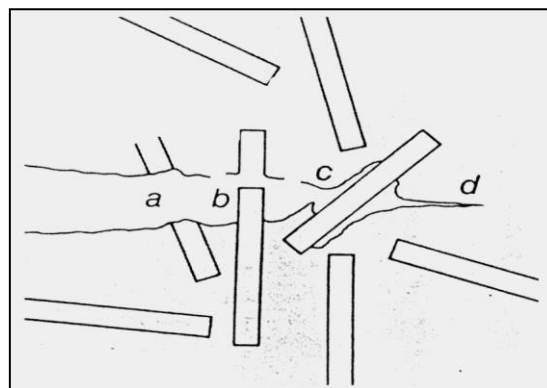


Figure I.8 La ruine d'un composite

Ainsi, plus les fibres ne sont pas abondantes, et davantage elles sont fixées dans le béton, et leur efficacité sera plus grande. Les fibres longues avec une meilleure adhésion offrent une bonne fixation au composite. On peut déduire que :

- La quantité des fibres par unité de poids s'élève en diminuant leur diamètre.
- L'efficacité des fibres augmente avec le rapport (longueur / diamètre) et une meilleure cohérence entre la fibre et le matériau.

En conclusion , il est important d'exprimer que les fibres garantissent le rôle capital de changer la distribution des fissures, de les couvrir, donc de rendre le matériau plus résistant et plus durable .

### I.9 Fabrication des fibres : cas des fibres d'acier

La confection des fibres d'acier s'est développée largement pendant les dernières décennies, toutefois au démarrage, les fibres d'acier en tôle coupée sont venues de ces types de fibres.

Le premier procédé, certifié en 1974 par Batelle corporation de l'Ohio [36], comporte l'extraction des fibres d'un bain liquide d'acier. Il s'agit d'une roue qui conçoit une suite de disques parallèles en cuivre crénelés est immergée sur une petite surélévation dans un bain d'acier en fonte, elle envoie par rotation dans l'air sous l'effet de la force centrifuge des fractions de métal en fusion qui se refroidissent et octroient des fibres de petites tailles.

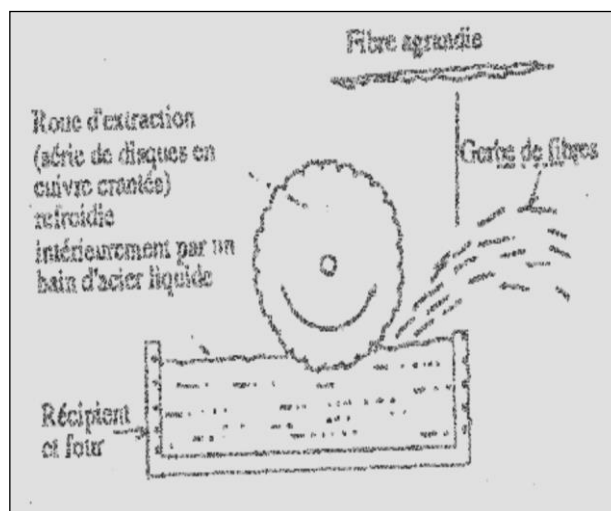


Figure I.9 Procédé de production de fibres métalliques par extraction d'un bain liquide

Les paramètres qui bornent les caractéristiques géométriques des fibres sont : Les entailles du disque, sa vitesse de rotation, ainsi que sa profondeur d'immersion. La Figure.I.9 évoque la manière de fabrication des fibres d'acier.

Selon ce procédé, on peut disposer des fibres avec des surfaces discontinues, ce qui aide à la cohésion avec la matrice cimentaire. Leurs diamètres peuvent dégringoler jusqu'à 0.5 mm et leurs longueurs peuvent aboutir jusqu'à 50 mm. Ce précepte industriel consente à réaliser des fibres avec une plus grande quantité en carbone, des fibres en acier inoxydables, des fibres réfractaires et des fibres en ferrochrome.

Un autre procédé selon [29] comporte à faire parvenir de l'acier dans une filière pour procurer des fibres d'acier. Les fils ininterrompus peuvent être découpés et pourvus de crochets. Les fibres sont assemblées en bûchettes ou en sacs de 10 à 20 fibres simples. Ces paquets de fibre peuvent être instantanément mis dans le malaxeur, au même moment que le mélange sec.

Les contraintes de malaxage, ont un effet sur les plaquettes qui se brisent en deux à chaque fois. Quand les paquets ne comprennent que 2 à 4 fibres, les contraintes d'adhérence des fibres sont donc plus grandes que les contraintes de malaxage. L'effet de l'humidité naturelle des agrégats ou l'arrivée de l'eau décompose la colle, délivrant certainement les fibres qui saisissent leur élanement élémentaire.

La résistance à l'extraction de la fibre est élevée grâce à l'existence des crochets aux extrémités, ce qui offre un excellent attrouplement des fibres suite à la fissuration. Leurs diamètre s'étale de 0.4 à 0.8 mm et leurs longueurs de 25 à 60 mm.

L'exploitation des matériaux de diverse nature ainsi que le développement de fibres spécifiques a été motivé par la recherche incessante d'exploits techniques associée aux nécessités économiques.

Effectivement, des recherches élaborées en Belgique ont dévoilé que quelques fibres avec des crochets disposent d'une énorme cohésion et peuvent augmenter les résistances. D'autres fibres métalliques particulières, réalisées et exploitées sous le nom de Beki-shield, exposent des caractéristiques captivantes. Elles sont très fines et moins corrosives, au touché elles sont moins désagréables que les fibres de verre, et sont réalisées depuis un acier inoxydable [37]. Une façon de confection des fibres en France a été authentifiée par le Groupe Saint- Gobain. Ces dernières sont exploitées sous le nom FIBRAFLEX, elles sont acquises par immersion à vitesse élevée d'un jet de métal liquide sur une roue en rotation puis rafraîchis à l'eau.

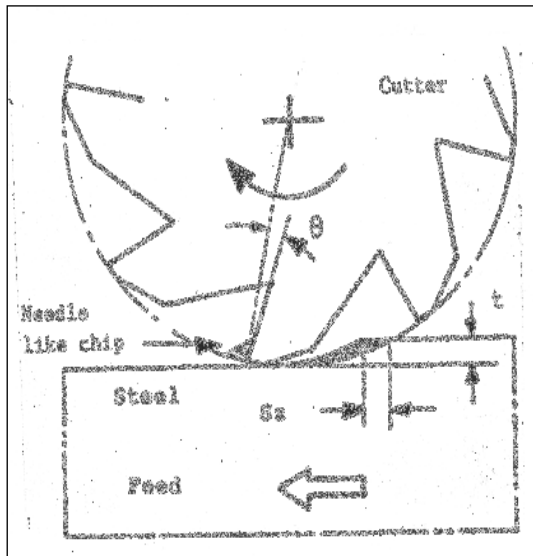


Figure I.10 Schéma de la méthode fraissage

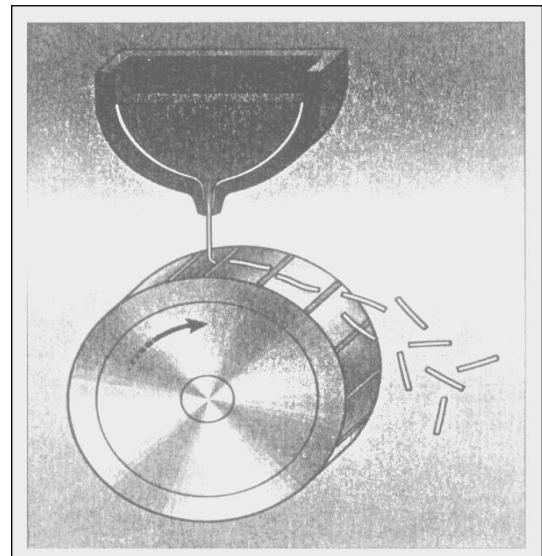


Figure I.11 Méthode de la trempe d'un jet de métal sur une roue en rotation

## I.10 Application du béton renforcé de fibres

On peut spécifier deux méthodes pour l'utilisation des fibres :

1. **Le béton consolidé de fibres seules** : pour ce cas de figure les caractéristiques des bétons fibrés seront reliées à plusieurs éléments. Ces éléments sont :
  - Le modèle et les caractéristiques de la matrice.
  - Le type et les caractéristiques des fibres.
  - la méthode d'emploi.
2. **Le béton consolidé avec des armatures classiques** : pour ce cas de figure on insère les fibres dans les ossatures en béton armé sous des sollicitations combinées dans le but de majorer la résistance et la rigidité des éléments de structure.

Tableau I.5 Quelques sites ou le béton de fibre a été utilisé

Applications	Intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton
Canalisation et coques minces faiblement sollicitées	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge</li> <li>-Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration</li> </ul>
Dallage, chaussé en béton, dallages manufacturés, et tous éléments structuraux soumis à la flexion.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Diminution de 40% de l'ouverture des fissures</li> <li>-L' augmentation de la rigidité après la fissuration</li> <li>-Augmentation de la résistance au cisaillement</li> <li>- Augmentation la résistance à l'usure</li> </ul>
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...).	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Amélioration de la charge ultime</li> <li>-Pas de la rupture catastrophique</li> </ul>
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles ex : piste d'un aéroport.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-L'énergie absorbée est plus importante</li> <li>-La durée de choc est augmente</li> <li>-Loi de comportement du matériau et fortement modifiées</li> </ul>
Structures soumises à des sollicitations combinées	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Les majorations de résistance et de rigidité obtenues sous sollicitations simples ne se trouvent pas forcément dans le cas du comportement sous sollicitations combinées</li> </ul>
Réparation des revêtements : routiers, tablier du pont.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Amélioration de la résistance aux chocs</li> <li>-Amélioration de la déformabilité</li> </ul>
Parties exposées aux fortes variations température aux mêmes très hautes températures	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Remplacements avec succès du revêtement réfractaire</li> <li>-Diminution le coût de réparation des éléments réfractaires</li> </ul>
Stabilisations des parois rocheuses les talus, les tunnels, les galeries souterraines	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Evite le travail de fixation du grillage ordinairement employé</li> <li>-Diminution le coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus,</li> </ul>
Fabrication des pieux, revêtements ignifuges isolants (constructions navale)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Augmentation la résistance au feu</li> <li>-Augmentation la résistance à l'usure</li> <li>-Augmentation la durabilité du revêtement</li> </ul>

## I.11 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées

### I.11.1 Différentes formes d'endommagement thermique

Les effets des hautes températures sur les dégâts du béton ont été mis en avant par les incendies d'ouvrages en béton. À partir des années quarante, les conséquences des températures élevées sur les propriétés du béton ont été ramenées. Les événements sur les incendies de



bâtiments montrent de sérieuses dégradations provoquant une grande perte de résistance mécanique des ouvrages menant à leur non fonctionnalité, citons comme exemples la (Tour Windsor, Madrid, 2005) et (Tunnel Sous la Manche, 1996-2008 ; Tunnel Mont Blanc, 1999 Tunnel Gothard, 2001 ; Howard Street Tunnel, 2001 ; Tunnel Fréjus, 2005). La Figure I.12 décrit quelques dommages des structures en béton suite à des incendies :



*Tunnel Sous la Manche en phase de réparation à la suite de l'incendie de Septembre 2008, [Lejd, 2008].38*



*Tour Windsor (Madrid) 2005, Partie de la structure en béton, [Debu, 2005].39*

*Figure I.12 Illustrations de dégradation d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.*

D'après les observations de [40] les dégâts sur le béton causés par des instabilités thermiques peuvent être rassemblés de la manière suivante :

- Eclatement explosif : Ce genre d'éclatement a été observé suite à l'exposition à une température supérieure à 100°C, ce phénomène se produit généralement pendant les trente premières minutes de l'exposition au feu. Ses dégâts sont essentiellement caractérisés par un détachement brutal de petits et de gros morceaux de bétons, cet effet produit un bruit fort au moment de la rupture.
- Eclatement de surface : Il a nettement moins d'impact que celui de l'éclatement explosif, Car il cause un éclatement de la surface du parement exposé au feu, suivi par le détachement de petits morceaux qui peuvent aller jusqu'à 20 mm
- Eclatement de granulats : Il est causé par la dilatation thermique des granulats proches de la surface sous l'effet de la montée en température. Les dommages générés par l'éclatement de granulats sont superficiels.



- Eclatement d'angle : Ce genre d'éclatement se voit après une exposition prolongée au feu, à ce stade, le béton devient faible et des fissures apparaissent le long des bords et des coins de l'ouvrage.
- Eclatement par détachement des granulats : Avec la montée en température se produit une modification de la microstructure de la pâte de ciment, celle-ci déclenche une dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats, ce qui provoque des fissures internes.
- Eclatement en phase de refroidissement : Ce genre d'éclatement est dû à la présence des granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement, il est non violent et sans bruit

### I.11.2 Mécanismes du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

Les hypothèses fondamentales permettant d'expliquer le phénomène d'éclatement considéré au sein du béton chauffé sont :

- L'éclatement hydraulique par pression : D'après les études faites par des chercheurs [41, 42], l'éclatement hydraulique est lié à l'accroissement de la pression et de la vapeur d'eau au sein du matériau. Quand la température monte, qu'elle que soit sa forme libre ou liée, l'eau qui se trouve dans le matériau s'évapore. Une partie de cette eau vaporisée atteint la surface chauffée, l'autre partie se déplace vers les zones froides à l'intérieur du matériau et se condense.

Jansson et Bostrom [43] ont supposés que la condensation de l'eau engendre ce qu'on appelle un «bouchon hydraulique », une bande où la saturation accroît à tel point que la migration devient difficile. Pour le démontrer ils ont effectués des recherches expérimentales sur des bétons sans fibres et des bétons contenant des fibres de polypropylène qu'ils ont ensuite exposé à un feu standard (ISO 834), les résultats ont montré que lors de la montée en température une zone de forte saturation apparaît. Dans la Figure I.13 on voit nettement les faciès du béton sans fibres chauffé pendant 10, 15 et 20 minutes. Ils découvrent que la zone saturée devient plus visible pour les chauffages de 15 mn et 20 mn.

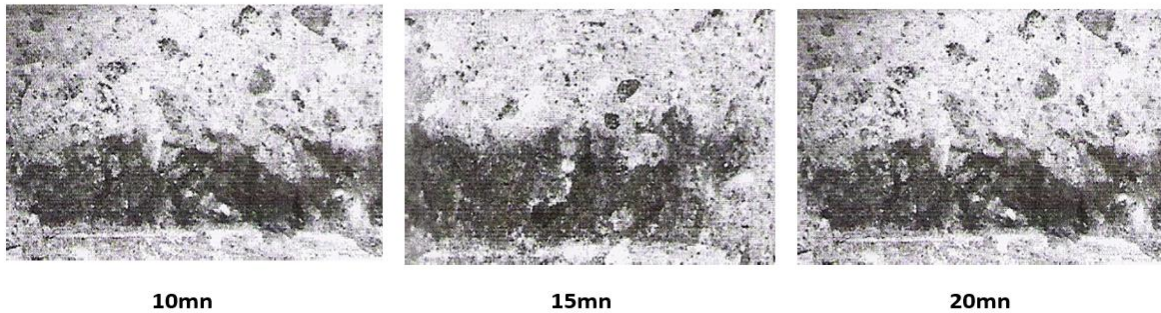


Figure I.13 Faciès de béton sans fibres montrant l'apparition de la zone de forte saturation au bout de 10, 15 et 20 minutes d'exposition au feu standard, [43].

Le bouchon hydraulique entraîne la hausse de pressions de gaz du côté chaud du front de saturation. Ajoutées à ces pressions de vapeur, les fortes contraintes thermiques ; un phénomène d'écaillage apparaît. Dans la Figure I.14 on voit une illustration détaillée du mécanisme d'écaillage que crée l'exposition à une source de chaleur au béton.

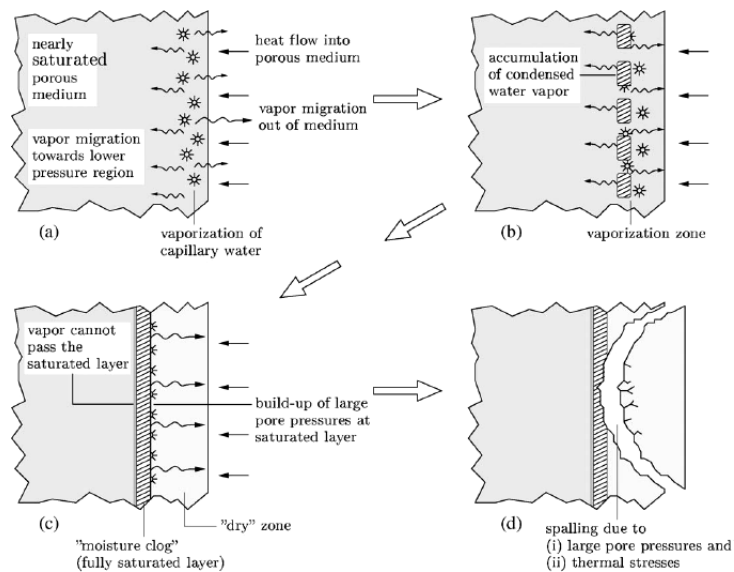


Figure I.14 Illustration du mécanisme d'écaillage du béton [44].

D'après [45] sous l'effet d'une haute température une structure en béton, est défini par quatre zones (Figure I.15 (a))

- Zone 1 : C'est une bande dont la température augmente rapidement, elle se situe près de la surface chauffée et elle est complètement sèche.
- Zone 2 : C'est une bande où l'humidité et la chaleur sont apparentes, et où on voit se développer des gaz sous pression qui repoussent la vapeur vers

l'extérieure, sous la surface chauffée et la phase d'eau liquide, dans l'autre sens, vers l'intérieur du matériau.

- Zone 3 : Cette bande se forme progressivement sous l'effet des mouvements de masse et alimentée par les mouvements d'eau liquide, elle s'humidifie.
- Zone 4 : Cette bande garde presque toutes les caractéristiques initiales du matériau du fait qu'elle a été préservée des hautes températures et donc restée froide

Les bétons à hautes performances, contrairement aux bétons ordinaires, sont plus susceptibles à l'éclatement par pression, ceci est dû à leurs faible perméabilité, La forte pression de vapeur d'eau produite lors du chauffage induit systématiquement l'éclatement de ces types de béton BHP.

- L'éclatement par obstruction de dilatation thermique : Selon [46,47] la surface du béton soumise au feu subit une dilatation thermique causée par le chauffage, ce qui engendre des contraintes de compression parallèles à cette surface, ce qui entraîne une destruction du matériau par délaminage (Figure I.15 (b)).

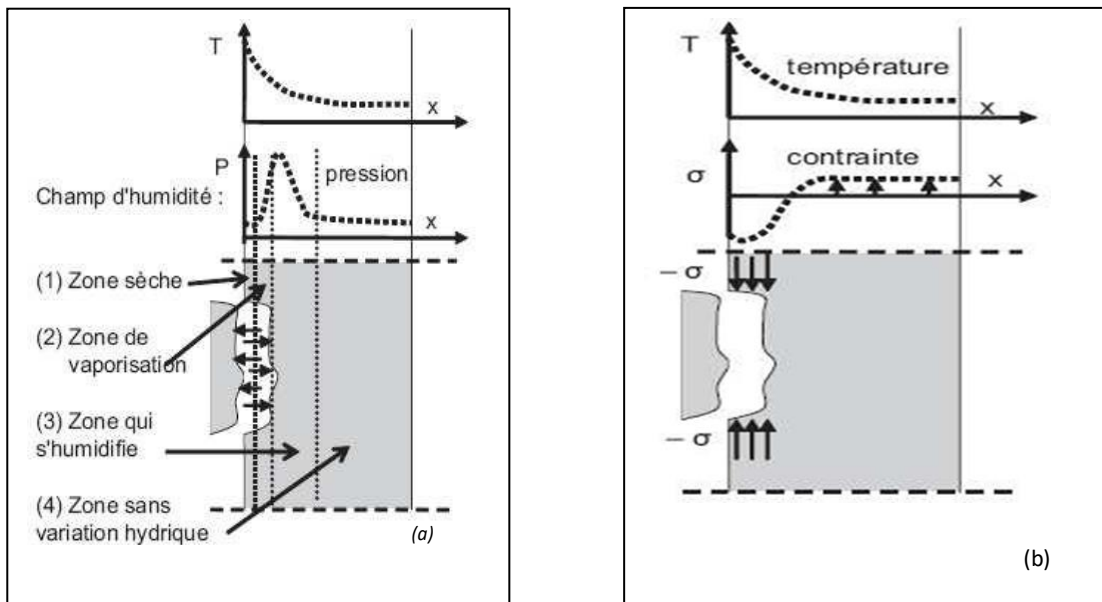


Figure I.15 Principales hypothèses de l'éclatement du béton :  
 (a) Pressions internes [42], (b) dilatation thermique empêchée [46], [45]

De ce fait, l'instabilité thermique est expliquée par deux processus, le processus thermomécanique pour lequel le déséquilibre est causé par de grandes contraintes de compression proches de l'aire chauffée et celui thermohydrique qui lie l'instabilité thermique à

l'élaboration de puissantes pressions de vapeur.

Mindeguia [48] a effectué des travaux sur mesures de pression de vapeur concernant les différentes combinaisons de béton ce qui a amené à des risques de déséquilibre thermique (Courbe ISO) pour des bétons subissant une pression de vapeur inférieure à 0.6 MPa.

D'autre part des bétons qui ont subits des pressions supérieures à 2.5 MPa, n'ont présenté aucun déséquilibre thermique. Également, en faisant varier la vitesse de chauffage, l'auteur considère, avec un réchauffement élané, des pressions de vapeur élevées et des risques de déséquilibre thermique que ce soit pour le béton classique (résistance en compression à 28 jours : 37 MPa) ou pour le béton à hautes propriétés (résistance en compression à 28 jours : 61 MPa).

Dans le cas d'un chauffage lent, la profondeur altérée des dalles ainsi que le volume du béton éjecté sont plus élevés par rapport au chauffage ISO.

Les causes de l'instabilité thermique ne sont pas dues uniquement aux processus thermo hydrique et thermomécanique c'est donc un résultat de processus calorifiques, hydriques, mécaniques groupés et possiblement d'un grand nombre de variables.

### I.11.3 Paramètres favorisant l'instabilité thermique du béton

La destruction du béton soumis à des températures élevées est causée par une panoplie de variables :

- La présence d'eau dans le béton : L'instabilité thermique est provoquée particulièrement par l'existence de l'eau au sein du béton. Elle est à l'origine de la formation de pressions intérieures qui sont considérées comme principale cause d'explosion. La pression de vapeur dans le matériau change en fonction du pourcentage en eau libre ,c'est ce qui a été conclu par Hager [49] suite aux investigations qu'il a établies dans le but d'évaluer la pression de vapeur dans des prototypes de BHP séché à 105°C partiellement séché à 80°C et non séché. Les aboutissements montrent une petite pression de vapeur pour un béton séché qui est de l'ordre de 0.26 MPa, et une grande pression dans un béton non séché d'une valeur de 4 MPa. Les chercheurs tels que [50], [51], [52] observent un bornage du danger d'explosion quand le pourcentage en eau est en dessous de 3-4%.

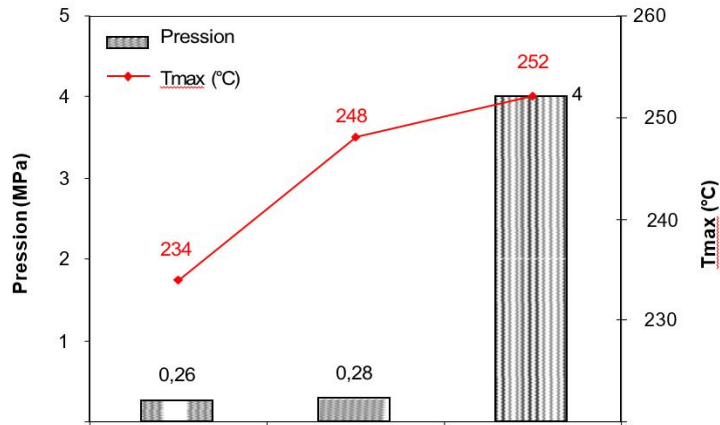
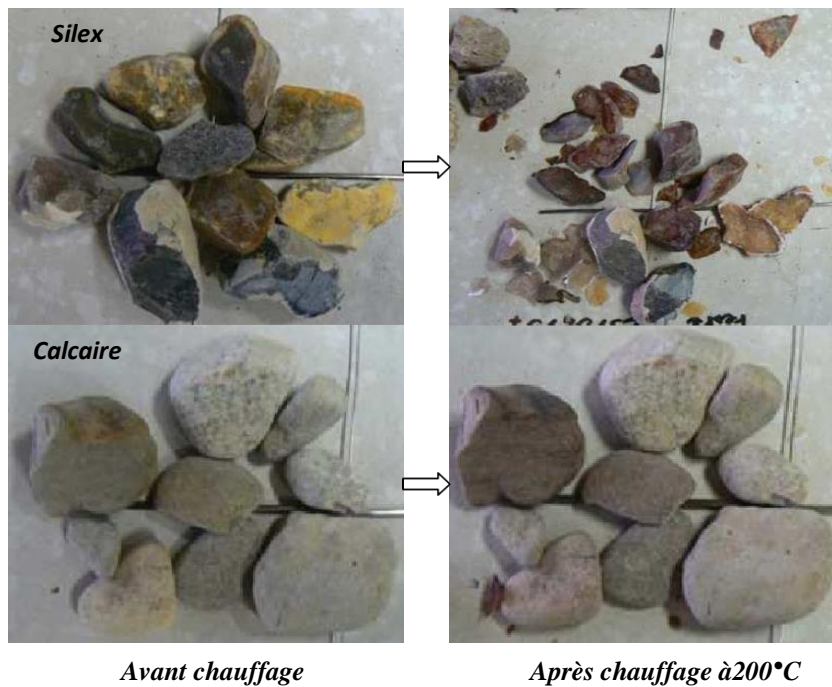


Figure I.16 Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [49]

- Les caractéristiques physico-mécaniques du béton : Le déséquilibre thermique d'un matériau avec un rapport E/C minime est plus haut que celui visible dans un matériau à rapport élevé. Sous l'effet des grandes températures, les caractéristiques physiques des bétons, à hautes performances, à savoir, la composition consistante, la porosité minime ainsi qu'une faible perméabilité, produisent délicatement le transport des liquides, créant de ce fait une hausse de pressions intérieures.
- La vitesse de chauffage : La vitesse de chauffage est proportionnelle au risque d'éclatement, elle présente une grande influence sur l'équilibre thermique du béton. Les tests effectués par [53] sur des échantillons exposés à des traitements thermiques ont montré que des spécimens traités à une vitesse de  $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$  éclatent, par contre ceux exposés au dixième de cette même vitesse, n'explorent pas. De puissants gradients thermiques sont produits lors de l'échauffement rapide de l'aire du matériau. Ils engendrent de diverses contraintes qui créent l'écaillage du matériau.
- La nature des granulats : D'après les travaux menés par [40], [48] ils constatent que sous l'effet de hautes températures, la conduite des composants granulaires diffère par rapport à leur origine chimique et géologique, l'équilibre thermique est meilleur pour les éléments calcaires que pour ceux siliceux, le facteur d'allongement de ceux-là est plus élevé que celui des composants granulaires calcaires.

Mindeguia [48] a réalisé des tests de caléfaction avec des températures pouvant atteindre  $200^{\circ}\text{C}$  sur des squelettes granulaires silico-calcaires, les observations montrent qu'une désintégration agressive des squelettes granulaires de silex apparaît dans la plage de chauffage allant jusqu'à  $165^{\circ}\text{C}$ . Dans la Figure I.16 on distingue nettement la différence du

déséquilibre thermique entre les squelettes granulaires de silex et ceux calcaires sous l'effet d'un traitement thermique à 200°C.



*Figure I.17 Illustration du caractère instable des granulats de silex comparé aux granulats calcaires [48]*

- La dimension de l'échantillon : Des études accomplies par [54] sur des échantillons tubulaires  $\varnothing 11 \times 22$  cm et  $\varnothing 16 \times 32$  cm ont montré que le danger de déséquilibre thermique est plus sérieux pour les échantillons de grandeurs  $\varnothing 16 \times 32$  cm. Ce qui explique que la dimension des échantillons est un agent à fixer dans la donnée de la stabilité thermique
- La transformation thermique arrêtée : elle a pour effet de créer des pressions intérieures en compression qui migrent dans le chemin parallèle à l'étendue exposée aux flammes. Cette contrainte incite la séparation de l'élément de construction, en outre les contraintes intérieures récréent un effet dans le départ de la dégradation.
- L'existence de la force mécanique : Selon les constatations de l'auteur [55], le phénomène d'éclatement est favorisé dans certains cas par la charge mécanique particulièrement celle de la précontrainte

#### I.11.4 Transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire

Le rôle de l'eau dans la conduite de la pâte de ciment est capital. Exposée au chauffage, elle augmente puis se volatilise en engendrant une dessiccation des hydrates composés. D'après



[56] et [57] les principales transformations de la matrice cimentaire sont les suivantes :

- 20°C - 120°C : Selon [58] c'est l'évacuation de l'eau libre et une partie de l'eau liée. [57] considère que l'eau émancipée est entièrement perdue à 120°C. [59] note avant 100°C une décomposition de l'ettringite et son suppression totale de la matrice cimentaire.
- 130°C - 170°C : cette période se manifeste par une transformation endothermique de désintégration du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [57], [58].
- Les symptômes initiaux de dégradation du C-S-H sont distingués avant 100°C et continuent jusqu'à 300°C [59], [60].
- 450°C - 550°C : A ce stade on a une désintégration de l'hydroxyde de calcium. Elle s'exprime en délivrant de l'eau selon l'équation :  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ . [57], [58]
- 600°C - 700°C : pendant cette période c'est un deuxième stade de la dessiccation des CHS. Cette dessiccation est suivie d'une délivrance des particules d'eau en procréant une nouvelle forme de  $\text{C}_2\text{S}$  [57].
- Dépassant la température de 650°C : on a une désintégration du  $\text{CaCO}_3$  suivi d'une libération de chaleur et aussi de  $\text{CO}_2$ , suivant l'équation suivante :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  [60].
- Dépassant la température 1300°C : Fonte de matrice cimentaire ainsi que les compositions granulaires, suppression des sulfates et volatilisation des antiacides [56].

D'après les investigations établies par [59], il déduit qu'avec l'accroissement de la température le changement des importants éléments de la matrice cimentaire est suivi par l'ESRF selon une technique de diffraction des neutrons. Il s'agit de l'hydroxyde de calcium, de l'ettringite, du  $\text{CaCO}_3$ , du  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  du gel C-S-H et du CaO. La vitesse de caléfaction est de  $1^\circ\text{C} \cdot \text{mn}^{-1}$ . La Figure I.18 montre la conduite de ces composés en fonction de l'échauffement.

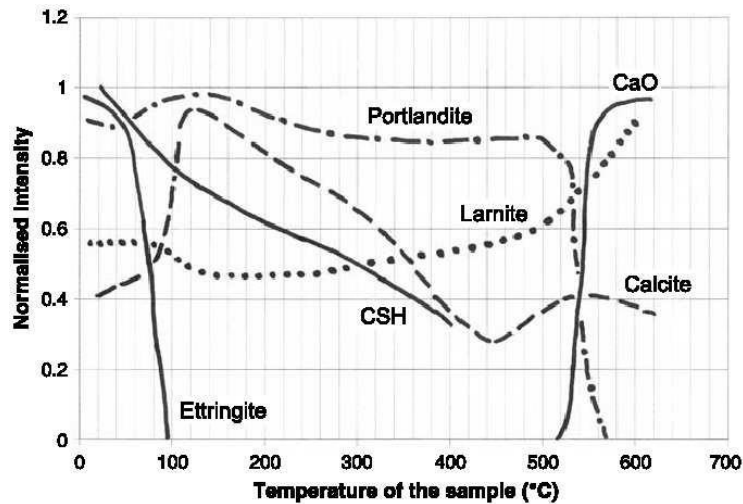


Figure I.18 Evolution des composantes du ciment sous l'échauffement [59]

L'interprétation des divers graphes en dessous de 100°C évoque une pulvérisation totale de l'hydroxyde de calcium. La dessiccation des silicates de calcium hydratés dure jusqu'à 400°C. En tâtant 500°C, on constate que l'hydroxyde de calcium se désagrège graduellement. Dépassant cette chaleur, la portlandite se réduit en formant du l'oxyde de calcium puis on note sa disparition totale au-delà de 600°C laissant place à l'oxyde de calcium. L'évacuation de l'eau avec un haut échauffement engendre une importante mutation des caractéristiques mécaniques du matériau. La porosité fine, dans les bétons à hautes performances, entrave l'eau de s'écouler et de s'évacuer du matériau. D'après [60], [61], cette manifestation procrée une hausse de la pression de vapeur d'eau celle-ci provoque des réactions thermohydrique et une conversion supplétif des hydrates formés.

#### I.11.5 Evolution des granulats

Les composés granulaires évoquent aux alentours de soixante jusqu'à quatre-vingt pourcent du volume du béton et forment sa structure. A l'exception des cas de réactions alcali-granulats, ou ils présentent un comportement différent aux températures élevées, les granulats sont inertes dans le béton. L'élévation de la température change la structure des minéraux qui constituent la roche. Sous un haut échauffement, les deux modèles de composés granulaires soit les granulats calcaires ou ceux siliceux exposent des performances différents par rapport à leurs états géologiques.

Les composés des granulats siliceux sont de type inorganiques tels que le  $\text{SiO}_2$ , la calcédoine, l'opale. Le  $\text{SiO}_2$  qui se trouve dans ces composants granulaires à base de silice est sous aspect d'une construction tel qu' on a une particule de silicium ceinturée par quatre autres



d'oxygène qui, à partir d'une température de 576°C, subit une légère rotation des liaisons pour former une structure cristalline de symétrie hexagonale. Ce changement de phase du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  est suivi d'un changement de volume de 1% à presque 6%. [56] attribue l'endommagement dans le béton à une mutation de composition transparente du  $\text{SiO}_2$  dans les composés granulaires.

A partir des études réalisées par des chercheurs il a été constaté une déstabilisation thermique de quelques composés granulaires à base de silex. Ces derniers éclatent en de diverses fractions, d'après [48] cet éclatement se situe entre 110°C et 165°C et selon [62] il se situe entre 150°C et 450°C. L'existence d'eau empoignée dans les orifices microscopiques ou celle découlant de réaction d'introduction de groupes hydroxyle qui sont la cause de l'instabilité des granulats à faible température. La faible perméabilité des silex, permet aux pressions de vapeur d'augmenter en aboutissant à l'éclatement des granulats.

Le phénomène observé au niveau des granulats calcaires, est différent. Ces derniers présentent une conduite calorifique invariable jusqu'à atteindre 700°C. Dépassant cet échauffement, le  $\text{CaCO}_3$  se divise en donnant du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CaO}$ , ce dernier ainsi composé, au cours de la congélation, réagit avec l'air humide pour constituer de la portlandite dont la capacité dépasse le composé primaire.

[63], [64] attribue la diminution des résistances mécaniques à la formation de la portlandite responsable de l'accroissement de fissure dans le béton

De ce fait, à la suite des recherches effectuées par [56] et [65], les caractéristiques d'un bon granulat sont :

- Un bas indice de transformation calorifique
- Transformation inexistantes après réfrigération.
- Présence d'un équilibre thermogène qui se traduit par un bas nombre de monts sur les graphes d'évaluation thermogène différentielle et thermo gravimétrique.
- La pierre qui forme le composé granulaire doit disposer d'une combinaison mono - minérale

#### I.11.6 Déformations thermiques du béton

Le gonflement et le retrait représentent les deux étapes de la transformation thermogène de la matrice cimentaire.

Suite aux études de recherches réalisées par [66], [67] il a été constaté que la matrice cimentaire augmente de volume dans la phase d'échauffement touchant 150°C. [69], [66]

remarquent que la transformation thermogène est influencée par la vitesse de chauffage. Pour une vélocité d'échauffement en dessous de dix degrés.minute<sup>-1</sup>, l'énergie échangée lors d'un changement d'état est tout autour de deux cent degrés. [66] constate qu'à une promptitude de trente-cinq degrés minute<sup>-1</sup>, la température frôle 300°C. D'après Hager [49] Les promptitudes à un degré Celsius .mn<sup>-1</sup> utilisées mènent à des réchauffements de conversion 300°C. [68] considère que cette période d'augmentation primaire de la matrice cimentaire est due aux déplacements phénoménaux de plusieurs atomes.

Dépassant le seuil de température de 150°C, l'évacuation de l'eau renfermée dans le béton cause un rétrécissement important de matrice cimentaire. La matrice cimentaire à hautes performances se gonfle plus et se rétracte moins que la pâte ordinaire.

Les composés granulaires présentent une propriété autre que celui de matrice cimentaire. L'expansion thermique des composés granulaires concerne l'état géologique des pierres spécialement de leur pourcentage en SiO<sub>2</sub>

[68] constate que le facteur d'augmentation thermogène des composés granulaires concerne aussi leur pourcentage en eau et degrés d'ordre structurel des inorganiques. Les composés granulaires calcaires ont des transformations thermogènes inférieures que ceux à base de SiO<sub>2</sub>.

Pour des températures comprises entre 20°C et 100°C le facteur calorifique des pierres calcaires est de 5.5– 11.8 x 10<sup>-6</sup>. °C<sup>-1</sup> et celui des pierres à pourcentage élevé en SiO<sub>2</sub> est de 9 – 10 x 10<sup>-6</sup>. °C<sup>-1</sup>

La déformation thermique du béton dépend principalement de la nature des granulats étant donné qu'ils sont majoritaires dans sa composition. Suite aux travaux de Piasta [70] montrés dans la Figure I.19 concernant un travail comparatif de transformation calorifique de la matrice cimentaire avec celle d'un matériau renfermant des granulats de plusieurs endroits. La conversion du matériau est exclusivement attachée à l'origine des composés granulaires qui forment son squelette. L'augmentation du volume du matériau est déterminée par une dilatation déliée de la température dépassant 150°C. On constate que la matrice cimentaire s'oppose à cette expansion et se rétrécit. Ultérieurement à 600°C, on évoque que l'expansion est stoppée au sein du matériau A la limite ente pâte de ciment et les composés granulaires se forme des incohérences de transformations suscités par la mutation antonyme des composés granulaires et de la matrice cimentaire ce qui procréé des pressions de traction dans la matrice cimentaire et des pressions de coercion au niveau des composés granulaires. L'attitude opposée des

composés granulaires – matrice cimentaire pourrait donc concevoir des fissures microscopiques dans le béton.

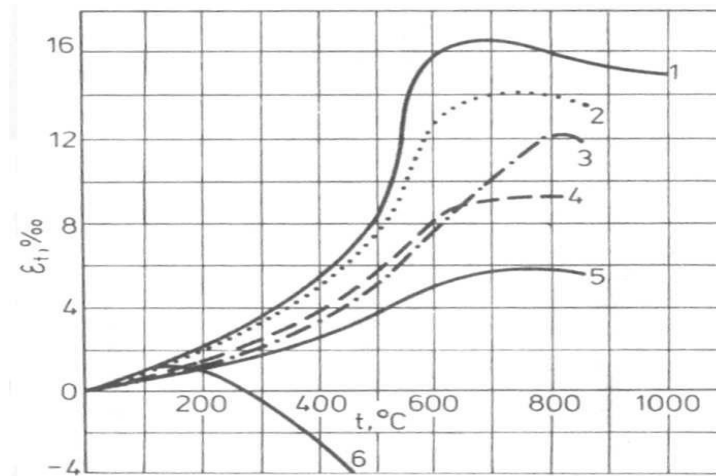


Figure I.19 Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats 1 : Siliceux, 2 : Grès, 3 : Calcaire, 4 : Basalte, 5 : Argiles expansées, 6 : Pâte de ciment, [70]

### I.11.7 Evolution des propriétés mécaniques

Le matériau obéit à des mutations physico-chimiques suite à l'élévation de température, la variation de sa microstructure influence ainsi ses performances mécaniques. Les résultats remontés par les diverses recherches sur le comportement du béton chauffé, traduisent différemment les évolutions de ces paramètres.

Les divergences des investigations sont dues probablement aux conditions expérimentales, comme la durée et la vitesse de chauffage et refroidissement ainsi que la géométrie des éprouvettes. On étudie dans cette partie, le changement des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement. Les propriétés mécaniques sont la résistance en compression et la résistance en traction.

#### I.11.7.1 Résistance en compression

La variation de la résistance en compression en fonction de la température a fait l'objet de plusieurs recherches expérimentales. Cette évolution est due à de multiples paramètres tels que : nature du liant et des granulats, rapport agrégat/ciment et rapport E/C

Des tests de compression sous traitement thermique sur diverses compositions du matériau avec des pourcentages différents du rapport Eau/Ciment de 0.3, 0.4 et 0.5 ont été accomplis par Hager [49]. L'interprétation de la courbe d'évolution selon la Figure I.20 de la

résistance par rapport à l'échauffement nous donne ce qui suit :

Le premier cycle, varie de la température ambiante à celle de 100°C, est distinct par une réduction de la compression jusqu'à trente pourcent

Le second cycle, entre 100 et 200°C, est noté par un accroissement de résistance en fonction de l'échauffement. Les bétons à haute performances ne montrent cet accroissement appelé différé qu'à 400°C.

D'après [71], [72], [53], cela se traduit par la faible perméabilité de ces bétons compacts.

La dernière étape, se situe en dépassant la température de 400°C pour le BHP et avec 250°C pour les autres bétons, elle se considère par une réduction de résistance de manière insipide. On constate des crevasses initiales entre les composés granulaires et la matrice.

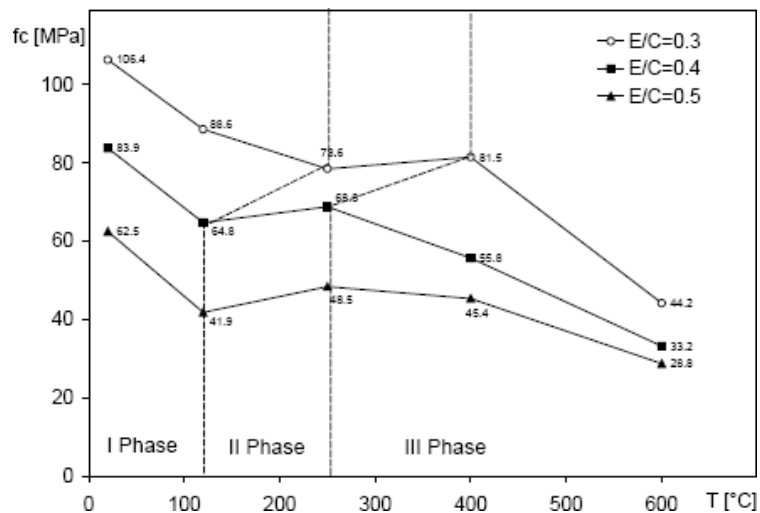


Figure I.20 Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures [49]

Les travaux de recherches menés par Phan [74-75], [76], résument la variation de la résistance en compression vis-à-vis l'échauffement en deux étapes.

- Le stade initial, allant de l'échauffement environnant à 400°C. Il est distinct par une basse réduction, une conservation ou bien un accroissement de résistance.
- Le deuxième stade, allant de la borne médiatrice à l'échauffement à 600°C, il est défini par une réduction incessante de la résistance en compression. Une réduction de la résistance en compression entre 100 et 200°C est distinguée sur les tests avant ou après chauffage.

Khoury [65] accorde la baisse de résistance enregistrée entre 100 et 150°C à un gain de

fluidité de l'eau qui à ces températures a pour conséquence de réduire les forces de liaison entre les couches de C-S-H. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH HO-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison faibles.

D'après Dias [63], le gain de résistance vers 300-350°C est dû à une réaugmentation des forces de liaisons entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface.

Dépassant la température de 350°C à 400°C, la résistance baisse, cette baisse de résistance du béton est souvent accordée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation. Au-delà de cet échauffement, la conduite du matériau est jointe à l'introduction de plusieurs hydroxydes de calcium, la matrice cimentaire rétrécit et les composés granulaires subissent une expansion.

#### I.11.7.2 Résistance en traction

Il y a un minimum de travaux qui ont été effectués pour aboutir à la résistance à la traction sous un traitement thermique vu la difficulté trouvée dans la réalisation des tests. La majorité des expériences sur la résistance en traction sont accomplies sur des tests après réfrigération.

La Figure I.21 montre la variation de la résistance résiduelle en traction vis à vis du cycle de traitement thermique avec une vitesse de  $1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$  et ce suite à des tests accomplis par Kanéma[53] relatifs aux tests de traction sur des compositions de matériau.

L'auteur a pris en considération dans son étude le rapport E/C, les paramètres tels que la promptitude d'échauffement, la période de la phase d'échauffement ainsi que l'âge du matériau.

Il a été constaté une diminution de la résistance à froid en traction pour les diverses formulations de l'aggloméré et elle est en fonction du rapport Eau/Ciment.

A partir de 150°C on remarque que les matériaux à bas rapport Eau/Ciment exposent une réduction plus expressive de leur résistance par rapport aux matériaux à Eau/Ciment supérieur

Aussi les auteurs tel que Min Li [77] montre à travers ces recherches une réduction plus prompt de la résistance à froid en traction des matrices à grandes propriétés que celle des matrices habituelles entre 200 et 400°C.

Jonatka [61] confirme à partir de ces expériences que la destruction du gel C-S-H peut s'établir à partir de 100°C.

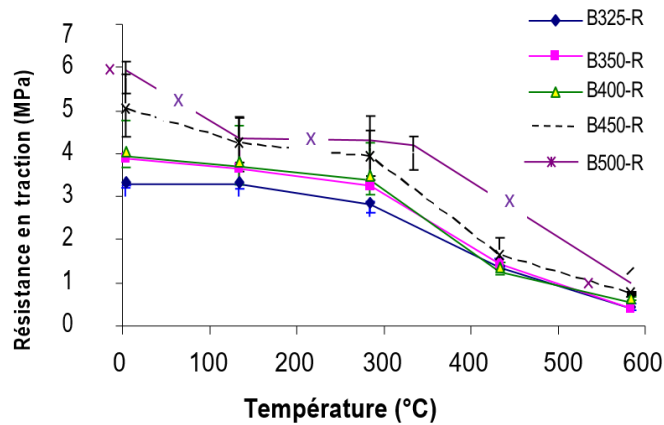


Figure I.21 Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage [53]

Un échauffement à la promptitude inférieure à un degré. minute-1 vis avis à la promptitude d'un degré minute-1 dévoile une résistance basse des matériaux B325, par contre d'après les travaux de Kanema[53] avec les bétons B500 les aboutissements de la résistance en traction sont peut influençable avec la vitesse de chauffage

Par ailleurs, d'autres auteurs tels que Khoury [79], Hager [49] examinent une élévation de la résistance en traction chauffée contre celle résolue à froid.

D'autres résultats indiquent à travers des travaux réalisés que la résistance à la traction à froid des matériaux s'amointrit sous l'effet d'échauffement. Noumowé[57] , Chen et al, [90], Suhaendi et al, [89], Haniche [78], Pilya [95], et Yermak, [113]

#### I.11.7.3 Module d'élasticité en compression

Par suite aux diverses mutations physiques et chimiques de la pâte de ciment et la mutation des composés granulaires, la transformation du module élastique traduit celle de la raideur du matériau en fonction d'un haut échauffement.

D'après les études faites par Gaweska[7] et selon la Figure I.22, il a été constaté une décroissance du module élastique entre 20 et 600°C sur trois types de béton : BHP M100C, M75C, M75SC et un béton ordinaire BO M30C. Les valeurs du module d'élasticité à 600°C sont inférieures à 15%. La plus faible valeur est celle du M75SC (moins de 2 %). L'auteur déduit aussi que le rapport E/C n'influe pas sur l'évolution du module d'élasticité avec la température

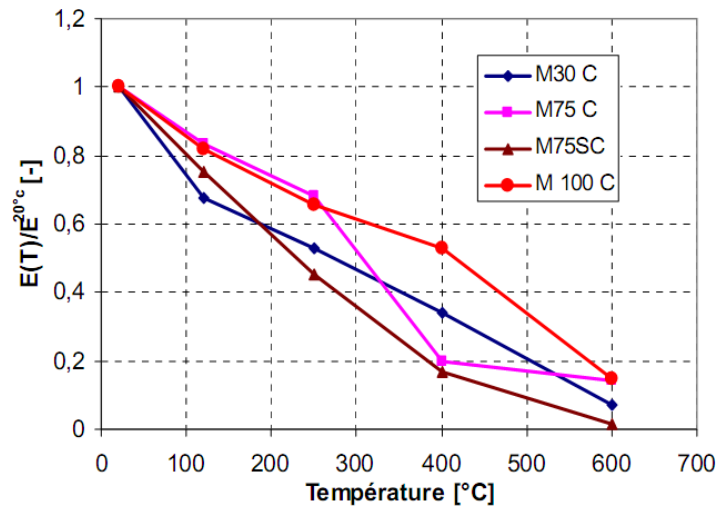


Figure I.22 Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C [7]

Les transformations du module d'élasticité avec l'accroissement du chauffage dépendent surtout de la structure microscopique de la matrice cimentaire (accroissement de la dégradation du matériau par la dessiccation et le fendillement de la pâte). De ce fait, en fonction de la hausse de l'échauffement, et avec un corps transformable, on contribue à la disjonction de liens intérieurs qui génèrent une réduction du module élastique [38].

En travaillant sur des essais à chaud Sabeur [80] remarque que peu importe le quotient Eau/Ciment une réduction graduelle de la résistance en traction vis à vis l'échauffement.

A partir des expériences réalisées par Noumowé [57], Tolentino [81], Kanéma [53] pour déterminer les modules d'élasticité résiduels, ces derniers concluent que le module élastique baisse avec le chauffage, toutefois le quotient Eau/Ciment n'a pas d'influence sur sa transformation.

## I.12 Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée

Dans cette partie on va découvrir le rôle des fibres étudiées au sein du matériau sous l'échauffement, l'effet qu'il octroi sur la stabilité thermique, les caractéristiques physiques et ceux mécaniques du matériau.

### I.12.1 Sur l'instabilité thermique

L'objectif de l'inclusion des fibres de polypropylène est de résister aux fissures du matériau à son stade initial. Leur rôle est de consolider le composite avant qu'il affermisse et éviter ainsi le retrait précoce. Leur champ d'utilisation s'est amplifié à la prévention du risque d'explosion des BHP à un échauffement supérieur.

Suite aux travaux établis par Noumowé [82-83], Zeiml et al. [44] ainsi que d'autres auteurs, il en déduit que l'apport des fibres de polypropylène pour le matériau minimise la déflagration.

Kalifa et al. [84] montre à partir de l' (ATD) des fibres de polypropylène des monts sur les graphes d'ATD des fibres comme illustré sur la Figure 1.23.

À 171°C c'est le point de fusion des fibres de polypropylène ; la vaporisation se fait à 341°C et à 457°C c'est la carbonatation.

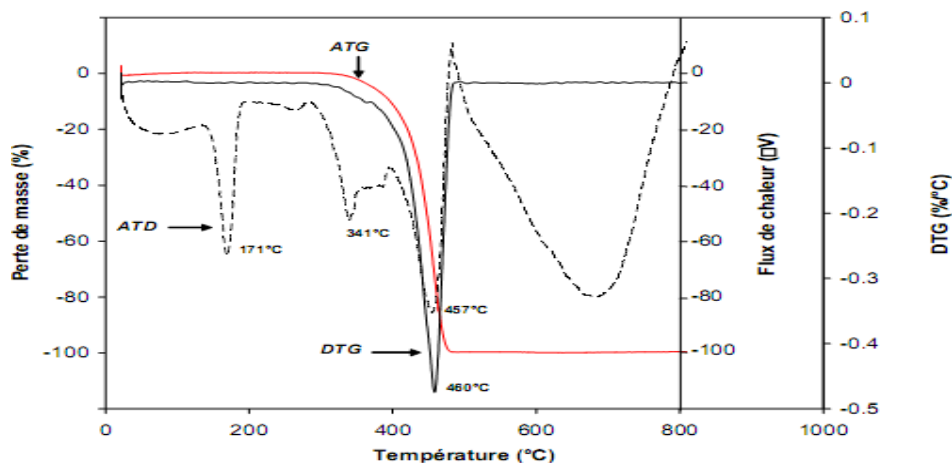


Figure I.23 Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène [84]

A partir des recherches faites par [84] il constate qu'aux abords de 171°C, les fibres fondues sont dissoutes complètement ou proportionnellement par le canal perméable de la pâte de ciment ensuite la substance se dissipe. Par conséquent, une poche est procréée au premier endroit de la substance fournissant à la vapeur d'eau un espace supplémentaire pour pouvoir



circuler. D' autre part, une densité de fissures importante se distingue avec l'ajout des fibres dans le matériau comparativement à l'aggloméré classique.

Deux suppositions sont émises Kalifa et al. [85] pour traduire cette dégradation additionnelle des matériaux :

L'une provient de l'allongement d'environ 10% des fibrilles qui engendre des pressions locales. L'autre est attachée à la conception locale de dégradations et le début de fissuration de la surface du matériau.

D'après la Figure I.24 on remarque que la pression optimale aboutie par un béton de haute performance non fibré est équivalente à 4 MPa. Cette pression décroît est atteint 1 MPa pour le même béton avec un taux de 3 kg/m<sup>3</sup> de fibres de polypropylène. Le béton qui comporte une quantité dépassant légèrement 1 kg/m<sup>3</sup> de fibres a un mont de pression de 2 MPa, l'auteur [86] déduit que cette valeur de 2 MPa est voisine de celle aboutie par un matériau classique.

Une diminution d'environ 70% de la charge optimale acquise pour les matériaux non fibrés avec un volume de fibres de 1.75 kg/m<sup>3</sup>.

A noter qu'il n'ya aucun progrès marquant lorsque le taux est supérieur à 1.75 kg/m<sup>3</sup>.

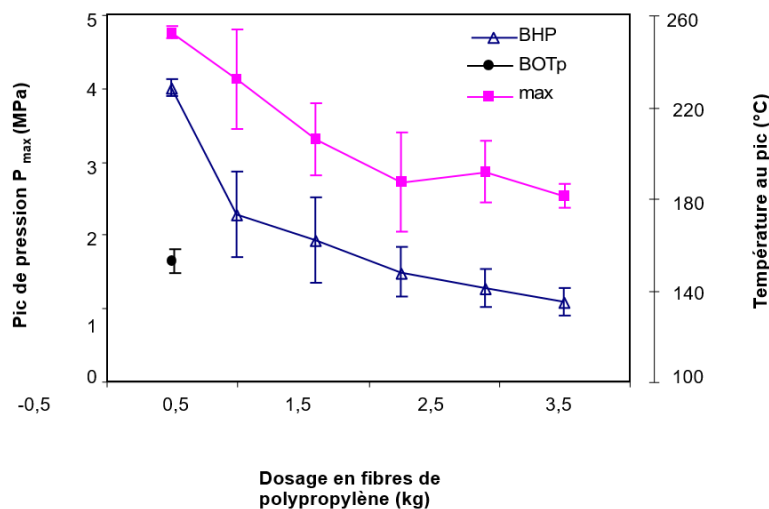


Figure I.24 Evolution de la pression maximale de vapeur et du pic de température en fonction du dosage en fibres de polypropylène [86].

### I.12.2 Sur la perte de masse du béton

Le matériau use de sa masse, suite à l'évacuation de l'eau, soit sous aspect libre ou lié quand la température monte. Les travaux de recherches menés par [49] montre à travers la Figure I.25 le changement de la réduction de masse de diverses formulations du composite qui

s'avère la même pour tous types de béton pendant l'échauffement.

D'après les auteurs, la courbe de variation relative à la réduction de masse d'un matériau se récapitule en trois étapes :

- de la température ambiante à 120°C voire 150°C: une légère transformation de masse se considère. Ce premier stade est traduit par l'évacuation de l'eau incontrôlable par les capillaires [57]
- de 120°C à 300°C : Dans cette plage de température l'accroissement de la diminution de masse est plus vélocité. Ce stade est défini par l'échappement de l'eau liée dans les hydrates et spécialement du gel de C-S-H. Les recherches des auteurs comme [57] , [49], enregistrent que la fin du déplacement de l'eau volatilisable se trouve dans cette période ou le pourcentage d'évaporation est plafonné.
- En dépassant les 300°C : la vélocité de diminution de masse décroît. [57], [49]. [65], attribuent cette diminution de masse à la déshydroxylation de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium

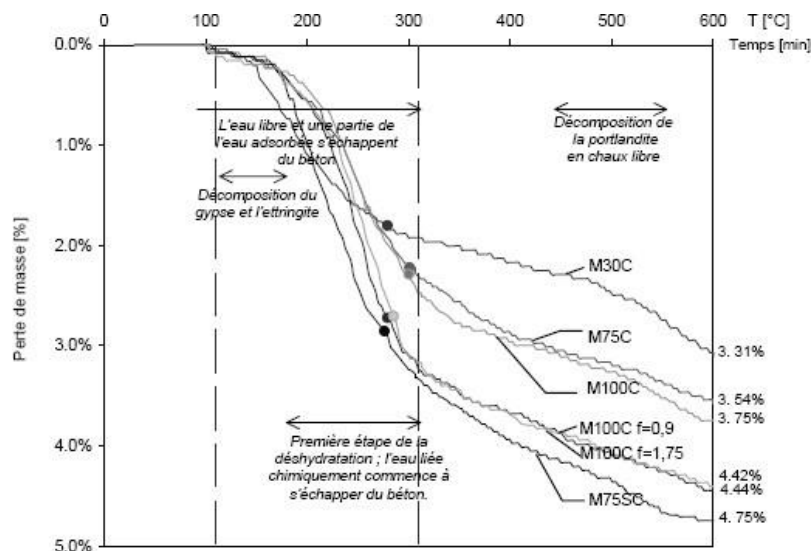


Figure I.25 Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de  $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$ , [49].

L'incorporation des fibres de polypropylène au sein du matériau soumis à de hautes températures ne change pas l'évolution de la perte de masse, les tests établis à un échauffement de 600°C par [49] sur trois types de bétons non fibrés et ceux avec des dosages variés en fibres de polypropylène, montrent que la perte de masse du béton non fibrés était de presque 4%.

Avec les diverses proportions en fibres de polypropylène, les pertes au niveau des masse de ces composites étaient plus grandes. Ce qui nous laisse déduire qu'un accroissement de réduction de masse des bétons fibrés avait donc été constatée par l'auteur et d'autres comme [95] et les trois stades relatifs à l'évolution de cette réduction de masse sont examinés.

A partir des recherches expérimentales menées par [95], il conclut qu'aucun changement au niveau de la perte de masse ne se produit avec l'incorporation des fibres d'acier au sein du matériau, même chose pour les composites non fibrés et ceux fibrés. La réduction en masse est plus notable pour le matériau sans fibres ou celui avec fibres de polypropylène comparativement avec un composite doté en fibres d'aciers.

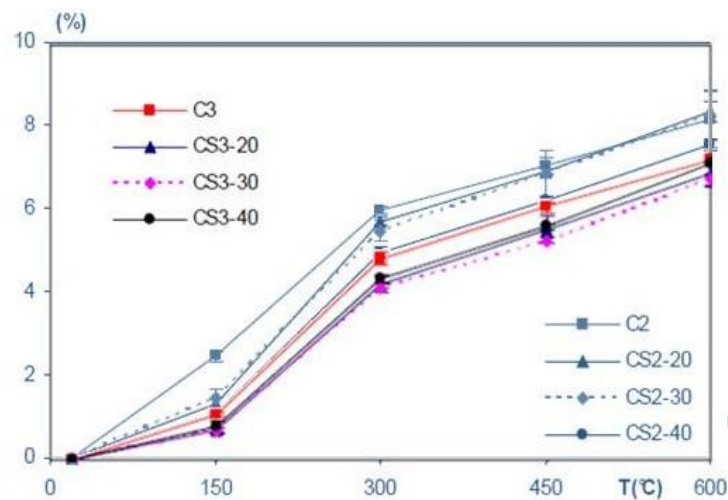


Figure I.26 Évolution de la perte de masse des bétons C3 (BHP ou  $E/C=0,3$ ), C2 (béton ordinaire  $E/C= 0,45$ ) et CS3 des bétons de fibres métalliques et CS2 des bétons de fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [95]

D'après les travaux effectués par [113] et selon Figure I.26, il a été constaté que les réductions en masse relatifs aux composites dosés par des mixtions de deux types de fibres à savoir (fibres de polypropylène et fibres d'acier) sont moindres par rapport à celles des composites non fibrés sauf qu'ils demeurent en dessous à celles des composites de fibres d'acier.

Ces résultats sont en bonne adhérence avec ceux trouvés par [95].

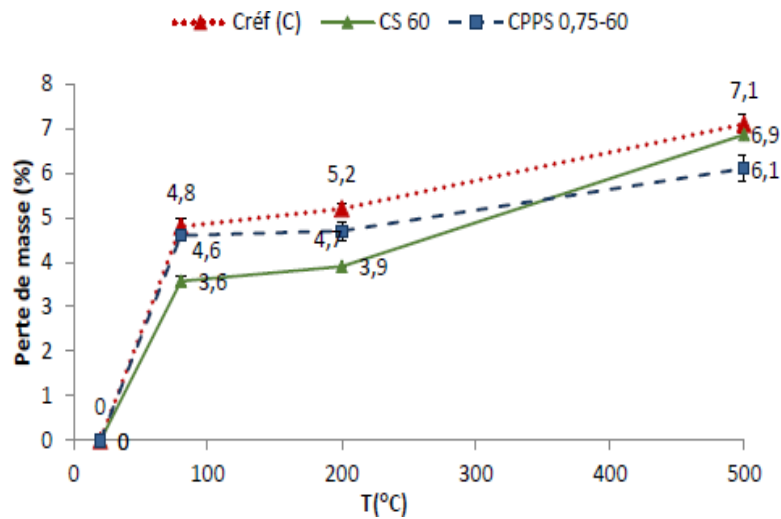


Figure I.27 Perte de masse de béton (C) et avec mélange de 0,75 Kg de fibres de polypropylène et 60 Kg de fibres métalliques (CPPS0, 75-60) et béton avec fibres métallique 60kg (CS60) en fonction de la température [113]

### I.12.3 Sur la porosité du béton

Plusieurs études sur la porosité ont été effectuées pour comprendre le rôle des fibres de polypropylène dans le béton porté à une température élevée, l'analyse de la détérioration du matériau et l'évolution de sa composition microscopique sont conjointement liée à la perception de la porosité. La littérature a ramenée deux procédés : la porosité à l'eau et celle au mercure.

#### I.12.3.1 Porosité à l'eau

A l'instant de l'échauffement de matrice cimentaire, la dessiccation demeure l'un des grands événements, elle admet la modification des hydrates en anhydres. La proportion volumétrique des anhydres qui résulte est moindre que celle des hydrates. Ceci mène à un accroissement de la porosité du précepte. Selon les travaux menés par [7], la porosité absolue amplifie et la dimension des orifices se transforme. La structure microscopique des matériaux est déterminée par la porosité à l'eau. Celle-ci peut s'expliquer comme les intervalles libres d'une substance qui s'exposent parmi les phases consistants. Lorsque le matériau est sous un traitement thermique, les mutations physico-chimiques pendant les périodes solides, procréent des conversions dans la porosité absolue et identiquement dans la distribution des dimensions des pores.

D'après les travaux de recherches menés par Mindeguia [48] sur la transformation de la

perméabilité à l'eau relative à deux combinaisons de bétons B40 et B60 en immobilisant le taux de proportion en fibres de polypropylène à  $2 \text{ kg/m}^3$  voir la Figure I.28

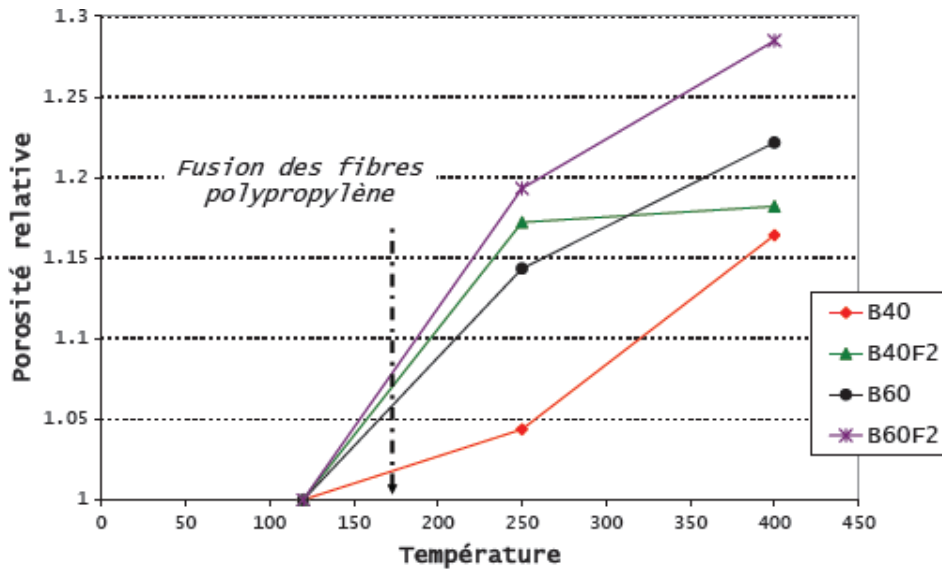


Figure I.28 Evolution de la porosité relative à l'eau en fonction de la température des bétons sans et avec  $2 \text{ kg/m}^3$  de fibres de polypropylène [48]

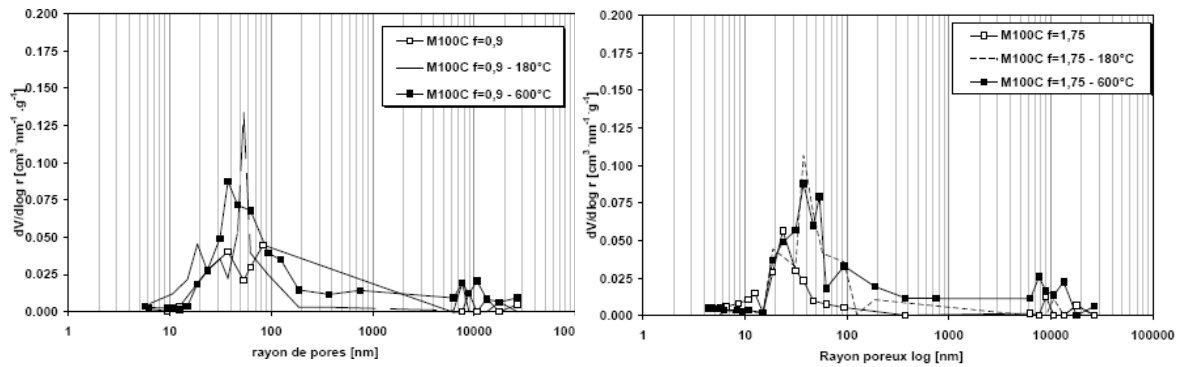
L'auteur a constaté un résultat bénéfique des fibres de polypropylène sur le matériau B40. Cela s'est traduit par une hausse de 12.2% de la porosité entre les températures  $120^\circ\text{C}$  et  $250^\circ\text{C}$ .

La mutation de la porosité avec le matériau B60 est presque de 5%, elle s'avère moins importante. La faible connexion du réseau procréé par la fonte des fibres pour les matériaux B60 est la cause de la dissemblance de la conduite entre les deux matériaux.

Selon la littérature, le matériau non fibré dont le rapport E/C est minimisé se démolit plus que celui à haut rapport. Mindégua [48] confirme les aboutissements de porosité.

### I.12.3.2 Porosité au mercure

D'après les travaux de recherches menés par Hager [49] sur les aboutissements relatifs à l'évaluation sur de la porosité au mercure de matériau fibré il a été constaté qu'à partir de la température de  $180^\circ\text{C}$  une porosité additionnelle se manifeste. Cette porosité s'aperçoit au niveau des pores microscopiques.



*Figure I.29 Distribution de tailles des pores sur des bétons non chauffés et chauffés à 180°C et 600°C contenant 0.9 kg/m<sup>3</sup> ou 1.75 kg/m<sup>3</sup> de fibres de polypropylène [49]*

Selon les investigations de [48] et à travers Figure I.29 l'auteur observe la répartition des dimensions des pores relatifs aux bétons auxquels on a ajouté les fibres de polypropylène non chauffées et chauffées. C'est la même allure que montre cette courbe.

Une première allure est distincte par une grande foule d'orifices de dimensions moyennes et perceptibles et coïncide avec celle des pores capillaires.

Un second sommet, moins considérable, se situe au environ de dix mille nanomètre correspond aux épaisses fissures se trouvant dans la substance. Après être soumis à une température de 180°C, le polypropylène en fonte demeure dans l'emplacement consacré aux fibres durant la durée de refroidissement. Il est irréalisable de voir un distinctif accroissement de la porosité à cause de la dimension très minimale des fibres utilisées qui est de l'ordre de 50 x 150 µm.

Au-delà de la température de 600°C, le sommet modal est perceptible pour un rayonnement de dimension de 40nm.

#### I.12.4 Sur les caractéristiques mécaniques

Une réduction des performances mécaniques du béton a été constatée avec l'inclusion des fibres de polypropylène qui engendrent une perméabilité additionnelle. Cette partie s'articule sur une combinaison de recherches sur les effets de l'incorporation des fibres de polypropylène sur les caractéristiques mécaniques des bétons chauffés et non chauffés.

##### I.12.4.1 Résistance en compression

A partir des études menées par les différents auteurs tels que [88], [89] ils constatent une légère variation des résistances en compression pour des pourcentages en dessous de 3

kg/m<sup>3</sup> de fibres à la température ambiante. A l'inverse Hager [49] déduit à partir des résultats obtenus que malgré l'accroissement d'un taux de dix pour cent de la matrice cimentaire dans la combinaison des bétons fibrés il ya une diminution de résistance de 17 et 25 % pour des bétons renfermant 1.75 kg/m<sup>3</sup> et 0.9 kg/m<sup>3</sup> de fibres de polypropylène.

La Figure I.30 englobe les résultats obtenus par les différents auteurs concernant le changement de la résistance en compression par rapport à l'échauffement des bétons renfermant les fibres de polypropylène.

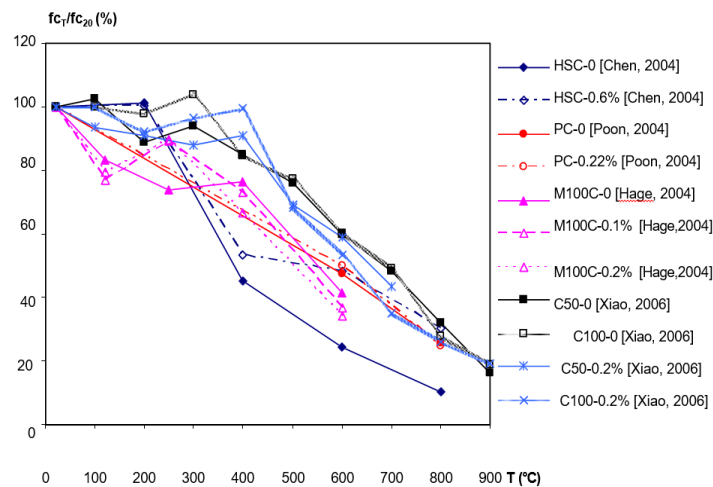


Figure I.30 Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique

Selon les résultats relatifs aux essais effectués par Hager [49] l'auteur déduit que l'ajout des fibres de polypropylène ne détériore pas les résistances relatives en compression des bétons à hautes performances à température élevées. A 250°C, les aboutissements acquis sur les bétons fibrés sont distingués par rapport à ceux non fibrés. Ce qui explique l'effet des fibres qui accorde un gain de résistance en facilitant l'évaporation de l'eau.

Au-delà de 400°C et suite aux travaux menés par Chen et Liu [90], ces derniers enregistrent une élévation de la résistance en compression des bétons avec 0.6% de fibres de polypropylène. Chauffés à 800°C, l'augmentation de la résistance relative des bétons fibrés est aux alentours de 20% comparativement aux bétons sans fibres.

Suite aux travaux de recherches exécutés par des auteurs à savoir Xiao et Falkner [87] et Behnood et Ghandehari [91] ils ont enregistré pendant la montée en température un bénéfice de résistance à froid en compression des bétons de fibres de polypropylène. Xiao et Falkner

[87] accordent ce bénéfice de résistance à la fonte du polypropylène qui procède de récentes conduites agréant la diminution des pressions induites.

Des travaux sont établis par Poon et al. [92] concernant l'effet des fibres de polypropylène pour des diverses formulations de bétons à base de ciment avec ou sans l'ajout d'additions minérales à savoir le méta kaolin ou la fumée de silice et des taux de fibres de polypropylène variant entre 0.11% et 0.22%. Les échantillons décollés de ces distinctes combinaisons de béton sont maintenues dans l'eau pendant 28 jours, puis dans une cuve à la température proche de 20°C et une humidité de 75%. Les spécimens sont ensuite soumis à un traitement thermique jusqu'à atteindre les températures désirées en l'occurrence 600°C et 800°C selon une vitesse de chauffage de 2.5°Cmn<sup>-1</sup>.

Un petit gain de résistance résiduelle est constaté au niveau des combinaisons de bétons renfermant le ciment avec ou sans méta kaolin.

Il ya lieu de signaler que la résistance à froid de ces bétons avec ou sans les fibres est presque la même à 800°C. Après les températures de 600°C et 800°C avec de la fumée de silice, il a été enregistré une diminution de résistance à froid de 4% et 7% des bétons fibrés.

Selon les résultats de Chan et al. [93] pour des bétons renfermant de la fumée de silice et un taux de 0.2% de fibres de polypropylène il ya une réduction de résistance à froid de 6.1% au-delà de 800°C.

Pour des bétons avec des fibres de polypropylène Noumowé [83] examine après un chauffage à 200°C, une réduction de résistance à froid d'un taux de 9% avec le même volume en fibres.

D'après [87], les modalités d'entretien, l'âge des échantillons ainsi que la vitesse de chauffage sont des éléments qui peuvent agir sur les résultats de la résistance en compression des bétons fibrés.

Finalement d'après plusieurs études établies par les différents auteurs il a été constaté que les propriétés mécaniques à température supérieures des bétons renfermant des fibres sont similaires à ceux dépourvus de fibres. Les divers cycles de changement de la résistance des bétons ordinaires se perçoivent pour les bétons fibrés.

#### I.12.4.2 Résistance en traction

A partir des travaux réalisés par les différents auteurs tels que Chen et al, 2004 [90], Pilya [95], et Haniche [78], ils déduisent que l'inclusion des fibres de polypropylène améliore la



résistance résiduelle en traction des bétons fibrés une hausse de la résistance à la traction d'un béton à haute performance après 400°C a été considéré. Les auteurs comme [Noumowé, [83], [Suhaendi et al, [89], et [Behnood et al, [91],] ont déclaré que la présence des fibres de polypropylène n'apporte quasiment aucun effet sur la résistance en traction des bétons BHP.

La Figure I.31, illustre des résultats de résistance à la traction pour différentes teneurs en fibres de polypropylène.

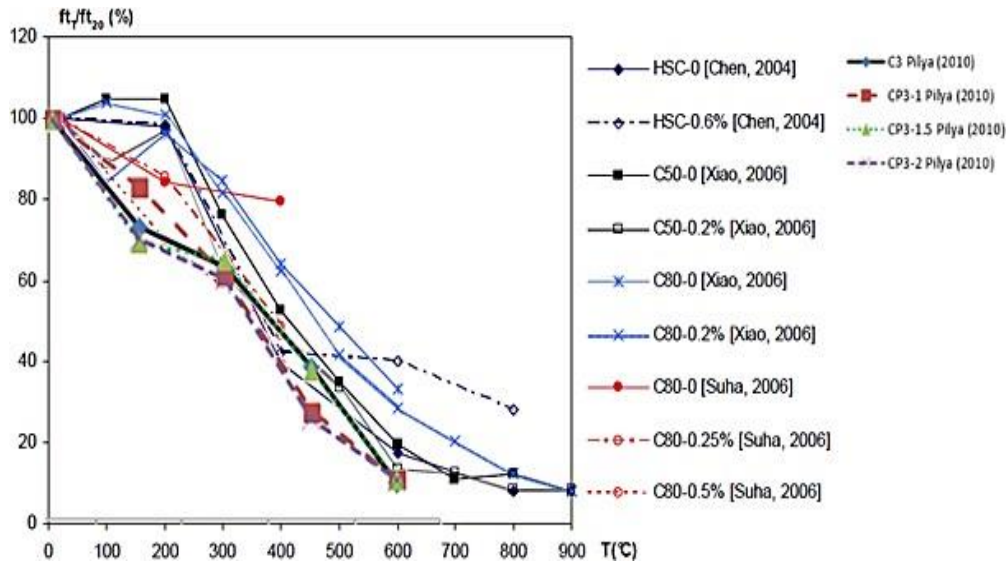


Figure I.31 Évolution de la résistance résiduelle en traction des bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température

A partir des travaux de recherches menés par [95], [89], [90] et selon la Figure I.31 on enregistre que la résistance à la traction du béton renfermant des fibres métalliques diminue graduellement avec l'accroissement de la température. Contrairement à celle avec des fibres de polypropylènes ou sans fibres. L'ajout de fibres métalliques, a un double effet, il améliore la capacité résistante à la traction du béton, et limite l'ouverture des fissures [95] et [90]

Les recherches établies par [95] ont dévoilé que les résistances des bétons non fibrés avec des rapports différents à savoir  $E/C = 0,3$  et  $E/C = 0,45$  sont diminués simultanément de 52% et 53% et ce entre les valeurs de chauffage de 300°C et 600°C, alors que les résistances en traction du béton PHB avec les fibres métalliques sont distinguées.

D'après les études expérimentales menées par l'auteur ce dernier conclut que les fibres métalliques offrent une résistance en traction importante lorsque la matrice cimentaire est plus épaisse.

Selon les travaux de recherches établis par [73] et [90] il a été Constaté qu'avec la

température de 400°C, un apport d'un taux de 1% de fibres métalliques progresse la résistance à froid, ils expriment que ce perfectionnement accroît de 30% à 800°C contrairement à [73] qui d'après ces conclusions elle s'éteint à la même température

D'autres part et d'après [90] l'inclusion de fibres métalliques ou celle de carbone, fait augmenter la résistance à la traction et limite la taille des fissures pour un béton exposé à température distinguée.

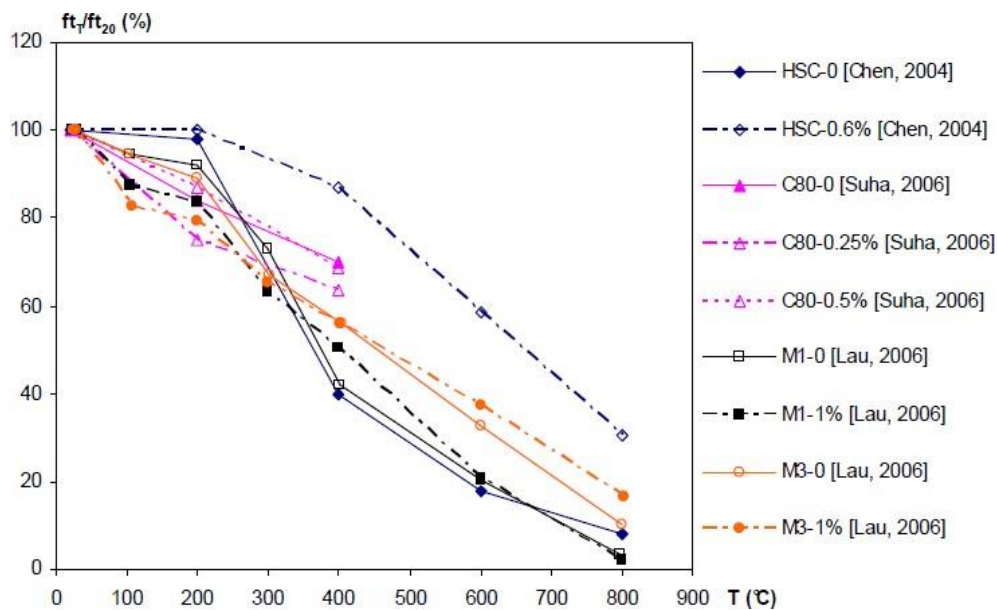


Figure I.32 Évolution de la résistance relative en traction du béton pour différentes teneurs en fibres métalliques

#### I.12.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité diminue à cause de plusieurs paramètres en l'occurrence les métamorphoses des états physiques et chimiques de la pâte de ciment, la transformation des granulats ainsi que la fissuration de la bande qui se situe entre la pâte et les granulats du béton soumis à de hautes températures.

D'après les travaux de recherches de [53], l'auteur a accompli des tests de module d'élasticité porté à haute température sur trois bétons suivant des rapports E/C égaux à 0,3, 0,4 et 0,5 soumis à des températures de 120°C, 250°C, 400°C et 600°C et une vitesse de 1°C/min, ce dernier a conclu que le module d'élasticité n'est pas affecté par le rapport Eau /Ciment. Ce résultat a été confirmé par d'autres auteurs tels que [95], [49], qui ont fini par remarquer que le

module d'élasticité baisse d'une manière régulière avec la température sans prendre en considération le rapport eau/ciment.

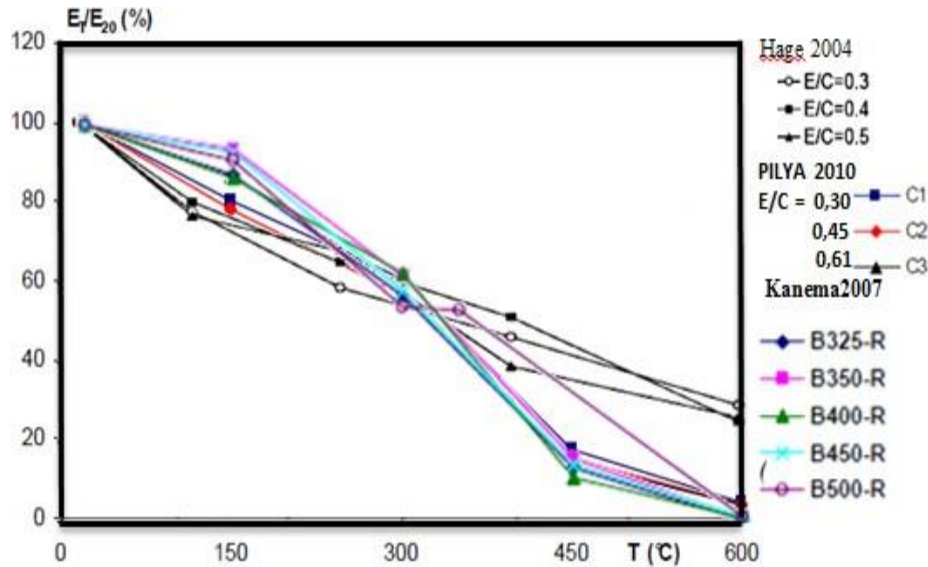


Figure I.33 Évolution avec la température du module d'élasticité relatif d'un béton sans fibres en fonction de E/C [49], [57], et [95]

La Figure I.33 illustre une mutation de module élastique des matériaux habituels (NSC) et des matériaux à grandes performances (HPC1 et HPC2), des matériaux qui renferment des fibres d'acier (SFR) et des matériaux fibré avec du polypropylène (PFR) soumis à l'échauffement. Le pourcentage de fibres d'aciers est de  $40\text{kg/m}^3$  et celui des fibres de polypropylène est de  $5\text{kg/m}^3$ . La teneur en eau des échantillons change de 3% à 4%.

Les aboutissements des tests à haut échauffement et une promptitude de  $5^\circ$  par minute ont recommandé que les matériaux à haut comportement sont nettement touchés par l'écaillage que les matériaux classiques. Les auteurs ont constaté que les fibres de polypropylène présentent un effet négatif sur la modification des performances mécaniques du matériau, spécialement le module élastique.

La réduction élémentaire des modules élastiques est considérée jusqu'à  $300^\circ$ . Sauf les bétons de fibres de polypropylène qui ne sont pas affectés par le phénomène d'écaillage.

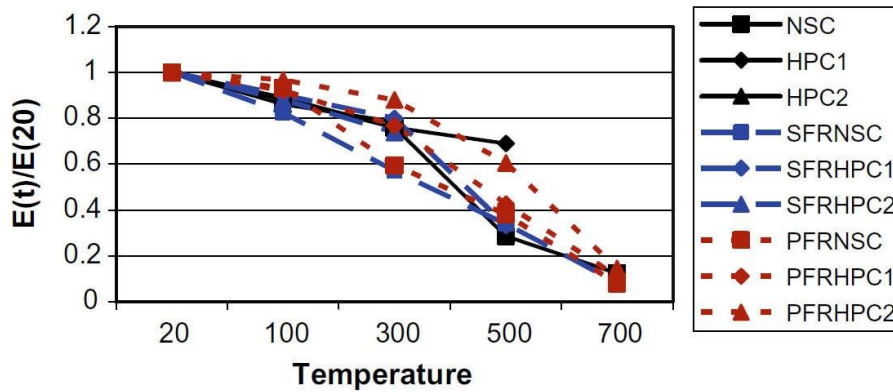


Figure I.34 Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température, (Sideriset al. 2009)

Après la température de 300°C, en l'occurrence l'auteur [94] a résolu que les exploits mécaniques à froid des matériaux sont attachés à l'origine du composé granulaire. Entre 300 et 600°C, les matériaux de composé granulaire à base de silex dévoilent plus de lésions et par cela procréent une grande réduction de durabilité mécanique. Concernant le matériau de composé granulaire à base de calcaire, la décarbonatation de la calcite issue entre 600 et 700°C entraîne des réductions de performances mécaniques et ce à partir de 600°C.

Les études établies par [95] montrent un lien entre les mutations physiques, chimiques et même au niveau de la grandeur du matériau au moment de l'échauffement ainsi que la réduction de ses exploits mécaniques.

De la température ambiante à la température de 150°C voire 200°C, la matrice cimentaire endure initialement une augmentation de volume suivie d'une contraction importante due essentiellement à l'évacuation de l'eau libre et celle chimiquement fixée. Les composés granulaires endurent au cours de l'échauffement une sérieuse augmentation du volume non relative au chauffage. Un grand gonflement des composés granulaires se produit vers 550°C.

Cette expansion est causée par les changements chimiques de la pâte. L'incohérence de transformations entre la matrice et les composés granulaires procréée des dégâts complémentaires du matériau se traduisant par un signe de dégradation dans la pâte transgranulaire et la limite matrice /granulats, aussi bien une réduction des capacités mécaniques du matériau. A partir de 300°C on enregistre une diminution progressive de la résistance à la compression accompagnée d'un effondrement du matériau.

### I.12.6 Synthèse sur l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée

L'inclusion des fibres de polypropylène au sein du béton procure à ce dernier son équilibre thermique. La fonte et l'évaporation de ces fibres, crée un collecteur qui aide l'acheminement du flux.

L'analyse des bétons renfermant des fibres, montre en présence du polypropylène, une diminution du pic de la pression de vapeur avec l'ascension en température. Cette réduction est unie au volume de fibres.

L'étude des caractéristiques mécaniques des bétons fibrés soumis au chauffage nous ramène à de divers avis. Avec des fibres de polypropylène et en variant la température certains chercheurs enregistrent une bonification au niveau des comportements mécaniques ils octroient ce bénéfice de résistance à l'évacuation de l'eau de la substance et à la diminution des pressions induites.

Par contre certains d'autres ont des avis divergents, ils remarquent que les fibres de polypropylène n'ont pas une influence positive sur les comportements mécaniques. Les conditions expérimentales peuvent certainement expliquer ces avis distincts notamment la vitesse de chauffage.

***CHAPITRE II***

***MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE***

---

## II.1 Introduction

Dans cette étude deux types de bétons ont été confectionnés un béton ordinaire et un béton avec des fibres de polypropylènes et ce pour étudier les propriétés mécaniques et physiques et de constater par la suite l'impact des fibres de polypropylènes sur le conduite du béton exposé à des hautes températures. Des spécimens ont été réalisés et maintenues, puis exposés à différentes températures. A une température ambiante et à des températures : 200°C, 450°C et 600°C il a été procédé à définir les comportements physiques et mécaniques du béton fibré. Aussi des tests destructifs et non destructifs sont déterminés dans le procédé expérimental.

L'objectif de cette partie est d'exhiber les propriétés des divers éléments exploités, les formulations des bétons, leur fabrication et les différents essais pratiqués.

## II.2 Programme expérimental

Le but de cette méthode expérimentale est d'examiner les propriétés des bétons fibrés et non fibrés sous l'effet de hautes températures.

Des essais ont été réalisés sur des échantillons cubiques 10x10x10 cm, pour discerner les comportements mécaniques à savoir : résistance en compression, résistance en traction à la température ambiante et soumis à des températures de 200°C, 450°C et 600°C.

Des tests ont été réalisés sur des échantillons cubiques 10x10x10 cm et prismatiques 10x10x40 cm, pour déterminer les caractéristiques physiques à savoir :

- La perte de masse
- La porosité à l'eau.
- L'absorption à l'eau.

Des tests ont été effectués sur des spécimens cubiques 10x10x10 cm afin de mesurer les valeurs de la vitesse de diffusion des vibrations ultrasonores.

## II.3 Caractéristiques des matériaux

Dans notre travail, on a confectionné les deux types de bétons selon une composition granulaire provenant d'un mélange de gravier, de sable, de ciment et d'un superplastifiant, ainsi des fibres de polypropylènes avec différents pourcentages (0,5 ,1 et 1,5)%

### II.3.1. Ciment

Le genre de ciment adopté est celui de Djebel Rsass (Tunisie) commun pour les bétons

classiques et ceux fibrés.

Les caractéristiques physiques et mécaniques de ce type de ciment sont conformes à la norme européenne EN 197-1 [96] et à la norme Algérienne NA 442[97].

Comme illustrés dans le tableau ci-dessous :

*Tableau II.1 caractéristiques physiques et mécaniques du ciment*

<b>Consistance Normale (%)</b>	<b>26.5±2.0</b>
<b>Finesse suivant la méthode de Blain (cm<sup>2</sup>/g)(NA 231)</b>	<b>3700 -5200</b>
<b>Retrait à 28 jours (µm/m)</b>	<b>&lt; 1000</b>
<b>Expansion (MPA)</b>	<b>≤ 3.0</b>
<b>Résistance à la compression 2 jours (MPA)</b>	<b>≥ 10.0</b>
<b>Résistance à la compression 28 jours (MPA)</b>	<b>≥ 42.5</b>
<b>Début de prise à 20°C(min)</b>	<b>150 ± 30</b>
<b>Fin de prise à 20 °C (min)</b>	<b>230±50</b>

### II.3.2. Granulats

Les bétons objet de notre étude ont été élaborés avec des granulats (sable et graviers).

L'identification des granulats destinés à la fabrication du béton :

- Sable de Carrière de Sotramat (Boulhafdir ) Tébessa.
- Gravier : 3/8– 8/15 de Carrière de Sotramat (Boulhafdir ) Tébessa.
- *Analyse granulométrique :*

L'essai de l'analyse granulométrique est effectué selon les normes [98], Il permet de déterminer les proportions massiques des passants cumulés, à travers les tamis de différents diamètres de maille, d'un échantillon de sable ou de gravillon. Les pourcentages de passant cumulés sont représentés sous la forme de courbes granulométriques dans les figures ci-dessous :



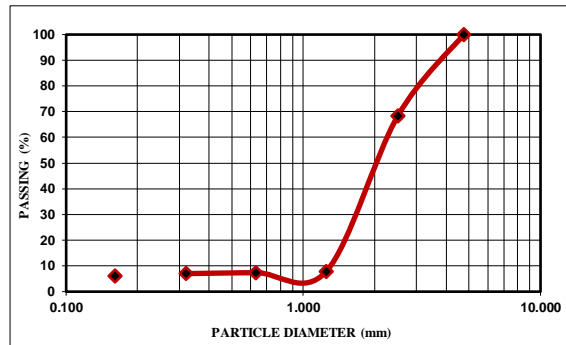


Figure II.1 Courbe granulométrique du sable

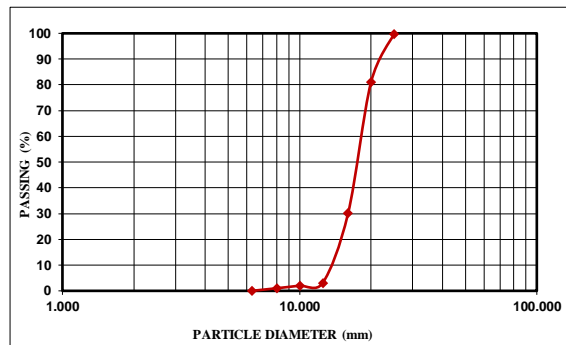


Figure II.2 Courbe granulométrique du gravier

### II.3.3. Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est du type VISCOCRETE TEMPO 12 haut réducteur d'eau, commercialisé par la société algérienne Sika El- Djazair, et conforme à la norme [99], le mode d'emploi conseillé est : 0,2 à 3 % du poids du liant suivant la fluidité .Les caractéristiques du superplastifiant sont étalées dans la représentation ci-après :

Tableau II.2 Caractéristiques de l'adjuvant

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité	1,06±0 .01
Teneur en chlore (%)	< 0.1
PH	6±1

### II.3.4. Eau

L'eau de gâchage employée dans notre étude est une eau potable provenant du robinet du laboratoire. Les conditions imposées à cette eau de gâchage sont soumises à la norme [100], elle doit être propre et sans matières organiques.

### II.3.5. Fibres de polypropylènes

Les fibres adoptées sont des fibres de polypropylène commercialisées par la société algérienne *GRANITEX*. Elles sont employées dans les bétons pour améliorer la résistance au feu des structures, elles sont de forme cylindrique et sont livrées sous forme d'amas.



*Figure II.3 Fibres de polypropylène*

Les spécificités importantes de ces fibres sont éclaircies dans le tableau ci-dessous :

*Tableau II.3 Caractéristiques de Fibres de polypropylène.*

Diamètre nominale ( $\mu\text{m}$ )	18
Longueur (mm)	12
Densité	0.91
Résistance à la traction (MPa)	300
Module d'élasticité (MPa)	3000
Point de fusion ( $^{\circ}\text{C}$ )	150

## II.4 Formulations

La formulation des bétons sans fibres est effectuée par le biais de la méthode de Dreux-Gorisse[101]. À propos de la formulation des bétons conçus, le rapport en volume G/S est maintenu fixe pour obtenir un béton facile à mettre en œuvre.

Il a été procédé à utiliser des taux en fibres de polypropylène de 0.5 – 1 et 1.5 kilogrammes par mètre cube de béton soit un pourcentage en volume de 0.055 – 0.11 et 0.17 %.

Le test d'affaissement au cône d'abrams est celui le plus adopté pour évaluer la manœuvrabilité du béton. Ce test est accompli suivant les commandements de la règle NF EN 12350-2 [102], il accède de définir la dureté d'un béton frais en évaluant l'affaissement qui se résume en la dissemblance entre la hauteur du moule conique utilisé et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé.

Le cône employé est de grandeurs (D= 20cm, d=10 cm et h=30 cm). Le cône doit être posé sur un plateau en métal horizontal antérieurement mouillé. Le chargement du cône se fait en trois épaisseurs de même élévation, chaque couche est piquée avec 25 coups par le biais d'une barre standardisée. Après être chargé, le moule doit être enlevé verticalement. L'affaissement h est mesuré après consolidation de l'affaissement par le biais d'une règle.

*Tableau II.4 Le détail de la composition des bétons*

Matériels	Poids en (kg/m <sup>3</sup> )			
Ciment	400	400	400	400
Fibres de polypropylènes	0.00	0.5	1	1,5
Eau	180	180	180	180
Superplastifiant%	1	2	2,1	2,2
Superplastifiant kg	4	8	8,40	8,80
Gros agrégats	1131	1131	1131	1131
Agrégats fins	654	654	654	654

## II.5 Fabrication et conservation des éprouvettes

### II.5.1 Fabrication et mise en œuvre

Le malaxage des bétons a été réalisé à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 30 litres selon les références normatives [103] et [104]. La durée totale du malaxage était de 5min.

La méthode de malaxage est décrite comme suit :

- 1 minute de malaxage à sec : introduction du gravier, sable, ciment et les fibres de polypropylène sont éparpillées manuellement pour permettre une bonne distribution dans le mélange.
- 2 minutes de malaxage : introduction de 75% de l'eau de gâchage.
- 2minutes de malaxage avec le reste d'eau 25 % dans lequel le superplastifiant est dissout.

La vibration a été réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable. La durée de vibration est 30 + 30 secondes. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et conservées en humidité saturante (une température avoisinant les 20 °C et un taux d'humidité qui était presque égal à 100 %) jusqu'au jour de l'essai .Les éprouvettes étaient âgées de 7; 28jours.

*Tableau II.5 Le détail du nombre d'éprouvettes*

Quantités des FP	200 C°	6 heures
0% PP		<b>03</b>
0,5% PP		<b>03</b>
1% PP		<b>03</b>
1,5% PP		<b>03</b>
Quantités des FP	450 C°	6 hrs
0% PP		<b>03</b>
0,5% PP		<b>03</b>
1% PP		<b>03</b>
1,5% PP		<b>03</b>
Quantités des FP	600 C°	6 hrs
0% PP		<b>03</b>

0,5% PP		<b>03</b>
1% PP		<b>03</b>
1,5% PP		<b>03</b>

## II.6 Dispositif expérimental

### II.6.1 Cycle de chauffage refroidissement

À la suite des études accomplies par les auteurs, la conduite des bétons soumis à des hautes températures se trouve dans l'écart de température allant de 20°C à 1200°C [49], Néanmoins, dans nos travaux l'écart de température désigné est nettement inférieure, il se situe entre 20°C et 600°C. Car selon les travaux réalisés [105] au-delà de 600°C le béton est habituellement altéré et ne peut aucunement résister.

Le stade d'échauffement se fait en trois étapes :

- L'étape initiale est caractérisée par une ascension en température à une vitesse de 1°C/min, plus modéré que le feu ISO mais engendrant cependant un gradient thermique important réciproquement à la vitesse de chauffage utilisée pour la détermination des bétons.
- La deuxième étape demeure une heure de temps est caractérisée par une phase de température invariante dans le four et a pour but d'avoir la même température au niveau des spécimens.
- La dernière étape, les spécimens subissent un refroidissement lent et ordinaire dans le four.

Finalement il ya lieu de procéder à faire sortir les spécimens du four au voisinage de 20°C. Cette étape de refroidissement des éprouvettes n'est pas dirigée. Elle se fait de manière simple par rapport à la température interne du four, ce dernier reste clos. On souhaite constamment que les dégradations à l'intérieur du béton proviennent uniquement de l'effet de la température.

Dans ce travail, on a choisi trois phases de traitement thermique cheminant de la température environnante jusqu'au chauffage de 200°C, 450°C, 600°C, en maintenant constante la vitesse d'échauffement à 1°C



Figure II.4 Dispositif de chauffage des éprouvettes

## II.7 Résistances de compression

Les tests de la résistance à la compression sont exécutés sur des échantillons cubique 10 x 10 x 10 cm pour les divers cycles de traitement thermique. Les extrémités des spécimens sont corrigées par surfaçage au souffre suivant la norme NF EN 12390-324 [Afno, 2003] ; et sont soumises à un taux de chargement de 0.5 MPa.s-1 jusqu'à la rupture (Figure II.5). La charge optimale aboutie est marquée et la contrainte de rupture en compression est acquise par l'équation qui s'en suit :

$$\sigma = F_{max} / A$$



Figure II.5 L'essai de l'écrasement

### II.7.1 Résistance en traction par flexion

Ce type de test est effectué sur des spécimens de forme prismatiques (10x10x40) cm<sup>3</sup> conformément à la norme française [NF P. 18-407] [107]. Il consiste à déterminer la résistance à la flexion d'une charge en utilisant quatre rouleaux centrés deux supérieurs et deux inférieurs

de distance entre eux égale à 30cm, en s'assurant que l'axe longitudinal des rouleaux soit perpendiculaire à l'axe du spécimen. (Voir Figure II.5). La moyenne des résultats de trois échantillons représente la résistance à la traction. La contrainte de traction par flexion est attribuée par la corrélation ci-après :



Figure II.6 Essai de traction par flexion

## II.8 Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores

Le but essentiel de cet essai est de collecter un grand nombre d'informations sur la qualité des bétons exposés à de hautes températures. Le test de l'ultrason employé pour estimer la qualité du matériau et discerner par la suite les ségrégations, les vides et les dégradations générés par le feu.

Cet essai est illustré par son appareillage sur la Figure II.7 suivant la norme française NF EN 12504-4[108].

Le PUNDIT représente l'équipement employé pour évaluer la vitesse de l'ultrason. Le nom de la méthode qui est *test de vitesse de propagation de vibrations sonores* est inspiré par la source de la méthode qui permet de mesurer le temps mis par une vibration, en fonction d'une distance déterminée. Pour un béton exposé au feu, la hausse de température génère une transformation physico-chimique de la matière, la méthode adéquate pour ce genre de travaux est bien l'auscultation dynamique, qui est axée sur deux paramètres le temps franchi et l'énergie communiquée. La vitesse des ondes,  $V$ , est attribuée par l'expression :

$$v = L / T$$

Où :

$L$  : représente l'espacement entre les capteurs en (m), la longueur d'acheminement de l'onde devrait être supérieure ou égale à 10 cm.

$T$  : est le temps de diffusion (s).

D'après Whitehurst, 1966, la qualité du béton est appréciée par la vitesse de propagation des impulsions :

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$  le béton présente une résistance inacceptable.
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$  signifie que le béton a une résistance moyenne.
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$  signifie que le béton à une grande résistance.
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$  signifie que le béton à une très grande résistance.



*Figure II.7 Appareillage de l'essai de l'ultrason*

## II.9 Essais physiques

### II.9.1 Evolution de la porosité

Dans le but de déterminer le taux de vide rempli par l'eau on a eu recours au test de porosité à l'eau permettant d'évaluer la porosité des spécimens en béton. Le procédé utilisé pour ce genre de test est la pesée hydrostatique préconisée par l'AFPC-AFREM [109]. Les prototypes testés sont exécutés sur les spécimens provenant des tests de compression, et ce pour chaque palier de température, les modèles sont maintenus dans des sacs imperméables, ensuite ils sont conservés dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à atteindre une masse constante. Cette température a été choisie pour diminuer l'effet de la température sur les



hydrates des prototypes modèles. Quand les spécimens sont totalement secs, ces derniers sont immergés dans l'eau jusqu'à atteindre une saturation totale. Il a été procédé à mesurer les masses saturée au cours du temps jusqu'à la saturation complète. Le prototype a été pesé dans son état saturé immergé puis la même opération est effectuée après que l'échantillon soit séché avec un chiffon.

Les échantillons testés sont ceux non chauffés et ceux provenus des chauffages à, 200°C, 450°C, et 600°C,.

La porosité  $P$  exprimée est attribuée par l'équation suivante :

$$P = \frac{M_{sa} - M_{se}}{M_{sa} - M_{sai}} \times \rho_e \text{ avec}$$

$M_{sa}$  : la masse du prototype saturé séché

$M_{se}$  : la masse du prototype sec après étuvage

$M_{sai}$  : la masse du prototype saturé immergé

$\rho_e$  : La masse volumique de l'eau



Figure II.8 Pesée Hydrostatique

### II.9.2 L'absorption d'eau

Par le biais d'un moyen élémentaire, on a pu évaluer l'aptitude d'absorption d'eau, les échantillons de bétons sont totalement mouillés dans l'eau pendant 24h, puis sortis et pesés à des différents intervalles à savoir: 0mn, 2mn, 5 mn, 10mn, 20mn, 30mn, 1h, 19h jusqu'à 20h où les spécimens disposeront d'un poids constant.

**Coefficient d'Absorption :**

$$CA(\%) = ((M_a - M_s) / M_s) * 100$$

$M_a$  : masse saturée (g)

$M_s$  : masse sèche (g)

### II.9.3 Perte de masse

La réduction de masse des échantillons nous permet d'avoir une idée rationnelle sur le béton soumis à des températures élevées, elle suit la transformation du poids du béton suite aux différents traitements thermiques. Pour pouvoir évaluer la transformation de la réduction de masse vis-à-vis du cycle thermique, les spécimens sont pesés avant et après chaque cycle thermique [110]. Les échantillons provenant du chauffage sont aussitôt pesés pour échapper au phénomène de réhydratation avec le milieu environnant. L'essai permet de déterminer la perte de substance que subie les échantillons au moment du chauffage par rapport à leur état initial.

La formule de la perte de masse est indiquée par la manière suivante :

$$\text{perte de masse} = \frac{M_a - M_{ap}}{M_a} \times 100$$

$M_a$  : La masse de l'échantillon à une température ambiante avant le chauffage.

$M_{ap}$  : La masse de l'échantillon à la sortie du four, c'est à dire après refroidissement

Les échantillons utilisés sont de forme cubique de dimensions (10x10x10) cm<sup>3</sup>. Elles sont pesés par le biais d'un peson électronique ayant une exactitude de 0.1g ainsi illustré sur la Figure II .9



Figure II.9 Balance d'une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g



***CHAPITRE III***

***COMPORTEMENT DES BETONS SANS FIBRES***

---

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre l'étude sera fondée sur la conduite des bétons non fibrés sous l'effet des divers cycles de traitement thermique. Les tests des propriétés physiques et ceux mécaniques sont exécutés et serviront d'indication pour les bétons fibrés.

### III.2 Evolution de la propriété physique en fonction du chauffage.

#### III.2.1 Perte de masse

La perte de masse consiste généralement à évaluer l'eau libre et celle liée renfermée dans un échantillon de matériau avant et après échauffement. Cette eau se perçoit sous aspect liée dans les hydrates, adsorbée à la surface des éléments consistants et libres dans les cavités.

D'après des recherches précédemment établies l'eau libre a la propriété d'être perdue facilement lors de variations thermiques [111].

Notre expérience s'est accomplie sur neuf échantillons cubiques confectionnés et démoulés, ils subissent un pesage puis sont introduits dans l'eau où ils sont maintenus pendant vingt-huit jours, après cette période ils sont pesés une deuxième fois après avoir été nettoyés avec un chiffon sec. Les spécimens sont abandonnés à l'air libre pendant un certain temps, chaque trois d'entre eux sont mis à l'intérieur du four pour subir les cycles de traitement thermique à savoir 200°C, 450°C, 600°C.

La pesée de neuf échantillons avant et après chauffage montre que leur masse se réduit en fonction du cycle de traitement thermique.

*Tableau III.1 Pertes de masse moyenne des bétons sans fibres*

Echantillons	Degré de température	La Perte de masse (%)
Eprouvette 1	200°C	3.1
Eprouvette 2	450°C	8.1
Eprouvette 3	600°C	8.2

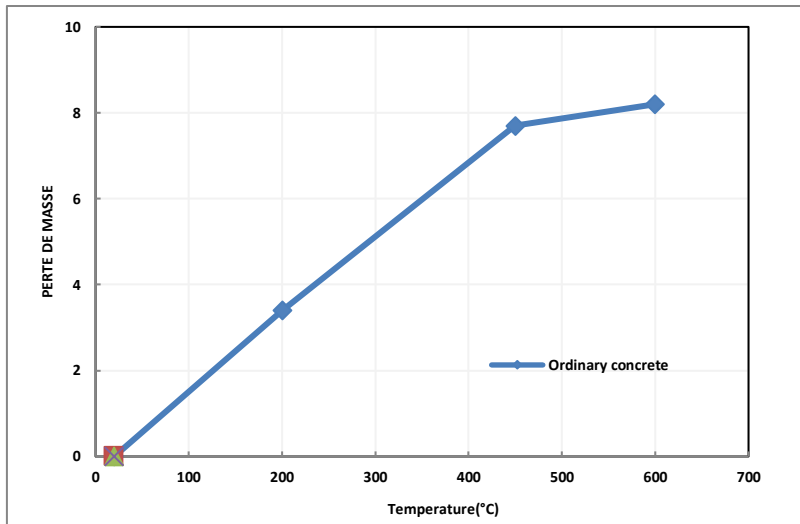


Figure III.1 Evolution de la perte de masse du béton sans fibres

A partir des résultats de calcul de la perte de masse et à travers l'allure du graphe ci-dessus on peut conclure ce qui suit :

Le premier stade va de la température environnante à la température de 200°C. Il est caractérisé par une très légère évolution de diminution de masse estimée à (3.1%). La différence de perte de masse est causée par la migration de la quantité d'eau libre et celle adsorbée présente et renfermée dans les poches du béton.

Le deuxième intervalle allant de la température 200°C à 450°C. Cet intervalle est caractérisé par une grande diminution de masse. A 450°C, le béton sa masse est réduite de 8.1%. Le même résultat a été observé par Noumowé [57] selon L'auteur c'est la migration de l'eau incluse dans les hydrates (C-S-H) et la décomposition du gypse( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) qui sont à l'origine de cette diminution.

La migration de l'eau chimiquement liée est la cause de l'importante masse de la substance égarée dans cette période d'échauffement.

La troisième étape, s'étend de la température 450°C à 600°C, elle est pointée par une légère évolution de perte de masse par rapport au deuxième palier. Cette phase est caractérisée par la déshydroxylation de la portlandite.

### III.2.2 L'absorption à l'eau

L'existence et la valeur des vides est estimé par l'aptitude d'absorption d'un béton, c'est une manière d'examiner la densité du mélange, plus le béton est plein moins il est disposé à l'absorption ce qui explique son état étanche

Cette aptitude d'absorption est évaluée par un simple moyen, les échantillons de bétons sont pesés après être mis à l'étuve (à 105°C), ensuite ils sont totalement mouillés dans l'eau pendant 24h, puis retirés et pesés à des différentes périodes à savoir: 0mn, 2mn, 5 mn, 10mn, 15mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h jusqu'à 19h.

Tableau III.2 Absorption d'eau du béton ordinaire

Temps(min)	Pourcentage absorbé
0	0
2	81.67
5	85.67
10	89.34
20	97.34
30	102.34
60	111.07
1140	118.67
1200	118.67

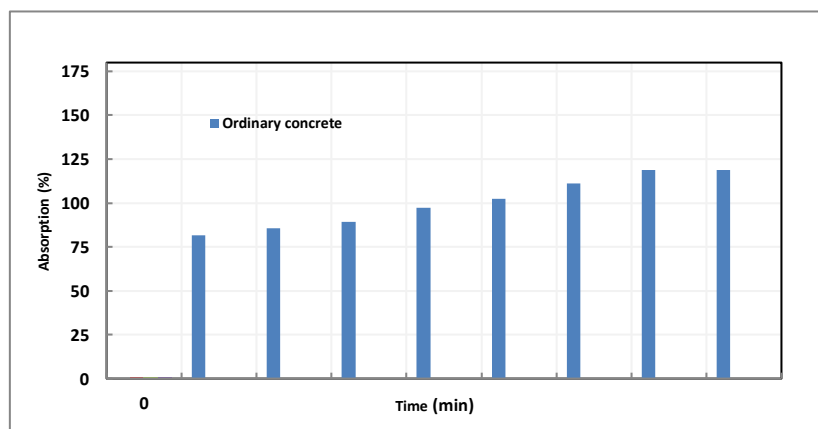


Figure III.2 Graphe de L'absorption d'eau du béton ordinaire

**Coefficient d'Absorption :**

$$CA(\%) = ((Ma - Ms) / Ms) * 100$$

Ma : masse saturée

Ms : masse sèche

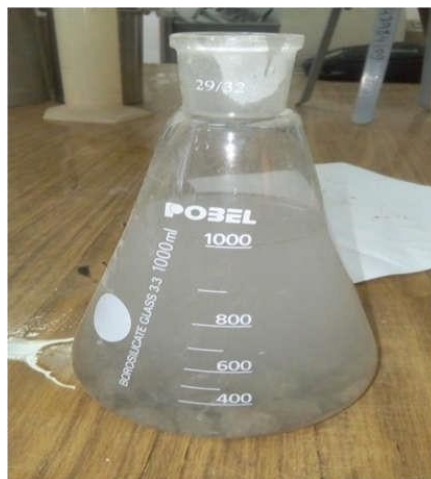
$$Ca = 5.7 \%$$

La Figure III.2 exprime le comportement du béton ordinaire vis à vis à l'absorption d'eau après l'émersion totale des éprouvettes pendant 24h. On remarque que l'augmentation de la masse du béton est proportionnelle au temps d'immersion jusqu'à la saturation totale qui est atteinte après 20h d'immersion.

**III.2.3 Evolution de la porosité**

Les valeurs de la porosité proportionnelles à tous les bétons sans fibres sont exposées dans le Tableau III.3. Ces dernières sont des moyennes de mesures réalisées sur douze éprouvettes. Le test prévu dans les essais de la porosité est effectué sur des éprouvettes cubiques 10x10cm écrasé précédemment dans l'essai de la perte de masse, nous avons calculé la masse volumique, la masse spécifique par le pycnomètre et nous avons déterminé la porosité avec la formule suivante :

$$\text{La porosité} = \frac{\text{La masse spécifique} - \text{La masse volumique}}{\text{La masse spécifique}} \times 100$$



*Figure III.3 Pycnomètre*

Tableau III.3 porosité moyenne de bétons sans fibres

Echantillons	Degré de température	La porosité (%)	La compacité (%)
Eprouvette 1	20°C	11	89
Eprouvette 2	200°C	14	86
Eprouvette 3	450°C	20	80
Eprouvette 4	600°C	21.4	78.6

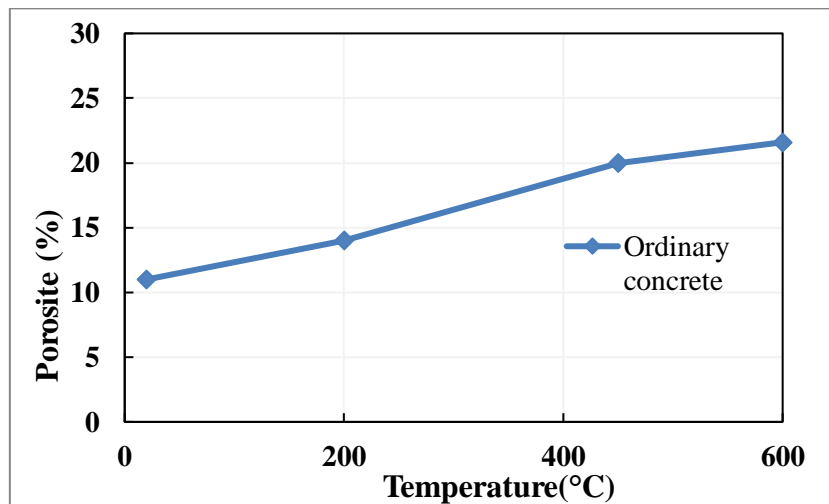


Figure III.4 Courbe de L'évolution de la porosité en fonction de la température

La porosité des bétons analysés accroît selon le cycle de chauffage. On constate d'après le Tableau III.3 qui se traduit par le graphe (Figure III.4) que la porosité accroît de 20% à la température de 450°C, puis elle s'améliore légèrement (21,8%) à la température 600°C. Ces aboutissements montrent que lors du chauffage, la structure microscopique du matériau est métamorphosée et ce dernier demeure plus perméable. Cette porosité ouverte aide le transfert de flux d'humidité, diminuant ainsi le front d'évaporation.



### III.3 Evolution des propriétés mécaniques en fonction du chauffage

Les comportements mécaniques analysés dans cette partie sont la résistance en compression et la résistance en traction des bétons sans fibres exposés aux différentes températures.

#### III.3.1 Résistance en compression

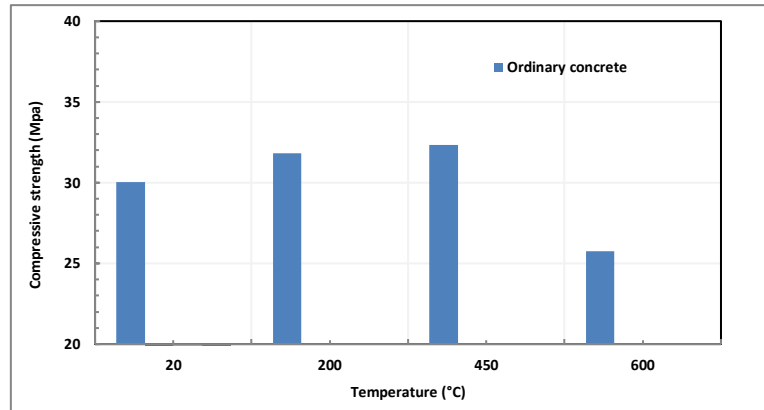


Figure III.5 Courbe de l'évolution de la résistance à la compression

A partir des résultats obtenus, on conclut que la résistance augmente et elle est maximale à la température de 450°C. Le gain de résistance de béton est dû à la perte de la quantité d'eau ce qui conduit à un durcissement du béton.

Ensuite cette résistance diminue progressivement car suite à l'accroissement de la température, l'eau se détend. Cette dilatation thermique de l'eau engendre un écart des feuilles du gel C-S-H produisant de courtes fissures à cause de la réduction des forces d'attraction entre ces feuilletés

#### III.3.4 Essai de traction par flexion

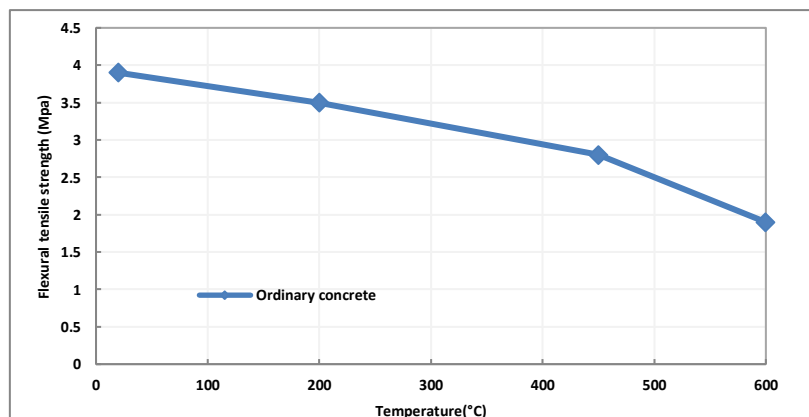


Figure III.6 Courbe de l'évolution de la résistance à la traction par flexion

La résistance en traction par flexion diminue avec la montée en température pour le cas de béton ordinaire. Au-delà de 200°C, on constate d'après la Figure III.6 que la baisse de la résistance en traction devient plus grande, Cela est causé par la détérioration de la pâte de ciment (la décomposition de la portlandite et les CSH).

### III.3.5 Conclusion sur le comportement des bétons sans fibres

Faisant suite aux résultats obtenus et ce à partir des essais accomplis sur des éprouvettes de bétons ordinaires on remarque ce qui suit :

- **Les propriétés physiques**

Une réduction de la masse du béton avec l'accroissement de la température suite aux résultats donnés par le pesage des échantillons avant et après chaque traitement thermique. Cette réduction de masse passe par trois étapes.

La première étape, partant de la température environnante à celle de 200°C, pointée par une légère diminution de masse à cause de l'évacuation de l'eau libre.

La deuxième étape va de la température 200°C à celle de 450°C caractérisée par une haute réduction de masse suite à l'évacuation de l'eau renfermée dans les hydrates.

Dépassant la température de 450°C, on constate une toute légère perte de masse.

- **Les propriétés mécaniques**

En résumé et selon les graphes de transformation de résistance en fonction de la température d'échauffement on peut diviser les propriétés mécaniques en deux phases. La première, allant de la température voisine à 450°C, est signée par une légère diminution ou un gain de la résistance.

Au-delà de la température de 450°C c'est la seconde étape, cette dernière est caractérisée par une grande réduction de résistance. Les spécimens provenus d'un traitement thermique à 600°C montrent de très basses résistances à cause du fort gradient thermique et de la fonte et l'évaporation des fibres de polypropylènes.

D'autre part aucune déflagration d'échantillon n'a été marquée ce qui montre l'effet positive des fibres de polypropylène sur les propriétés du béton exposé à de hautes températures.

***CHAPITRE IV***

*COMPORTEMENT DES BETONS*

*AVEC FIBRES POLYPROLENE*

---

## IV.1 Etude de la stabilité thermique

Dans cette phase on va développer le rôle des fibres de polypropylène, sur la stabilité thermique des bétons établis sur des échantillons de matériaux à l'état condensé. Pour cela le test comporte l'étude des spécimens chauffés à une température de 600°C, avec une vitesse de chauffage de 1°C.mn<sup>-1</sup>.

Pour chaque formulation de béton l'expérience est accomplie, sur trois échantillons cubique 10 x10 cm. Après vingt-quatre heures, les spécimens sont démoulés et pesés puis plongés dans l'eau. Cette opération est répétée après vingt-huit jours, ces mêmes spécimens sont pesés après avoir été nettoyés avec une lingette soignée. Déposés à l'air libre pendant quatre heures de temps, puis elles sont mises dans le four pour subir le cycle thermique .ci-dessous le Tableau IV.1 qui regroupe le pourcentage des pertes de masses des échantillons avant et après immersion et chauffage à 600 °C.

*Tableau IV.1 pourcentage de perte de masse des échantillons de bétons avant et après immersion et chauffage à 600°C.*

Température	Pourcentage En fibres	Perte de masse (%)
600°C	0	8.2%
600°C	0.5%	8.5%
600°C	1%	8.7%
600°C	1.5%	9.3%

On observe suite à l'échauffement établi sur des spécimens en béton ordinaire à une température de 600°C, de grandes fissures pouvant créer des risques de déflagration.

Par ailleurs aucune déflagration n'a été considérée sur les autres échantillons, à savoir BF 0,5% 1% 1,5% cela explique le rôle positif des fibres de polypropylène dans l'augmentation de la stabilité thermique du béton.

## IV.2 Evolution de la propriété physique en fonction du chauffage

### IV.2.1 Perte de masse

Pour permettre d'analyser les transformations que subisse la masse des bétons fibrés en fonction de la température de chauffage, Il a été procédé au pesage des échantillons avant et après chaque traitement thermique.

Tableau IV.2 valeurs des pertes de masse des bétons avec 0.5% de fibres

Echantillons	Degré de température	La perte de masse(%)
Eprouvette 2	200°C	4.2
Eprouvette 3	450°C	7.9
Eprouvette 4	600°C	8.5

Tableau IV.3 Pertes de masse des bétons avec 1.0% de fibres

Echantillons	Degré de température	La perte de masse(%)
Eprouvette 2	200°C	4.6%
Eprouvette 3	450°C	8.5%
Eprouvette 4	600°C	8.6%

Tableau IV.4 Pertes de masse des bétons avec fibres dosages de 1.5%

Echantillons	Degré de température	La perte de masse(%)
Eprouvette 2	200°C	5%
Eprouvette 3	450°C	9.1%
Eprouvette 4	600°C	9.4%

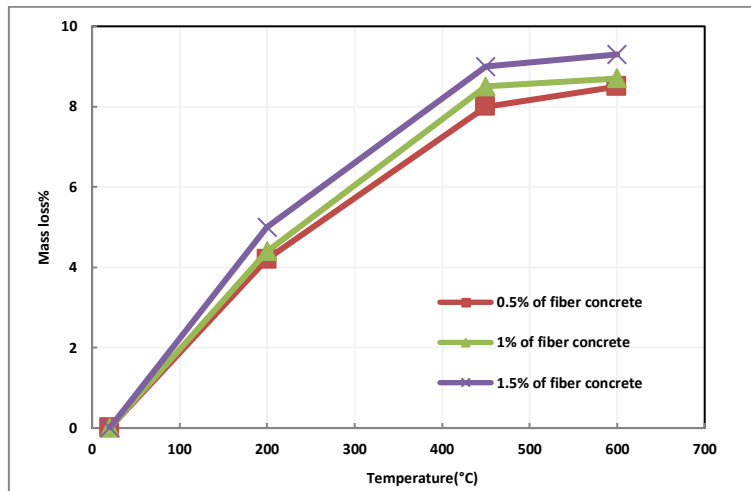


Figure IV.1 Courbe de l'évolution de la perte de masse en fonction de la température

Comme on peut le constater sur la Figure IV.1, avec l'accroissement de la température, la masse du béton diminue. Cette diminution de masse est causée surtout par l'évacuation de l'eau qui se produit à une température de 600°C et qui se déroule généralement en trois étapes. Ces étapes peuvent être résumées comme suit :

Pour le cas d'une température ambiante à 200°C, on observe une légère diminution de masse causée par l'eau émancipé dans le béton.

Dans le cas d'une température comprise entre 200°C et 450°C un accroissement d'une manière pressante de la perte de masse causée par l'eau renfermée dans les hydrates et spécialement dans le silicate de calcium hydraté. Selon Kanéma[53], à 300°C, le béton peut user jusqu'à 80% de la masse complète d'eau. Dépassant 300°C. Cette phase est caractérisée par une légère diminution de masse équivalente à la déshydroxylation de la Ca (OH<sub>2</sub>) à la dissociation des silanols (SiOH), du silice et à la décarbonatation du calcaire.

A 600°C, on constate la masse du béton subit une diminution légère caractérisée par un faible saut comparativement au deuxième palier. Ceci est dû à la déshydroxylation de la portlandite.

Pour les bétons fibrés on peut observer aussi sur la Figure IV.1 qu'un accroissement de l'allure de perte de masse est notable et les trois phases déterminant la modification de la perte de masse en termes de températures peuvent également être remarquées.

De même, l'ajout de fibres conduit à un accroissement de la perte de masse par rapport au béton non fibrés. La diminution de masse supplémentaire est reliée à la fonte des fibres pendant l'élévation de la température. En effet, la fonte des fibres aide le flux de transport et d'évacuation.

#### IV.2.2 Evolution de la porosité

Les pourcentages des porosités relatifs à tous les bétons de fibres de polypropylènes sont indiqués dans les tableaux ci-dessous la Figure IV.2 montre la transformation de la perméabilité des bétons auxquels on a ajoutés des fibres de polypropylène en fonction du cycle de traitement thermique.

*Tableau IV.5 Porosité moyenne bétons avec fibres avant chauffage*

Echantillons	Dosage de fibre(kg/m <sup>3</sup> )	La porosité (%)	La compacité (%)
Eprouvette1	0.5	12	88
Eprouvette2	1	14	86
Eprouvette3	1.5	17	83

*Tableau IV.6 Porosité moyenne des bétons chauffés avec fibres dosés à 0.5%.*

Echantillons	Degré de température	La porosité (%)	La compacité (%)
Eprouvette1	200°C	15	85
Eprouvette2	450°C	21	79
Eprouvette3	600°C	22	78

*Tableau IV.7 Porosité moyenne bétons chauffé avec fibres de1%*

Echantillons	Degré de température	La porosité (%)	La compacité (%)
Eprouvette1	200°C	16	84
Eprouvette2	450°C	22	78
Eprouvette3	600°C	23	77

Tableau IV.8 Porosité moyenne bétons chauffé avec fibres de 1.5%.

Echantillons	Degré de température	La porosité (%)	La compacité (%)
Eprouvette1	200°C	18	84
Eprouvette2	450°C	23	77
Eprouvette3	600°C	24	76

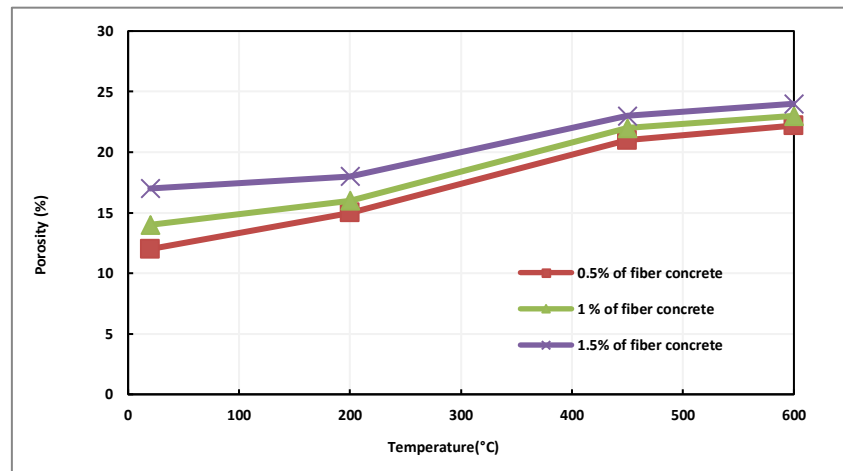


Figure IV.2 Courbe de l'évolution de la porosité en fonction de la température

Les résultats des tests empiriques réalisés par les différents auteurs ont exposé un accroissement de la porosité en tenant compte de la température pour les bétons ordinaires et ceux à hautes performances en présence ou en l'absence de fibres [112], [113].

D'après les résultats présentés sur la Figure IV.2, l'inclusion de fibres de polypropylène dans le béton soumis à un traitement thermique conduit à un accroissement de la taille des pores et modifie le chemin d'extension de la perméabilité. De plus, les fibres de polypropylène montrent la survenue d'une perméabilité additionnelle. Cette perméabilité est reliée à de très petites fissures produites par l'expansion du polypropylène et également aux conduites formées après la fonte de la fibre. De plus, lors du chauffage au moment où le dosage des fibres accroît, un autre vide se produit.

Toujours selon le graphique obtenu, la porosité du béton chauffé mesuré avec 1,5% de fibres augmente significativement par rapport aux deux autres mesures.



### IV.2.3 Absorption en eau

L'absorption en eau augmente progressivement en fonction de deux paramètres qui sont la porosité et l'absorptivité (c'est-à-dire la vitesse d'absorption), plus l'humidité contenue dans le béton est élevée, plus le volume mesuré de l'absorptivité est faible Assié [114]. L'absorption d'eau par les fibres est proportionnelle au pourcentage de fibres dans le béton.

Comme le montre la Figure IV.3 l'absorption d'eau augmente d'une façon continue en fonction du taux des fibres et elle est maximale avec un dosage de 1.5% de fibres jusqu'au point de saturation.

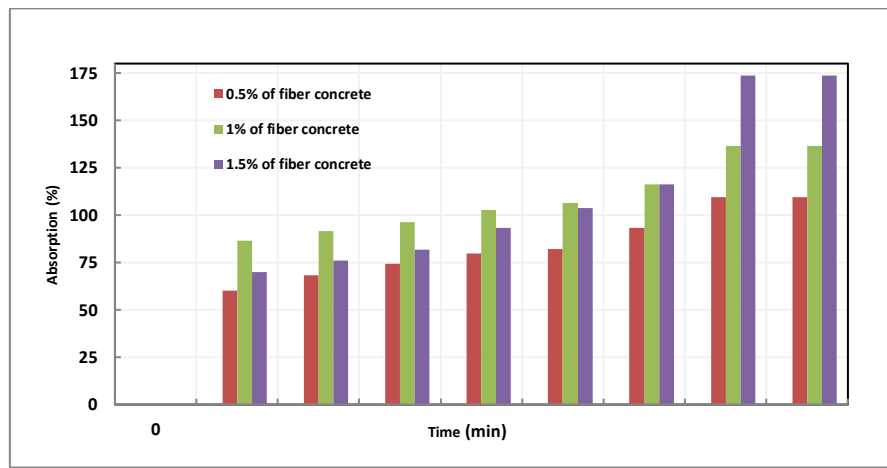


Figure IV.3 Variation de l'absorption en fonction du temps

## IV.3 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage

### IV.3.1 les essais de compression

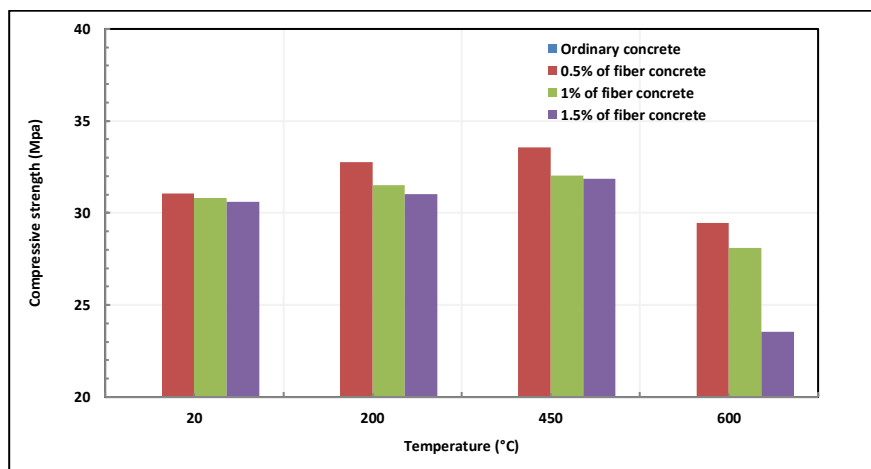


Figure IV.4 Variation de la résistance à la compression en fonction de T

Pour les différents cas de température et comme l'indique la figure IV.4, la résistance à la compression du matériau accroît avec les différents taux de fibres de polypropylène, en raison de l'effet du chauffage et elle est optimale pour le taux 0,5% de fibres.

Au-delà de 200°C l'eau liquide se transforme en vapeur et l'amélioration de la résistance est due à l'évacuation de cette eau permettant un rehaussement des forces d'attraction par l'assemblage des feuilles de CSH [115] [116]. Puis cette résistance diminue de façon significative à 600°C en raison de la fusion partielle ou totale des fibres de polypropylène créant des canaux dans la matrice de ciment.

Il est à noter que l'évolution de la résistance à la compression du béton ordinaire est similaire à celle du béton fibré mais reste inférieure à celle-ci. Des aboutissements analogues ont été considérés par certains savants [8, 14].

### IV.3.2 Essai de l'ultrason

#### IV.3.2.1 Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores

Le but primordial de ce type de test est de collecter le plus grand nombre de données sur l'aptitude et la qualité des bétons sous l'effet de hautes températures.

Ce procédé permet de détecter la vitesse de diffusion d'ondes. L'évaluation de cette vitesse de diffusion d'ondes procure de grands privilèges d'accorder des renseignements sur la qualité intérieure du béton. De ce fait, le test est ainsi utilisé pour mesurer la qualité du matériau et repérer la dégradation, les vides et les désordres causés par le feu.



Figure IV.5 Appareillage des essais ultrasoniques

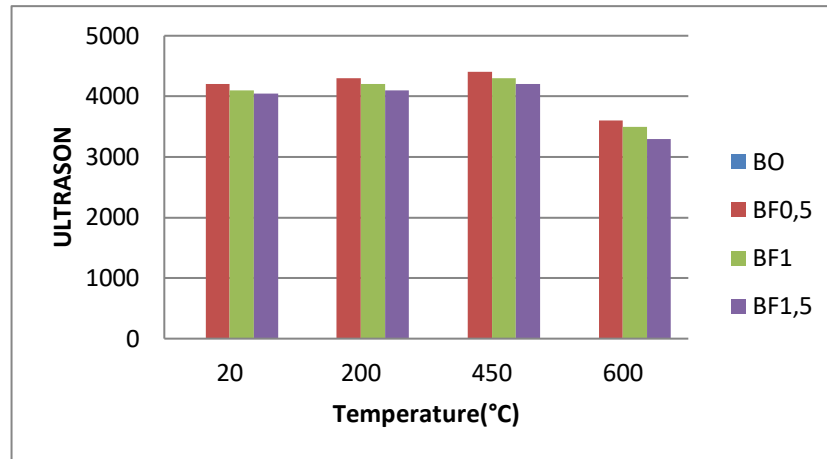


Figure IV.6 Variation de la résistance à la compression par ultrason en fç de T

Sur la base des résultats obtenus lors des essais aux ultrasons pour les différents types de béton, à savoir le béton ordinaire et le béton fibré avec 0,5% 1% et 1,5% de fibres.

A l'examen de la Figure IV.6, on peut remarquer que les résultats de la variation de la vitesse d'onde augmentent à une température allant de 200°C à 450°C et diminuent progressivement lorsque la température atteint 600°C d'une manière similaire aux résultats fournis par [117,118]. Ces auteurs constatent que la concentration de fissures au niveau du béton chauffé accroît avec la hausse de la température d'échauffement. Par conséquent, la vitesse de propagation du son du béton diminue lorsque le cycle de chauffage augmente. Cette diminution de la vitesse de propagation du son est attribuée au fait qu'il y a une expulsion des bulles d'eau contenues dans le béton.

### IV.3.3 Les essais de traction par flexion

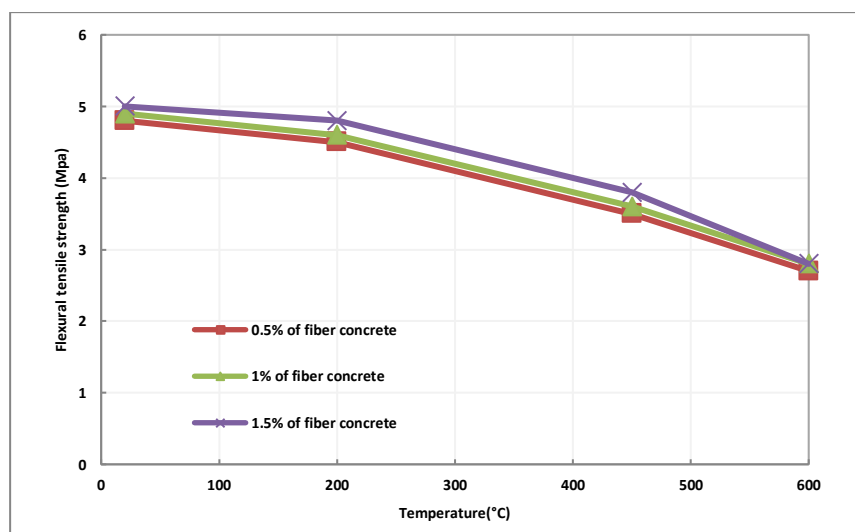


Figure IV.7 courbe de La variation de la résistance à la flexion

D'après des études précédentes effectuées par des auteurs, tels que [119, 120], on observe une diminution de la résistance à la traction compte tenu de la température.

La Figure IV.7 impliquant les résistances à la traction des bétons fibrés pour divers traitements thermiques révèle une diminution progressive de la résistance à la traction du béton avec des fibres de polypropylène lorsque la température de chauffage accroît. Cette résistance est réduite avec l'accroissement de la température relatif aux différents bétons étudiés. A l'exception ou alors au-dessus de 300°C, la diminution de la résistance à la traction demeure plus importante, tous les bétons usent plus de la moitié de leur résistance primaire à la traction en raison de la dégradation de la matrice cimentaire (décomposition de la portlandite).

Des résultats similaires ont été observés par d'autres chercheurs pour le béton ordinaire et le béton fibré Chen et al. [121]. Les résultats des essais pour le béton sans fibre conduisent à une perte de résistance à la traction plus faible que celle du béton fibré voir Figure IV.7

Suresh et Sachin [122] ont observé que les spécimens exposés au feu avaient une résistance résiduelle à la traction plus faible que les spécimens chauffés dans un four électrique à la même température

Finalement à travers une étude expérimentale réalisée par Mathews et al. [123] pour observer l'effet d'une température élevée sur les caractéristiques et durabilité du béton ordinaire. Il ont constaté, une diminution significative des performances mécaniques pour le cas des éprouvettes chauffées.

#### IV.4 Conclusion sur le comportement des bétons de fibres de polypropylène

Faisant suite aux résultats obtenus à partir des tests exécutés sur les bétons fibrés on constate que les fibres de polypropylènes améliorent la stabilité thermique du béton. La fonte du polypropylène engendre des voies aidant le transport du flux. La diminution de masse des bétons accroît avec la température suivant trois phases de pentes distinctes à noter qu'une diminution de masse additionnelle est distinguée sur les bétons de fibres de polypropylène.

Les aboutissements relatifs à l'évaluation de la perméabilité montrent un accroissement de cette dernière plus violente pour les bétons avec des fibres que ceux sans fibres.

La résistance en compression des bétons de fibres de polypropylènes se développe par rapport à la température suivant deux phases de pentes distinctes .La première phase , démarre de la température environnante à 200°C, est caractérisée par une réduction ou un accroissement

de résistance. La seconde phase débute de la température de 450°C, est caractérisée par une rapide décroissance de la résistance. L'incorporation des fibres de polypropylène dans le béton engendre d'une manière habituelle une baisse de résistance en compression à cause de la fonte et l'évaporation des fibres.

Le rôle des fibres sur la résistance en traction du béton fibré est négatif malgré la grande résistance en traction des fibres qui est égale à 300MPa. Par rapport aux différents taux de fibres de polypropylène étudiés, nous remarquons que la proportion de 0.5% mène à d'excellentes résistances mécaniques. Les résultats présentés dans ce chapitre ont confirmé l'effet positif des fibres de polypropylène sur l'équilibre thermique des bétons et l'accroissement notable de la porosité évaluée après les différents cycles de traitement thermique, suite à l'incorporation de fibres de polypropylène.



**CONCLUSION GENERALE  
ET PERSPECTIVES**

## Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est de constater l'influence des fibres de polypropylène sur l'amélioration de l'instabilité thermique du béton et de ses performances mécaniques.

La première partie de cette thèse a été axée sur une étude bibliographique regroupant les travaux accomplis par les différents auteurs sur l'évolution des comportements physiques et mécaniques des bétons sous des températures élevées. Le deuxième domaine comporte le plan expérimental et indique l'élaboration des matériaux étudiés ainsi que le matériel de réalisation.

Il a été procédé à la formulation de deux types de bétons à savoir, bétons non fibrés, et bétons comportant des fibres de polypropylène. Le rapport E/C des formulations de béton était maintenu constant.

Les caractéristiques physiques comme la perte de masse, l'absorption d'eau, la porosité ainsi que les caractéristiques mécaniques comme la résistance en compression, la résistance en traction ont fait objet d'analyse.

Les spécimens en béton ont subis des cycles de traitement thermique de la température environnante à 200°C-450°C et 600°C. La vitesse de chauffage était de 1°C/min.

Sur la base des résultats obtenus nous pouvons établir les conclusions suivantes :

- **Caractéristiques physiques :**

La perte de masse diminue avec l'accroissement de la température pour les deux types de béton et elle est plus importante pour le béton de fibre. À 200°C, la réduction de masse était légère. Ceci est dû à l'évacuation de l'eau libre renfermée dans les orifices du béton (séchage du béton). À 450°C on distingue une forte augmentation de perte de masse à cause du départ de l'eau chimiquement liée. À 600°C on constate un faible bondissement de relatif au changement de perte de masse comparativement au deuxième palier. Ceci est dû à la déshydroxylation de la portlandite.

L'addition des fibres polypropylène montre un léger accroissement de la perte de masse par rapport à celle des bétons ordinaires. Cette diminution de masse complémentaire est reliée à la fonte du polypropylène au moment où la température monte aidant ainsi le transfert de flux et le départ du matériau.

La porosité des bétons accroît avec la hausse de la température car au moment du chauffage, la structure microscopique du béton est métamorphosée et le matériau est plus perméable, l'existence de fibres de polypropylène dans le béton échauffé provoque une hausse

de la capacité des pores et change la cinétique d'apparition de la porosité.

Il a été observé aussi que l'évaluation de la perméabilité montre un accroissement rapide de cette dernière pour les bétons renforcés par des fibres par rapport aux bétons ordinaires.

▪ *Caractéristiques mécaniques*

D'après les résultats de changement de la résistance en fonction des cycles de traitement thermique, on peut diviser les propriétés mécaniques en deux étapes :

La première, partant de la température environnante jusqu'à 450°C, est signée par une légère réduction due à la dilatation thermique de l'eau permettant un écart des feuilles du gel CSH ou une progression de la résistance à 450°C. Ce gain qui est causé par l'évacuation de l'eau entraînant la hausse des forces d'attraction par l'assemblage des feuillets de CSH. Au-delà de la température de 450°C c'est le second domaine ce dernier est marqué par une énorme baisse de résistance. A 600°C on a de très faibles résistances à cause du fort gradient thermique et de la fonte et l'évaporation des fibres de polypropylène. L'incorporation des fibres de polypropylène dans le béton crée d'une manière habituelle une décroissance de résistance en compression à cause de la fonte et l'évaporation des fibres.

A partir des aboutissements acquis lors des tests aux ultrasons pour les divers types de béton, à savoir le béton ordinaire et celui fibré.

On peut remarquer que les résultats de la variation de la vitesse d'onde augmentent à une température allant de 200°C à 450°C et diminuent progressivement lorsque la température atteint 600°C car la concentration de fissures du béton chauffé accroît avec l'accroissement de la température de chauffage. Par conséquent, la vitesse de diffusion du son du béton s'accroît lorsque le cycle de chauffage s'amplifie. Cette diminution de la vitesse de diffusion du son est attribuée au fait qu'il y a une expulsion des bulles d'eau contenues au sein du béton.

La résistance en traction par flexion diminue avec la montée en température pour tous les types de bétons, les résistances à la traction des bétons fibrés pour divers cycles de traitement thermique révèle une diminution progressive de la résistance à la traction du béton avec des fibres de polypropylène lorsque la température de chauffage augmente en raison de la dégradation de la matrice cimentaire (décomposition de la portlandite).

Finalement, et d'après les résultats on constate que le dosage à 0,5 % de fibres conduit aux meilleures résistances à la compression.



## Perspectives

A travers cette étude, nous avons constaté le rôle des fibres de polypropylène sur la bonne conduite du béton exposé à des hautes températures.

Les expériences accomplies ont permis d'analyser le béton jusqu'à atteindre la température de 600°C avec une vitesse d'échauffement insignifiante comparativement à celle d'un vrai incendie. Pour cela je suggère de

- Développer des travaux à des structures de grandes échelles ainsi que des vitesses de chauffage supérieures.

- Faire une étude comparative avec d'autres types de fibres tels que les fibres d'acier et les fibres de chanvres ainsi qu'une combinaison de fibres de polypropylène et d'acier

- Faire élargir la variation des taux de fibres, leurs dimensions et la variation des rapports Eau /Ciment.

## Références

- [1] [Nona, 2008] Nonat, A., L'hydratation des ciments, La durabilité des bétons, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008, pp. 25-50.
- [2] 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.
- [3] [Diam, 1986] Diamond, S., The microstructure of cement paste in concrete, in proceeding of the 8<sup>th</sup> international on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 1, 1986, pp. 122-147.
- [4 ] [Rego, 1982] Regourd, M., Le béton hydraulique, chapitre l'eau, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 59-68.
- [5] [Diam, 2004] Diamond, S., The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer, Cement and Concrete Composites, Vol. 26, 2004, pp. 919-933.
- [6] [Perr, 1999] Perraton, D., Aïtcin, P. C., Carles-Gilbergues, A., Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque. Partie II – étude de l'influence de la taille des éprouvettes et de la variabilité des résultats dans le cas d'un BHP, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 221, 1999, pp. 79-87.
- [7] Gaweska I. H., « Comportement à haute température des bétons à haute performance- évolution des principales propriétés mécaniques », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MODES, 2004.
- [8] Malier Y., « Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p.674, 1992.
- [9] Mehta P.K., « Concrete. Structure, properties, and materials », Englewood cliff, New Jersey, Prentice-Hall, 1986.
- [10] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G., « Microstructural features of concrete in relation to initial temperature-SEM and ESEM characterization », Cement and Concrete Research, vol. 29, p. 369-375, 1999.
- [11] [Meth, 1986] Metha, P. K., concrete structure, properties, and materials. Englewood cliff, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- [12] [Mour, 1999] Mouret, M., Bascoul, A., Escadeillas, G., Microstructural features of concrete in relation to initial temperature – SEM and ESEM characterization, Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 369- 375

- [13] [Savv, 2005] Savva, A., Manita, P., Sideris, K., Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, 2005, pp. 239-248.
- [14] [Vive, 1997] Vivekanandam, K., Patnaikuni, I., Transition zone in high performance concrete during hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, 1997, pp. 817-823.
- [15] Billard Y., « Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003.
- [16] 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'Équipement, des Transports et du Tourisme, 1994.
- [17] 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.
- [18] Fares H., « *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée* », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [19] ACI COMMITTEE 544, " State of the art report on fibre-reinforced concrete " - *Am.ConcIns.Proc* Vol 70., N° 11., November 1973., pp.729-744.
- [20]- MEHTA, P.K., " Concrete : structure, properties, and materials ", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986., 450p.
- [21] ANTOINE, E.N., " Fibre reinforced for concrete ", *Concrete International design and construction*, Vol 7., N° 3., March 1985, pp.21-25.
- [22] ACI COMMITTEE. " State of the art report on fibre reinforced concrete ", *Journal.American Concrete Institute.*, March-April 1984, pp.140-146.
- [23]- BRAUN, M. & MAJDIC, A.; " Reinforcing castables with stainless steel fibres " *Intercera.*, Vol 129., N°.129, 1980 , pp.113-118.
- [24]- GRAHAM, G.M.; " Reinforced concrete ", US Patent N° 983,274, February 1911.
- [25]- WEAKLEY, B.D.; " Bonding means for reinforced concrete structures ", US Patent N° 13. 1,046,913, 10 December 1912.
- [26]- FICKLEY, W.; " Improvements in reinforcing structures and wearing surfaces of hydraulic, bituminous like cement, concrete, asphalt " .British Patent N° 11754, May 1914.

- [27]- SMITH, W.; “ Ferroconcrete construction ”, US Patent N°. 1,349,901. June 21, 1927.
- [28]- MARTIN, G.C.; “ Method of forming pipe ”, US Patent N°.1,633,219, June 21, 1927.
- [29]- BATTELLE DEVELOPMENT CORPORATION.; “ Concrete and steel material ”, British Patent N°1068163, December 1963.
- [30]- ROMUALDI, J.P. & BATSON, G.B.; “ Mechanics of crack arrest in concrete ”. Proceeding of American.Society of Civil Engineers, Vol.89, June 1963, pp.147- 168.
- [31]- ROMUALDI, J.P. & MANDEL, J.A.; “ Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement ” Journal. American.Proceeding., Vol.61, N°. 6, June 1964, pp. 657-671.
- [32]- LANKARD, D.R. & SHEETS, H.D.; “ Use of steel wire fibres in refractory castables ”. Am. Cer. Soc., Vol. 63, No.7, 1971.
- [33]- BEDDAR, M.et al ;“ Influence of fibre geometry on the performance of refractory concrete.” Proceeding ICCM and ECCM 1986, Elsevier Applied Science publishers, Vol. 2, 1986, pp. 2.80 -2.89.
- [34]- KOSAKA, Y. et al “ Lateral confining stresses due to steel fibers in concrete under Compression ” The international. Journal for cement composites and lightweight concrete, Vol.7, N° 2, May 1985, pp. 81-92.
- [35]- PILKINGTON. J; “ Une nouvelle plaque ondulée sans amiante obtient un agrément officiel ”. Cem-FIL NEWS, N°.39, Automne 1987, p.1.
- [36]- DANILO, J. & FABIEN, Z “ Etat de connaissance sur les bétons armés de fibres ”, Journal Matériaux, N°.347, Fevrier, 1977, p.37.
- [37]- BEKAERT, “ Doc an innovative revolutionary concept for EMI and conductive plastics ” Bekishieldmétalfibres, 1986.
- [38] 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
- [3] 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.
- [40] [Arup, 2005] ArupFire, HSE, Fire resistance of concrete enclosures, Work Package 1: data collection, Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, Work Package 7: look-up tables, Work Package 8:

spalling guidance, Rev B,2005

[41] [Harm, 1965] Harmathy, T.Z., Effect of moisture on the fire endurance of building element, National Research Council, Research paper n° 270 of the division of building research, Ottawa 1965, Canada.

[42] [Ande, 1997] Anderberg, Y., Spalling phenomena of HPC and OC, International workshop on fire performance of high-strength concrete, NIST, Gaithersburg, M D, 13-14 February 1997.

[43] [Jans, 2009] Jansson, R., Bostrom, L., Fire spalling, The moisture effect, 1<sup>st</sup> International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Proceedings, F. Dehn, E.A.B. Koenders, 2009, pp. 120-129.

[44] [Zeim, 2006] Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., Mang, H., How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, pp. 929-942.

[45] [Robe, 2008] Robert, F., Colina, H., Debicki, G., La durabilité des bétons face aux incendies. La durabilité des bétons, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008, pp. 707-765.

[46] [Baza, 1997] Bazant, Z.P., Kaplan, M.F., Concrete at high temperature, Material properties and mathematical models, Longman House, Burnt Mill, England, 1997.

[47] [Ulm, 1999] Ulm, F-J., Coussy, O., Bazant, Z.P., The “Chunnel” fire. I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete, Journal of Engineering Mechanics, March 1999, pp. 272-282.

[48] [Mind, 2009] Mindeguia, J-C., Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.

[49] [Hage, 2004] Hager, I., Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.

[50] [Harm, 1964] Harmathy, T.Z., Moisture in materials in relation to fire test, ASTM, Special Technical Publication, n° 385, 1964, pp.74-95.

[51] [Hert, 2003] Hertz K., limits of spalling of fire – exposed concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, 2003, pp.103-116.

[52] [Noum, 2003] Noumowé, N., Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C, ACI Materials Journal, Title n° 100-M39, pp. 326-330.

- [53] [Kane, 2007(a)] Kanéma, M., Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.
- [54] [Kane, 2007(b)] Kanéma, M., de Morais, M.V.G., Noumowé, A., Gallias, J.L, Cabrillac, R., Thermo-hydrous transfers in a concrete element exposed to high temperature: experimental and numerical approaches, *Heat and Mass Transfers*, 44(2), 2007, pp. 149-164.
- [55] [Died, 1989] Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Pentalla, V., Behaviour of high strength concrete at elevated temperatures, Espoo 1989, Helsinki University of Technology, Department of structural Engineering, report 92, pp.72.
- [56] [Schn, 1981] Schneider, U., Diederich, U., EHM, C., Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS, *Nuclear engineering and design*, Vol. 67, 1981, pp. 245-258.
- [57] [Noum, 1995] Noumowé, N.A., Effet de hautes températures sur le béton (20-600°C), Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
- [58] [Alar, 2005] Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., Ehrlacher, A., The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp.609-613.
- [59] [Cast, 2004] Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Tirillas, X., Campo, J., Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp.1633-1644.
- [60] [Alon, 2004] Alonso, C., Fernandez, L., Deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, *Journal of Materials Sciences*, Vol. 39, 2004, pp. 3015-3024.
- [61] [Jona, 2005] Jonatka, I., Nürnbergerova, T., Effect of temperature on structure quality of cement paste and high-strength concrete with silica fume, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, 2005, pp.2019-2032.
- [62] [Xing, 2009] Xing, Z., Beaucour, A-L., Ronan, H., Noumowé, A., Ledesert, B., Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement à haute température des bétons, *AUGC*, 02/42, 2009, pp.1-15.
- [63] [Dias, 1990] Dias, W.P.S, Khoury, G.A, Sullivan, P.J.E, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, *ACI Materials Journal*, title n°87-M18, 1990.
- [64] [Khou, 1986] Khoury, G.A., Grainger, B.N., Sullivan P.J.E., Strain of concrete during first

- cooling from 600°C under load, Magazine of Concrete Research, Vol. 38, 1986, pp.3-12.
- [65] [Khou, 1992] Khoury, G. A., Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, Magazine of Concrete Research 44, n°161, 1992, pp. 291- 309.
- [66] [Cruz, 1980] Cruz, C.R., Gillen, M., Thermal expansion of portland cement paste, mortar or and concrete at high temperature, Fire and Materials, Vol. 4, 1980, pp.66-70.
- [67] [Jump, 1989] Jumppanen, U.M., Effect of strength on fire behavior of concrete, Nordic Concrete Research, N° 8, 1989, pp. 116-127.
- [68] [Meno, 2004] Menou, A., Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: approche multi échelles de l'endommagement thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [69] [Hara, 1972] Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., Furumura, F., Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, Concrete for nuclear reactors, American Concrete Institute, SP 39, 1973, pp. 179-203.
- [70] [Pias, 1989] Piasta, J., Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste, Materials and Structures: research and testing. RILEM. Paris. Vol. 17, n° 102, pp.415-420.
- [71] [Cast, 1990] Castillo, C., Durrani, A.J., Effect of transient high temperature on high-strength concrete, ACI Materials Journal, title n°87-M7, 1990, pp. 47-53.
- [72] [Pimi, 2000] Pimienta, P., Le comportement au feu des BHP, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp.77-124.
- [73] [Died, 1992] Diederichs, U., Jumppanen, U.M., High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete, Verlag für architektur und techn.wissenschaften, Ernst & schn, 1992, pp.191-197.
- [74] [Phan, 2002] Phan, L.T., High-strength concrete at high temperature- an overview, National institute of standards and technology, High performance concrete 6<sup>th</sup> International symposium proceeding, Vol. 1, 2002.
- [75] [Phan, 2003] Phan, L.T., Carino, N.J., Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature, National institute of standards and technology, Materials and Structures, Vol. 36, N°256, 2003, pp.91-98.
- [76] [Kodu, 2004] Kodur, V.K.R, Wang, T.C., Cheng, F.P., Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns, Cement and Concrete Composites, Vol. 26, 2004, pp. 141-143.



- [77] [Min, 2004] Min, Li, Chun xiang, Q., Sun, W., Mechanical properties of high-strength concrete after fire, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1001-1005.
- [78] [Chang, 2006] Chang, Y.F., Chen, Y.H., Shen, M.S., Yao, G.C., Residual stress-strain for concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp.1993-2005.
- [79] [Khou, 1988] Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E., Research at imperial college on the effect of elevated temperatures on concrete, *Fire safety journal*, Vol. 13, 1988, pp.69-72.
- [80] [Sabe, 2007] Sabeur H., Colina H., Bejjani M., elastic strain, young's modulus variation during uniform heating of concrete, *Magazine of concrete research*, Vol. 59, n°8, 2007, pp.559-566.
- [81] [Tole, 2002] Tolentino, E., Lameiras, F.S., Gomes, A.M., Rigo da Silva, C.A., Vasconcelos, W.L., Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes, *Materials Research*, Vol. 5, n°3, 2002, pp. 301-307.
- [82][Noum, 2002] Noumowé, A., Lefèvre, A., Duval, R., Porosité supplémentaire consécutive à la fusion de fibres de polypropylène dans un béton à hautes performances, *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 6 – n°2/2002, pp. 301-313
- [83][Noum, 2005] Noumowé, N.A., Mechanical properties and microstruture of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200°C, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp.2192-2198.
- [84] [Kali, 2000] Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard, D., Spalling and pore pression in HPC at high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp.1-13.
- [85] [Kali, 2002] Kalifa, P., Pardon, D., Menneteau, F-D., Gallé, C., Chéné, G., Pimienta P., Comportement à haute température des bétons à haute performances : de l'éclatement à la microstructure, *Cahier du CSTB*, n°3435, Décembre 2002.
- [86] [Kali, 2001] Kalifa, P., Chéné, G., Gallé, C., High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 1487-1499.
- [87] [Xiao, 2006] Xiao, J., Falkner, H., On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevates temperatures, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, 200, pp.115-121.
- [88] [Baya, 2002] Bayasi, I.Z., Al Dhaheri, M., Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 99, n° 1, 2002, pp.22-26.
- [89] [Suha, 2006] Suhaendi, S.L., Horiguchi, T., Effect of short fibers on residual



permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp.1672-1678.

[90] [Chen, 2004] Chen, B., Liu, J., Residual strength of hybrid-fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp.1065-1069.

[91] [Behn, 2009] Behnood, A., Ghandehari, M., Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, *Fire Safety Journal*, 2009, doi:10.1016/j.firesaf.2009.07.001.

[92] [Poon, 2004] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp.2215-2222.

[93] [Chan, 2000] Chan, Y.N., Luo, X., Sun, W., Compressive strength and pore structure of high performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp.247-251.

[94] 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.

[95] [Pilya, 2010] Pilya P., Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée, thèse doctorat université de Cergy Pontoise, 2010

[96] EN 197-1 2012 « *Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements* ». AFNOR, La Plaine Saint-Denis, France (in French), Cement - Part 1, 2012.

[97] NA 442 2005 « *Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants* », 2005

[98] NF EN 933-1 1997 « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage* », AFNOR, 1997.

[99] NF EN 934-2 2012 « *Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage* », 2012.

[100] NF EN 1008 2003 « *Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton* », 2003.

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

- [102] NF EN 12350-2 1999 « *Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement* », AFNOR,1999.
- [103] NF EN 12390-2 2001 « *Essai pour béton durci, Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Indice de classement P 18-438* », AFNOR,2001.
- [104] NF EN 12350-6 2012 « *Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique* »,2012.
- [105] [Peng, 2006] Peng, G-F., Yang, W-W., Zhao, J., Liu Y-F., Bian, S-H., Zhao, L-H., Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 723-727.
- [106] NF EN 12390-3 2012 « *Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes* »,2012.
- [107] Norme Française NF P 18-407 1981 « *Bétons –Essai de Flexion* »,Éditions AFNOR, 1981.
- [108] NF EN 12504-4 2005 « *Essais pour béton dans les structures –Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son* »,2005.
- [109] AFPC-AFREM., « *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM; Durabilité des bétons* », Toulouse, France,1997.
- [110] Xiao H., Falkner, « *On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures* »,*Fire Safety Journal*, vol. 41, p. 115–121,2006.
- [111]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.
- [112] Caniche, R. 2011. “*Contribution à l’étude Des Bétons Portés En Température/Evolution Des Propriétés de Transfert : Etude de l’éclatement.*” Lyon, INSA.
- [113] Yermak, N. 2015. “*Comportement à Hautes Températures Des Bétons Additionnés de Fibres.*”
- [114] Assié, S. 2004. “*, Durabilité Des Bétons Autoplacants Thèse de Doctorat de l’institut National Des Sciences Appliquées Toulouse Octobre.*”
- [115] Dias W. P. S., Khoury G. A., Sullivan P. J. E., « *Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C* », *ACI Materials Journal*, N°87M18,1990
- [116] Felicitti R., Gambarova P. G., Sora M. N., Khoury G .A., « *Mechanical behaviour of*

*HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling* », Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes, N°5, p.749-758, Lyon, France,2000.

[117] Toumi, B. 2010. *Study of the Influence of High Temperatures on the Behaviour of Concrete Phd Thesis. Mentouri Constantine University.*

[118] Laneyrie, C. 2014. “*Valorisation Des Déchets de Chantiers Du BTP : Comportement à Haute Température Des Bétons Des Granulats Recyclés.*”

[119] Chen, Bing, and Juanyu Liu. “*Residual Strength of Hybrid-Fiber-Reinforced High-Strength Concrete after Exposure to High Temperatures.*” *Cement and Concrete Research* 34, no. 6 (June 2004): 1065–1069. Doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.010.

[120] Suhaendi, Sofren Leo, and Takashi Horiguchi. “*Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete after Heat Exposition.*” *Cement and Concrete Research* 36, no. 9 (September 2006): 1672–1678. Doi : 10.1016/j.cemconres.2006.05.006.

[121] Thanaraj, Daniel Paul, Anand N., and Prince Arulraj. “*Experimental Investigation of Mechanical Properties and Physical Characteristics of Concrete Under Standard Fire Exposure.*” *Journal of Engineering, Design and Technology* 17, no. 5 (August 10, 2019): 878–903. Doi :10.1108/jedt-09-2018-0159.

[122] V., Sachin, and N. Suresh. “*Residual Properties of Normal-Strength Concrete Subjected to Fire and Sustained Elevated Temperatures: A Comparative Study.*” *Journal of Structural Fire Engineering* 12, no. 1 (October 8, 2020): 1–16. doi:10.1108/jsfe-02-2020-0007.

[123] Mathews, Mervin Ealiyas, Tattukolla Kiran, Vellamaddi Chinmaya Hasa Naidu, G. Jeyakumar, and N. Anand. “*Effect of High-Temperature on the Mechanical and Durability Behaviour of Concrete.*” *Materials Today: Proceedings* 42 (2021): 718–725. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.153.

