

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

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



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

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de :  
**Doctorat en sciences : GÉNIE CIVIL**  
**Option : MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION**

## **L'influence des types de fibres sur le comportement du béton à haute température**

Présentée par :  
**RAHMANI HASSIBA Née BELARIBI**

Soutenue publiquement le 20 Mars 2019.

**Devant le jury composé de :**

Dr Bouzidi Mezghiche	Maitre de Conférences A	Président	Université de Biskra
Dr. Mekki Mellas	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. Mouloud Belachia	Professeur	Examineur	Université de Guelma
Dr. Hocine Chabil	Professeur	Examineur	Université de Constantine

## Remerciements

*Je tiens à présenter mes plus vifs remerciements aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse.*

*Un grand merci à Monsieur Mellas Mekki, Professeur à l'Université de Biskra, mon Directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'être le Directeur de ce travail. J'ai pu apprécier ses compétences scientifiques et il a su me faire profiter de son expérience et de ses directives fructueuses.*

*J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur le docteur Mezeghiche Bouzidi président de jury, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membre de jury et de bien vouloir juger ce travail.*

- *Monsieur Chabil Hocine Professeur à l'Université de Constantine.*
- *Monsieur Belachia Miloud Professeur à l'Université de Guelma.*

*Mes remerciements vont également au responsable du hall de mécanique Mr Guettalas Ismail et la responsable de Laboratoire de mécanique de sol M<sup>elle</sup> Khineche et Mr Tour Abdelmonaïme le Responsable de laboratoire de Génie Civil de l'Universités de Biskra. Je ne pourrais guère oublier de remercier vivement le professeur Othmani Mohamed Laid et les personnels de l'entreprise de Sika (El-Kalitouss, Alger).*

*Je tiens finalement à remercier très tendrement mon mari Rahmani Farid sans lui je ne serais jamais Docteur, mes enfants: Soundous, Aya, Yasmine, Mohamed. Du fond du cœur : **MERCI.***

*Je tiens à remercier de même mes parents qu'ils trouvent ici tout mon amour, toute ma reconnaissance et toute ma gratitude, mon frère Samir, mes sœurs et frères et ma belle-famille, et toutes mes amies de m'avoir écoutée me plaindre aussi de temps en temps...*

*C'est en partie grâce à vous que j'y suis arrivée. **MERCI.***

## *Dédicace*

Je dédie cet humble travail fruit de tant d'années d'études, d'efforts et de persévérance ;

*A mon père,*

*Ma mère,*

*Mon mari,*

*Mes enfants.*

## Résumé

La connaissance du comportement du béton soumis à des hautes températures constitue un enjeu de grand intérêt pour les applications en génie civil en cas d'incendies car le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température.

Le premier objectif de ce travail est une contribution à l'amélioration du comportement mécanique des bétons traités thermiquement avec différents types de fibres (métalliques, polypropylène, carbone et la combinaison entre plusieurs types de fibres). Le deuxième but est d'utiliser les essais non destructifs pour évaluer la résistance en compression par des relations empiriques.

Afin d'étudier l'influence de l'introduction des fibres sur le comportement des bétons soumis à des températures élevées, des essais sont effectués afin de caractériser les différentes propriétés physiques et mécaniques des bétons à haute température. De plus, des essais non destructifs ont été réalisés grâce à un ultrason UPV (ultrasonique pulse velocity) et le scléromètre RN (rebound-hammer).

Cette étude expérimentale aboutit à la formulation de bétons dont à la fois la stabilité à haute température et le comportement mécanique après refroidissement sont améliorés.. Les essais non destructifs qui ont été proposés sont des méthodes d'inspection prometteuse pour le béton endommagé par le feu.

**Mots clés :** *béton, température, fibres de polypropylène, fibres métalliques, fibres de carbone, propriétés mécaniques, essai non destructif, ultrason, scléromètre, régressions.*

## ABSTRACT

The behaviour of concrete exposed to high temperatures is an issue of great interest for civil engineering applications in the event of fires because the concrete may have thermal instability beyond a certain temperature.

The first objective of this research is to contribute in the improvement of the mechanical behavior of concretes treated thermally with different types of fibers (steel, polypropylene, carbon and with mixture fibers). The second objective is to use non-destructive testing to estimate the compressive strength the properties of concrete by empirical relationships.

For the sake of studying the influence of the introductory of fibers on the behavior of concretes in hardening state of the tests used to characterize the various physical and mechanical properties of concretes at high temperatures. Non-destructive tests were performed with using ultrasonic (UPV) and the rebound-hammer.

This experimental study shows a way to design a concrete mix in order to improve both the thermal stability and the residual mechanical properties. The non-destructive measurement, the tests have been proposed as a promising initial inspection method for fire-damaged concrete.

***Key words:*** *concrete, temperature, polypropylene fiber regressions, metal fibers, carbon fibers, mechanical properties, nondestructive testing, ultrasound, rebound hammer.*

## ملخص

تعتبر معرفة سلوك الخرسانة المعرضة لدرجات الحرارة العالية مسألة ذات أهمية كبيرة لتطبيقات الهندسة المدنية في حالة نشوب حرائق لأن الخرسانة قد تكون غير مستقرة بسبب درجة حرارة العالية.

الهدف الأول من هذا العمل هو تحسين السلوك الميكانيكي للخرسانة المعالجة حرارياً بأنواع مختلفة من الألياف (معدنية، البولي بروبيلين، كربون و خلهط من الألياف). الهدف الثاني هو استخدام قياسات الفحص الغير التحطيمية لتقدير خواص مقاومة الضغط الخرسانة من خلال علاقات تجريبية.

من اجل دراسة و فهم سلوك الخرسانة تحت تأثير الألياف، أجريت اختبارات ميكانيكية وفيزيائية. بالإضافة إلى ذلك تم إجراء قياسات الفحص الغير التحطيمية باستخدام مقياس الصلادة ومقياس سرعة النبض بالموجات فوق الصوتية.

من حيث السلوك الميكانيكي، تظهر النتائج أن الخرسانة مع الألياف لها سلوكاً أفضل عند تعرضها لدرجة حرارة عالية. أما من حيث القياسات الغير التحطيمية، تم ملاحظة أن هذا النوع من القياسات أسلوب فحص أولي واعد للخرسانة المتضررة من درجات حرارة عالية.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة، درجة الحرارة، ألياف البولي بروبيلين، الألياف من الحديد، ألياف الكربون، الخواص الميكانيكية، القياسات الغير التحطيمية، مقياس الصلادة، مقياس سرعة الموجات فوق الصوتية.

# Table des Matières

Liste des figures	I
Liste des tableaux	VII
Liste des Notations	VIII
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	01

---

## *CHAPITRE I. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE*

---

<b>I.1 Introduction</b>	05
<b>I.2 Modifications des propriétés des constituants d'un béton à haute température</b>	05
I.2.1 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie	05
I.2.2 Evolution des granulats	07
I.2.3 Dégradation de l'interface pâte – granulats	08
<b>I.3 Les propriétés physiques et mécaniques de béton en fonction de la température</b>	08
I.3.1 Les propriétés physiques en fonction de la température	08
I.3.1.1 La perte de masse	08
I.3.1.2 La porosité	10
I.3.1.3 La perméabilité	12
<b>I.3.2 Les propriétés mécaniques du béton chauffé</b>	13
I.3.2.1 Résistance en compression	13
I.3.2.2 Résistance en traction	16
I.3.2.3 Le module d'élasticité	19
<b>I.4 Les propriétés thermiques du béton avec la température</b>	22
I.4.1 La conductivité thermique	22
I.4.2 Chaleur spécifique	23
<b>I.5 Instabilité thermique du béton</b>	24
I.5.1 Différentes formes d'instabilité thermique	24
I.5.1.1 L'écaillage	24
I.5.1.2 L'éclatement	25
I.5.1.3 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	25
I.5.1.4 Paramètres influençant sur l'instabilité thermique	26
I.5.1.5 Moyens préventifs contre l'éclatement	27
<b>I.6. Principales méthodes non destructives du béton à haute température</b>	28
<b>I.6.1 Introduction</b>	28
<b>I.6.2 Inspections visuelles</b>	28

<b>I.6.3 Rebond (marteau de rebondissement de Schmidt)</b>	30
I.6.3.1 Mode opératoire d'utilisation pour un béton chauffé	31
I.6.3.2 Facteurs influençant l'essai au scléromètre	32
I.6.3.3 Corrélation entre la résistance et le Rebond	34
<b>I.6.4 Les ultrasons ou couramment nommée UPV</b>	35
I.6.4.1 méthodologie de mesurage	36
I.6.4.2 Facteurs affectant la vitesse ultrasonore	36
I.6.4.3 Modèles de corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonore	39
<b>I.6.5 L'analyse de régression et corrélation</b>	40
I.6.5.1 Définition du coefficient de corrélation linéaire	41
<b>I.7 Conclusion</b>	41

---

**CHAPITRE II**  
**MATERIAUX ET PROTOCOLES D'ESSAIS**

---

<b>II.1 Introduction</b>	44
<b>II.2 Programme expérimental</b>	44
<b>II.3 Caractéristiques des matériaux</b>	45
II.2.1 Ciment	45
II.2.2 Granulats	45
II.2.3 L'adjuvant	46
II.2.4 Les fibres	47
II.2.4.1 Les fibres métalliques	47
II.2.4.2 Les fibres polypropylène	47
II.2.4.3 Les fibres de carbone	47
II.2.5 L'eau	48
<b>II.3 Formulations</b>	48
<b>II.4 Fabrication et conservation des éprouvettes</b>	52
II.4.1 Fabrication et mise en œuvre	52
II.4.2 Conservation	52
<b>II.5 Dispositif expérimental</b>	53
II.5.1 Cycle de chauffage – refroidissement	53
II.5.2 Dispositif de chauffage	54
<b>II.6 Mesure des propriétés mécaniques</b>	54
II.6.1 Essais mécaniques	54
II.6.2 Essai de compression	55
II.6.3 Essai de flexion	55



<b>II.7 Mesure des propriétés physiques</b>	56
II.7.1 Perte de masse	56
II.7.2 Porosité accessible à l'eau	57
<b>II.8 Mesure par essais non destructifs</b>	58
II.8.1 Vitesse de propagation des impulsions des ultrasons	58
II.8.2 Dureté de la surface	59
II.8.3 Analyse par traitement d'images	59
II.8.4 Les observations des fissures au microscope optique	60
<b>II.9 Microscope électronique à balayage (MEB)</b>	61
<b>II.10 Conclusion</b>	62

---

**CHAPITRE III**

**PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS DU COMPORTEMENT DES BETONS AVEC  
DIFFERENTS TYPES DE FIBRES SOUMIS A HAUTE TEMPERATURE**

---

<b>III.1 Introduction</b>	64
<b>III.2 Caractérisation du comportement des bétons sans fibres et les bétons avec des fibres métalliques</b>	64
<b>III.2.1 Mesures des propriétés mécaniques</b>	64
III.2.1.1 Résistance en compression	64
III.2.1.2 Résistance en flexion	66
<b>III.2.2 Mesure des propriétés physiques</b>	67
III.2.2.1 Perte de masse	67
III.2.2.2 La porosité à l'eau	69
<b>III.2.3 Mesures par essais non destructifs</b>	70
III.2.3.1 Indice de rebondissement	70
III.2.3.2 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons	72
<b>III.2.4 Les corrélations</b>	73
III.2.4.1 Relation de corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement	73
III.2.4.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse ultrasonore	74
<b>III.3 Caractérisation du comportement de bétons haute performance avec des fibres polypropylène et de bétons haute performance avec fibres de carbone</b>	75
<b>III.3.1 Introduction</b>	75
<b>III.3.2 Caractérisation des fibres polypropylène et des fibres de carbone en</b>	75

<b>fonction de température</b>	
<b>III.3.3 Mesures des propriétés mécaniques des bétons</b>	78
III.3.3.1 Résistance en compression	78
III.3.3.2 Résistance en flexion	81
<b>III.3.4 Mesure des propriétés physiques</b>	82
III.3.4.1 Perte de masse	82
III.3.4.2 La porosité à l'eau	84
<b>III.3.5 Mesure par essais non destructifs</b>	86
III.3.5.1 Indice de rebondissement	86
III.3.5.2 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons	88
<b>III.3.6 Les Corrélations</b>	89
III.3.6.1 Relation de corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement	89
III.3.6.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse des impulsions	90
<b>III.4 Conclusion</b>	91

---

**CHAPITRE IV**

**ANALYSE ET COMPARAISON DES RESULTATS DU COMPORTEMENT DES BETONS HAUTE PERFORMANCE AVEC MELANGE DE FIBRES SOUMIS A HAUTE TEMPERATURE**

---

<b>IV.1 Introduction</b>	94
<b>IV.2 Mesures des propriétés mécaniques</b>	94
IV.2.1 Résistance en compression	94
IV.2.2 Résistance en flexion	96
<b>IV.3 Mesure des propriétés physiques</b>	97
IV.3.1 Perte de masse	97
IV.3.1 La porosité	98
<b>IV.4 Mesure par essais non destructifs</b>	99
IV.4.1 Indice de rebondissement	99
IV.4.2 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons	99
<b>IV.5 Les Corrélations</b>	100
IV.5.1 Relation de corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement	100
IV.5.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse des impulsions	101

<b>IV.6 Observation de la dégradation des bétons</b>	101
IV.6.1 Les observations visuelles	102
IV.6.2 Observation au microscope optique des fissures	105
IV.6.3 Traitement d'image pour déterminer la densité des fissures et longueurs	108
IV.6.4 Observations au Microscope Électronique à Balayage	111
<b>IV.7 Conclusion</b>	114
<i>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</i>	116
<i>REFERENCES</i>	121

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Evolution des composantes du ciment sous l'échauffement	06
<b>Figure I.2</b>	Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux)	07
<b>Figure I.3</b>	Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons	09
<b>Figure I.4</b>	Evolution de la perte de masse des bétons C3 (BHP ou E/C=0,35) , C2 (béton ordinaire E/C= 0,45) et CS3 des bétons de fibres métalliques et CS2 des bétons de fibres de métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	10
<b>Figure I.5</b>	Perte de masse de béton (C) et avec mélange de 0,75 Kg de fibres de polypropylène et 60 Kg de fibres métalliques (CPPS 0,75-60) et béton avec fibres métallique 60kg (CS60) en fonction de la température	10
<b>Figure I.6</b>	a) Evolution de la porosité absolue des bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement b) Evolution de la porosité absolue des bétons avec les fibres de métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	11
<b>Figure I.7</b>	Evolution de la porosité relative des bétons de cocktail de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.	12
<b>Figure I.8</b>	Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la température	12
<b>Figure I.9</b>	Influence des fibres de polypropylène sur la perméabilité des BO et BHP avec différents proportions de fibres polypropylènes.	13
<b>Figure I.10</b>	Evolution de la résistance en compression pour béton avec divers teneurs en fibres de polypropylène.	14
<b>Figure I.11</b>	Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.	15
<b>Figure I.12</b>	Résistance relatives à la compression de béton HSC exposés à des différentes températures (C, S, and P représente fibres carbone, métallique, and polypropylène respectivement [Chen et al, 2004].	16
<b>Figure I.13</b>	Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène décrite par plusieurs auteurs.	16
<b>Figure I.14</b>	Evolution de la résistance résiduelle en traction des bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température.	17
<b>Figure I.15</b>	Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques.	18
<b>Figure I.16</b>	Evolution de la résistance relative en traction à chaud de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques.	19
<b>Figure I.17</b>	Evolution de résistance en traction résiduelle des différents types de béton contenant des fibres polypropylène, métallique et carbone avec la température.	19
<b>Figure I.18</b>	Evolution avec la température du module d'élasticité relatif d'un béton sans fibres en fonction de E/C.	20
<b>Figure I.19</b>	Evolution du module d'élasticité relatif des bétons C3 (E/C=0,3) pour différentes teneurs en fibres polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	21
<b>Figure I.20</b>	Evolution du module d'élasticité relatif de bétons avec plusieurs teneur de fibres métalliques teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique [Suhaendi 2006], [Cheng 2004] et du dosage en fibres de polypropylène [pilya 2010]	21
<b>Figure I.21</b>	Evolution du module d'élasticité résiduel des bétons Créf(C) et CPPS 0,75-60 en	22

	fonction de la température du cycle de chauffage-	
<b>Figure I.22</b>	Conductivité thermique du béton en fonction de la température.	23
<b>Figure I.23</b>	Influence des types de granulats sur la chaleur massique de bétons.	24
<b>Figure I.24</b>	Ecaillage du tunnel sous la Manche et tunnel de de Tauern.	24
<b>Figure I.25</b>	Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc.	24
<b>Figure I.26</b>	a) Écaillage par dilatation thermique gênée. b) Écaillage par pressions internes	26
<b>Figure I.27</b>	Montre l'effet bénéfique des fibres polypropylènes dans le béton.	27
<b>Figure I.28</b>	Eprouvettes cylindriques après chauffage à 10°C/min jusqu'à 600°C pour a) béton sans fibres b) béton avec 60 Kg de fibres métalliques c) béton avec un cocktail 0,75kg fibres polypropylènes et 60 Kg de fibres métalliques.	27
<b>Figure I.29</b>	Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons avec des différents types de granulats après les cycles de chauffage de 400°C, 600°C et 900°C.	30
<b>Figure I.30</b>	Schéma d'un scléromètre	31
<b>Figure I.31</b>	Schéma d'implantation des mesures par scléromètre.	32
<b>Figure I.32</b>	Valeur de rebondissement relative et résiduelle (R) pour béton avec différents mode de refroidissement en fonction de la température	33
<b>Figure I.33</b>	les valeurs de rebondissement de scléromètre pour éprouvettes (100×100×100) mm de béton exposées à hautes températures.	34
<b>Figure I.34</b>	Appareil à ultrason Tico.	35
<b>Figure I.35</b>	Configurations des transducteurs pour la mesure de la vitesse ultrasonore.	36
<b>Figure I.36</b>	relation entre la résistance en compression et la vitesse de l'impulsion $f_{cT}$ ( $V_T$ ) de béton exposée à des hautes températures.	37
<b>Figure I.37</b>	Evolution Effet de la température sur la vitesse de l'impulsion pour béton confectionnée ave deux types de granulats B1-GO granulats calcaire et B1-BC granulats briques concassée.	38
<b>Figure I.38</b>	Densité de fissuration en fonction de la température de chauffage.	38

## *Chapitre II*

<b>Figure II.1</b>	Aperçu des granulats utilisés.	45
<b>Figure II.2</b>	Courbes granulométriques du sable, gravillon, gravier.	46
<b>Figure II.3</b>	Adjuvant Sikaviscocrete Tempo 12.	46
<b>Figure II.4</b>	Fibres métalliques.	47
<b>Figure II.5</b>	Fibres de polypropylène	47
<b>Figure II.6</b>	Fibres de carbone.	47
<b>Figure II. 7</b>	Endommagement de la surface chauffée à 750° du béton : a) béton ordinaire b) béton à haute performance	49
<b>Figure II.8</b>	Procédure de mixage de béton utilisé.	52
<b>Figure II.9</b>	a)Mélange des constituants b) Remplissage des moules c) Conservation des moules	52
<b>Figure II.10</b>	Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 10°C/min) et courbe ISO 834	53
<b>Figure II.11</b>	a)Position des éprouvettes dans les deux fours b) l'étuve utilisée dans notre étude	54
<b>Figure II.12</b>	Mise en place des éprouvettes sur presse hydrauliques (La résistance en compression).	55
<b>Figure II.13</b>	Machine d'essai de flexion.	56
<b>Figure II.14</b>	(a) Balance a une capacité de 10 kg et une précision de 1 g (b) Balance d'une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g .	57
<b>Figure II.15</b>	Echantillons utilisés pour la détermination de la porosité à l'eau.	58
<b>Figure II.16</b>	Ultrason de PUNDIT.	58

<b>Figure II.17</b>	Le Scléromètre.	59
<b>Figure II.18</b>	Densité de fissuration (BO 1050 °C) .	60
<b>Figure II.19</b>	Microscope optique Magnit 24x MPB-2.	60
<b>Figure II.20</b>	Les différents résultats de l'interaction du faisceau d'électrons avec les atomes de l'échantillon	61
<b>Figure II.21</b>	Etape de métallisation a) et microscope électronique à balayage Tescan VEGA	62

### *Chapitre III*

<b>Figure III.1</b>	Evolution de la résistance résiduelle en compression des bétons sans fibres et des bétons avec des fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	65
<b>Figure III.2</b>	Evolution de la résistance relative en compression des bétons sans fibres et des bétons avec des fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	65
<b>Figure III.3</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en flexion des bétons sans fibres B, B1 et B2 et le béton avec des fibres métalliques BM15 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	66
<b>Figure III.4</b>	L'état des éprouvettes après essai de flexion	67
<b>Figure III.5</b>	Evolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement pour (a) des bétons à haute performance sans fibres B et avec des fibres métalliques BM15, BM19.5 et BM39 (b) le béton sans fibres B1 et B2 et les bétons avec des fibres métalliques B1M15, B1M19.5 et B1M39	68
<b>Figure III.6</b>	Evolution de la perte de masse moyenne des bétons sans fibres et avec des fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	68
<b>Figure III.7</b>	(a) Evolution de la porosité absolue des bétons sans fibres et avec des fibres métallique (E/C=0,35) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement (b) Evolution de la porosité absolue des bétons sans fibres et avec des fibres métallique (E/C=0,45) en Fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	69
<b>Figure III.8</b>	Evolution de la porosité absolue des bétons sans fibres et avec des fibres métallique en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	69
<b>Figure III.9</b>	Evolution d'indice de rebondissement (a) résiduel et (b) relatif (RN/RN20°) pour le béton sans fibres B et les bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.35) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	70
<b>Figure III.10</b>	Evolution d'indice de rebondissement (a) résiduel (b) relatif des bétons sans fibres et avec des fibres métallique E/C=0.35 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	70
<b>Figure III.11</b>	Evolution d'indice de rebondissement résiduel des bétons sans fibres et avec des fibres métalliques pour E/C=0.35	71
<b>Figure III.12</b>	Evolution d'indice de rebondissement résiduel des bétons sans fibres (E/C=0.35, E/C=0,65) et les bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.45).	71
<b>Figure III.13</b>	(a) Evolution de la vitesse des ondes soniques de béton sans fibres et les bétons avec des fibres métalliques (E/C=0..35) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. (b) Evolution de la vitesse des ondes soniques de béton sans fibres (E/C=0.45 et 0.65) et les bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.45) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	72
<b>Figure III.14</b>	Evolution de la vitesse des ondes soniques relative de béton sans fibres (E/C=0.45 et 0.65) et les bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.45) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	73
<b>Figure III.15</b>	Corrélation entre indice scléromètre RNT et résistance compression FcT. (a) béton sans fibres (E/C=0.35, 0.45 et 0.65) et pour béton avec des fibres métalliques (E/C=0.35 et 0.45) (b) béton sans fibres (E/C=0.35, 0.45 et 0.65) et pour béton	73

	avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$ et $0.45$ )	
<b>Figure III.16</b>	Corrélation entre la vitesse des ondes soniques et résistance compression $F_cT$ . (a) béton sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$ et $0.65$ ) et pour béton avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$ et $0.45$ ) (b) béton sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$ et $0.65$ ) et pour béton avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$ et $0.45$ )	74
<b>Figure III.17</b>	(a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle à la température $200^{\circ}C$	76
<b>Figure III.18</b>	(a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle à la température $300^{\circ}C$ .	76
<b>Figure III.19</b>	(a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle à la température $400^{\circ}C$ .	77
<b>Figure III.20</b>	(a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle à la température $600^{\circ}C$ .	77
<b>Figure III.21</b>	Perte de masse des fibres en fonction de température.	77
<b>Figure III.22</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons sans fibres B et les bétons avec fibres polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	78
<b>Figure III.23</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons avec fibres carbone en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	79
<b>Figure III.24</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression de bétons sans et avec différents types de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	80
<b>Figure III.25</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en flexion de bétons sans et avec différents types de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	81
<b>Figure III.26</b>	Évolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement de différents types de béton	82
<b>Figure III.27</b>	Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons (a) Béton avec différents proportions de fibres polypropylènes (b) Béton avec différents proportions de fibres métalliques (c) Béton avec différents proportions de fibres carbonées	83
<b>Figure III.28</b>	Évolution de la porosité résiduelle et relative des bétons avec différentes proportions de fibres polypropylènes en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	84
<b>Figure III.29</b>	Évolution de la porosité résiduelle et relative en fonction de la température pour les bétons avec différents proportions de fibres de carbone en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	85
<b>Figure III.30</b>	Évolution de la porosité à l'eau en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement de différents types de béton.	85
<b>Figure III.31</b>	Evolution d'indice de rebondissement résiduel et relative ( $RNT/RN20^{\circ}C$ ) pour le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	86
<b>Figure III.32</b>	Evolution d'indice de rebondissement résiduel et relative ( $RN/RN20^{\circ}$ ) pour le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	86
<b>Figure III.33</b>	Evolution d'indice de rebondissement résiduel en fonction le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différents températures du cycle de chauffage-refroidissement	87
<b>Figure III.34</b>	Evolution d'indice de rebondissement relative ( $RN/RN20^{\circ}$ ) en fonction le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différents températures du cycle de chauffage-refroidissement	87

<b>Figure III.35</b>	a) Evolution de la vitesse des impulsions résiduelle en fonction le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différents températures du cycle de chauffage-refroidissement b) classification de dégradation selon [LCPC, 2005].	88
<b>Figure III.36</b>	Evolution de la vitesse des impulsions relatives en fonction le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différents températures du cycle de chauffage-refroidissement	88
<b>Figure III.37</b>	Profil des dégradations cartographie selon les vitesses des impulsions.	89
<b>Figure III.38</b>	Corrélation entre résistance compression $F_{cT}$ et indice scléromètre $R_{NT}$ pour chaque béton séparément : béton avec fibres métalliques, béton sans fibres, béton avec des fibres de carbone et béton avec fibres polypropylène.	89
<b>Figure III.39</b>	Corrélation entre résistance compression $F_{cT}$ et indice scléromètre $R_{NT}$ pour chaque béton séparément : Tous les types des bétons	90
<b>Figure III.40</b>	Corrélation entre la résistance en compression $F_{cT}$ et la vitesse des impulsions UPV pour chaque béton séparément : béton avec fibres métalliques, béton sans fibres, béton avec des fibres de carbone et béton avec fibres polypropylène.	90
<b>Figure III.41</b>	Corrélation entre la résistance en compression $F_{cT}$ et la vitesse des impulsions UPV pour chaque béton séparément : Tous les types des bétons	91

### *Chapitre IV*

<b>Figure IV.1</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons sans fibres B et des bétons des fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement	95
<b>Figure IV.2</b>	Evolution de la résistance résiduelle et relative en flexion des bétons sans fibres B et des bétons des fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.	96
<b>Figure IV.3</b>	Des éprouvettes des bétons avec 1) fibres métallique 2) mélange fibres métallique et carbone 2) fibre de carbone après essai de flexion	97
<b>Figure IV.4</b>	. Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les différents bétons.	97
<b>Figure IV.5</b>	Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b) de bétons de mélange de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.	98
<b>Figure IV.6</b>	Évolution de l'indice de rebondissement absolu et relative en fonction de la température pour les différents bétons	99
<b>Figure IV.7</b>	Évolution de la vitesse des impulsions absolues (a) et relative (b) en fonction de la température pour les différents bétons.	99
<b>Figure IV.8</b>	a) Corrélation entre résistance compression $F_{cT}$ et indice scléromètre $R_{NT}$ pour chaque béton séparément. b) Corrélation entre résistance compression $F_{cT}$ et indice scléromètre $R_{NT}$ pour tous les types des bétons rassemblées.	100
<b>Figure IV.9</b>	a) Corrélation entre la résistance en compression $F_{cT}$ et la vitesse des impulsions UPV pour chaque béton séparément b) Corrélation entre la résistance en compression $F_{cT}$ et la vitesse des impulsions UPV pour tous les types des bétons assemblées	101
<b>Figure IV.10</b>	Observation visuel de béton sans fibres à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C et 400°C, et 600°C	102
<b>Figure IV.11</b>	Observation visuel de béton de fibres métalliques à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C et 300°C, et 600°C	103
<b>Figure IV.12</b>	Observation visuel de béton de fibres polypropylène à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C et 300°C, 400°C et 600°C	103
<b>Figure IV.13</b>	Observation visuel de béton de fibres carbone C2 à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 600°C	104
<b>Figure IV.14</b>	Observation visuel de béton de mélange de fibres à la température après les cycles de chauffage-refroidissement à 600°C	104



<b>Figure IV.15</b>	Observation visuel de béton après essais d'écrasement des éprouvette pour béton de fibres polypropylène, béton de fibres métalliques , béton de fibres de carbone et béton sans fibres après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C	105
<b>Figure IV.16</b>	Observation microscope optique de béton de fibres mélange fibres métalliques et fibres de carbone chauffé à 200°C, 400°C et 600°C	105
<b>Figure IV.17</b>	Observation microscope optique de béton de fibres mélange polypropylène et carbone chauffé à 400°C et 600°C	106
<b>Figure IV.18</b>	Observation microscope optique de béton de fibres carbone chauffé à 400°C et 600°C	106
<b>Figure IV.19</b>	Observation microscope optique de béton de fibres métalliques chauffé à 200, 400°C et 600°C	107
<b>Figure IV.20</b>	Observation microscope optique de béton de fibres polypropylène chauffé à 400°C et 600°C	107
<b>Figure IV. 21</b>	Observation microscope optique de béton sans fibres chauffé à 400°C et 600°C	107
<b>Figure IV.22</b>	fissurations après chauffage de 600°C	109
<b>Figure IV.23</b>	les valeurs statistiques de l'aire totale des fissures pour chaque formulation de béton de fibres à 600°C.	110
<b>Figure IV.24</b>	Développement des fissures à la surface autour des pores des éprouvettes en béton après traitement thermique à 600	111
<b>Figure IV.25</b>	Observations au MEB d'échantillons de BPC chauffés à 200C,300°C,400°C, et 600°C.	113
<b>Figure IV.26</b>	Observations au MEB et EDX d'échantillons de BPC chauffés à 600°C.	114

## Liste des tableaux

### *Chapitre I*

<b>Tableau I.1</b>	Processus de décomposition de la pâte de ciment en fonction de la température	06
<b>Tableau I.2</b>	changement de couleur de béton exposée à des hautes températures avec deux types de granulats siliceux et calcaire.	29
<b>Tableau I.3</b>	Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression $F$ (MPa) (ou d'autres paramètres) et l'indice de rebondissement RN conçu que pour béton à des températures élevées.	34
<b>Tableau I.4</b>	Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion	36
<b>Tableau I.5</b>	Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression « $f_c$ (MPa)» et vitesse ultrasonore « $V$ (km/s, m/s)» pour béton exposées à des hautes températures.	39
<b>Tableau I.6</b>	Nombre des modèles existants pour estimer la résistance du béton.	40

### *Chapitre II*

<b>Tableau II.1</b>	Composition chimiques et caractéristique physico-mécaniques du ciment.	45
<b>Tableau II.2</b>	Propriétés physique des graviers.	45
<b>Tableau II.3</b>	Caractéristique de l'adjuvant.	46
<b>Tableau II.4</b>	Caractéristiques des fibres de métalliques	47
<b>Tableau II.5</b>	Caractéristiques des fibres de polypropylène.	47
<b>Tableau II.6</b>	Caractéristiques des fibres de carbone.	47
<b>Tableau II.7</b>	La composition des bétons sans fibres en $1\text{m}^3$ .	50
<b>Tableau II.8</b>	La composition des bétons de fibres métalliques en $1\text{m}^3$ .	50
<b>Tableau II.9</b>	regroupe la composition des bétons de différents types de fibres en $1\text{m}^3$ .	50
<b>Tableau II.10</b>	Programme expérimentale	51

### *Chapitre IV*

<b>Tableau IV.1.</b>	Largeurs et densité des macro-fissures après chauffage à 400 et 600°C.	109
----------------------	--	-----

## 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>	f <sub>c20</sub> Résistance en compression à la température ambiante
f <sub>cT</sub>	Résistance résiduelle en compression après un cycle de chauffage
f <sub>t</sub>	Résistance en traction
f <sub>t20</sub>	f <sub>c20</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
UPV	(ultrasonique pulse velocity
PUNDIT	Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating. Tester
L	est la 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	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
BC	Béton contenant les fibres carbone
BMP	Béton contenant un mélange de fibres de polypropylène et métalliques
BPC	Béton contenant un mélange de fibres de polypropylène et carbone
BMC	Béton contenant un mélange de fibres métalliques et carbone

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment. La prise en compte du comportement du béton soumis à des températures élevées est apparue dernièrement comme un problème majeur. Soumis à des températures élevées le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température et se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant toute la durée de l'échauffement. Sous l'effet d'un incendie, le béton perd ses caractéristiques mécaniques et physiques. L'évaluation des caractéristiques mécaniques du béton après incendie constitue une exploration indispensable pour la réparation. L'évaluation de l'étendue des dégradations du béton et des besoins en réparation et renforcement de la structure après l'incendie est indispensable. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans ce but et plus particulièrement les méthodes non destructives.

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit a deux objectifs le premier est d'améliorer la compréhension du comportement des bétons ordinaire exposés à de hautes températures et le béton à haute performance avec des différents types de fibres (métalliques, polypropylène, carbone et la combinaison entre plusieurs types de fibres). Puisque plusieurs travaux de recherche ont montré qu'une des solutions vis-à-vis de l'écaillage est l'incorporation de fibres de polypropylène dans le béton. Par ailleurs, l'incorporation de fibres métalliques et de fibres de carbone est proposée comme une solution efficace pour améliorer les performances mécaniques résiduelles des bétons. L'enjeu de ces travaux est de comprendre l'interaction entre les différentes natures de fibres, et comparer les comportements des différents bétons confectionnés avec ces différents types de fibres et le mélange des fibres polypropylène et métallique ainsi un autre mélange polypropylène et fibres de carbone et le mélange fibre métallique et fibre de carbone.

Le deuxième objectif a été d'utiliser des essais non destructifs afin d'évaluer l'endommagement du béton exposé à haute températures. Afin d'évaluer les dégradations des bétons endommagés par l'élévation de la température, on utilise le scléromètre qui est un matériel léger et sa mise en œuvre est rapide et simple, l'ultrason qui est un matériel plus sophistiqué et une plus grande expérience dans la pratique de la mesure et dans l'interprétation de ses résultats. Pour cela, l'investigation des propriétés du béton à hautes températures a été faite par des méthodes destructives et non destructives. L'évaluation des propriétés du béton se fait alors sur la base de relations empiriques entre les valeurs des mesures par essai ultrason et scléromètre et les résultats obtenus par les essais destructifs.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres

**Le premier chapitre** est une analyse bibliographique de différents travaux de recherche sur le béton soumis à une température élevée. Dans la première partie une synthèse est faite sur le comportement de la matrice cimentaire, des granulats et la dégradation de l'interface pâte - granulats. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et fibres de carbone et d'un mélange de l'un des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffée. Ce chapitre porte sur les différentes formes d'instabilité thermique, le mécanisme d'écaillage ou d'éclatement et les paramètres favorisant l'instabilité thermique. Enfin nous avons présenté les essais non destructifs en s'intéressant à la présentation de trois méthodes: l'inspection visuelle, mesure de dureté superficielle au scléromètre et l'auscultation sonique qui sont utilisées dans notre étude afin d'aboutir à des corrélations entre des essais destructifs et non destructifs.

**Le second chapitre** décrira les différents processus expérimentaux utilisés pour déterminer les différentes caractéristiques des matériaux et matériels utilisés. Nous présentons les caractéristiques des matériaux, les compositions des différents bétons d'étude avec le dosage et les caractéristiques des constituants utilisés. Le mode d'élaboration et de conservation de ces bétons ainsi que les différents essais de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques, avant et après sollicitation thermique, sont également présentés.

**Le troisième chapitre** regroupe les résultats et interprétation des différents essais effectués sur les bétons sans fibres et avec des fibres. Pour les différents rapports E/C, la différence de température, la différence de type de fibres, les propriétés mécaniques et physiques en fonction de la température de chauffage sont étudiées, l'ensembles des résultats obtenus sont présentés, interprétés et confrontés avec des travaux antérieurs.

**Le quatrième chapitre** regroupe les résultats et interprétation des différents essais effectués sur les bétons avec mélange de fibres, l'ensemble des résultats obtenus sont comparés au béton sans fibres, au béton de fibres de polypropylène, au béton de fibres métalliques et à ceux contenant les fibres de carbone.

Pour finir, ce travail s'achève par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats obtenus et des perspectives finalisent ce mémoire de thèse.

*CHAPITRE I*  
*ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE*

## **I.1 Introduction**

La connaissance du comportement du béton soumis à de hautes températures constitue un enjeu de grand intérêt pour les applications du génie nucléaire et pour l'évaluation de la sécurité dans des constructions de génie civil.

Ce chapitre est structuré en trois parties; la première porte sur les principales modifications physico-chimiques subies par des composants du béton (la matrice cimentaire et les granulats). La deuxième partie est consacrée à l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et des fibres de carbone et le mélange de l'une des deux fibres utilisées sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton exposé à des hautes températures. Elles sont incorporées au béton et ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du béton. Dans certains cas, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure. En général, les fibres permettent une meilleure répartition des contraintes mécaniques. Dans le cas du béton chauffé l'addition de fibres de polypropylène est considérée comme la principale solution pour éviter le phénomène d'éclatement ou l'écaillage qui sera présenté aussi, les fibres métalliques et les fibres de carbone sont utilisées pour augmenter la résistance résiduelle du béton. Les fibres de carbone possèdent un ensemble de propriétés physiques ou mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans certaines applications liées au bâtiment et aux ouvrages de génie civil. Bien qu'il faut signaler qu'il y a peu d'étude sur le comportement du béton avec des fibres de carbone exposées à des hautes températures. La dernière partie consiste à donner un aperçu sur les méthodes non destructives afin d'évaluer la qualité des bétons sinistrés par le feu.

## **I.2 Modifications des propriétés des constituants d'un béton à haute température**

Les modifications subies simultanément par la matrice cimentaire et les granulats engendrent une forte dégradation du béton. Outre les effets directs des modifications de ces deux composants élémentaires, les incompatibilités de comportement de ceux-ci engendrent des dégradations spécifiques au matériau béton.

### **I.2.1 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie**

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différentes transformations physiques et chimiques se produisent. Ces phénomènes concernent : la pâte de ciment et les granulats. La pâte de ciment ou le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions chimiques et de processus d'hydratation. Ce processus conduit à la formation de l'hydrosilicate de calcium (C-S-H), de l'ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ ), de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Le C-S-H confère au ciment hydraté sa résistance.



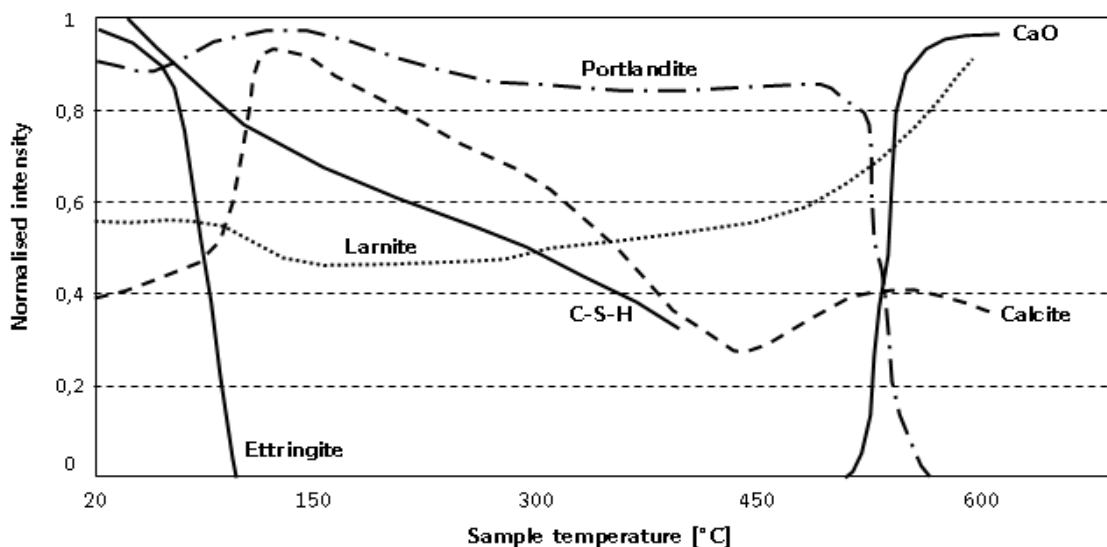
Nous décrivons ici le processus de décomposition de la pâte en fonction de la température [reprise de Razafinjato, 2015].

**Tableau I.1 Processus de décomposition de la pâte de ciment en fonction de la température**

(Noumowe, 1995; Alonso & Fernandez, 2004; Castellote et al, 2004; Alarcon-Ruiz et al 2005; Lee et al., 2009)

Température [C°]	Processus thermo-hydro-chimique dans la pate de ciment
20° à 120°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A partir de 70°C, évaporation de l'eau libre et</li> <li>- A de 80°C, début de déshydratation du gypse et de l'ettringite</li> <li>- L'eau évaporable est complètement éliminée à 120°C</li> <li>- A Partir de 105°C, première phase de déshydratation de C-S-H en permanence jusqu'à 600°C</li> </ul>
120 C à 180°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décomposition de sulfate d'aluminium hydraté (ettringite)</li> <li>- Décomposition de sulfate de calcium hydraté CaSO<sub>4</sub>. 2 heures O<sub>2</sub> ou gypse</li> </ul>
180°C- 300°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déshydratation du gel de C-S-H : molécules d'eau arrachées aux silicates hydratés</li> </ul>
250°C- 400°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décomposition et oxydation des éléments métalliques</li> </ul>
400°C 6 530°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déshydratation de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandite) pour produire de l'oxyde de calcium CaO (chaux)</li> </ul>
530°C à 640°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deuxième phase de Déshydratation des C-S-H qui produit de nouvelles formes de silicates bicalciques β-C<sub>2</sub>S</li> <li>- Décomposition du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub> peu cristallisé</li> </ul>
640°C à 900°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décomposition du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub> : réaction de décarbonations fortement endothermique qui libère du gaz carbonique CO<sub>2</sub></li> </ul>

La technique de la diffraction des neutrons appliqués par [Castellote et al, 2004] ont déterminé les transformations des principaux composants de la pâte de ciment Portland au cours de l'échauffement (Figure I.1).



**Figure I.1** Évolution des composantes du ciment sous l'échauffement [Castellote et al, 2004].

### I.2.2 Évolution des granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

Les granulats en contact avec la pâte de ciment peuvent être soit réactifs ou neutres. Les granulats réactifs (ex: calcaire) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps. Les granulats neutres (siliceux) ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent donc de faibles liaisons.

Les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau.

La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Les analyses thermogravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. La figure I.2 montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux). Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C. Une autre transformation cristalline est présente entre 500 et 650°C. À ces températures, le quartz- $\alpha$  se transforme en quartz- $\beta$  sans changement de masse en revanche cette transformation est accompagnée d'une dilatation significative de l'ordre de 1 à 1,4 %.

Dans le cas des granulats calcaires, la décarbonatation ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) se produit entre 600 et 900°C. En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO) formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique sous forme de  $\text{Ca(OH)}_2$  avec une augmentation de volume de 44%. Ceci cause la fissuration et l'endommagement des structures en béton [Menou,2004].

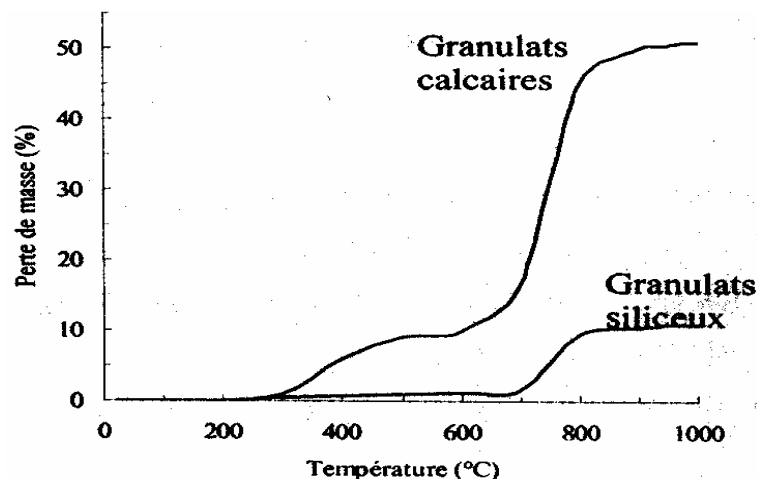


Figure I.2 Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) d'après Harmathy et al [Menou, 2004].

### **I.2.3 Dégradation de l'interface pâte - granulats**

Dans les bétons, l'interface pâte-granulats est la partie la plus fragile, la plus poreuse. L'interface pâte - granulats se dégrade progressivement en montant en température due à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion) [Berest, 1988].

[Laneyrie, 2015], a décrit la dégradation de cette partie influencée par la température:

- De 20° à 500°C : la déformation thermique de la pâte de ciment est supérieure à celle des granulats [Neville, 1993].
- À partir de 120°C environ, la pâte de ciment cesse de se dilater pour commencer à se contracter en raison de la déshydratation des CSH. Selon la teneur en quartz des granulats, leur coefficient de dilatation thermique peut augmenter sensiblement.
- autour de 573°C, température à laquelle intervient la transformation allotropique du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$ . Les travaux de modélisation de [Fu et al, 2004] montrent que l'apparition des fissures radiales est plus importante dans les zones où la distance entre deux granulats est la plus faible. En effet, celles-ci se propageront préférentiellement dans la direction correspondant à la distance la plus courte avec un autre granulats. En revanche, les fissures tangentielles ne sont pas impactées par la distance entre granulats, et on ne peut donc pas supposer qu'un béton avec une proportion volumique de granulats plus faible présentera une meilleure résistance aux températures élevées.

### **I.3 Les propriétés physiques et mécaniques de béton en fonction de la température**

Cette partie est consacrée à l'étude de l'influence des fibres polypropylène, des fibres métalliques, des fibres de carbone et le mélange de l'un des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé.

#### **I.3.1 Les propriétés physiques en fonction de la température**

##### **I.3.1.1 La perte de masse**

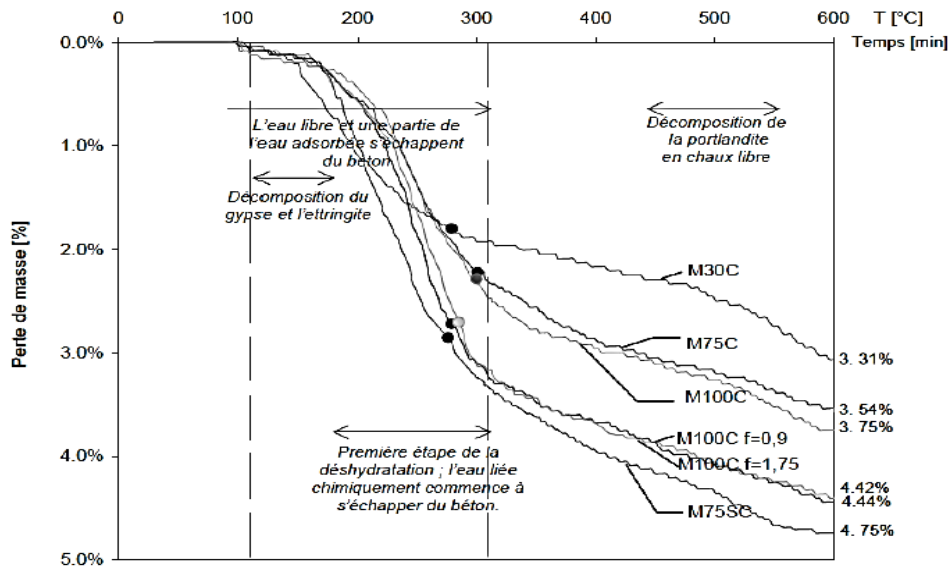
Lors de la montée en température, le béton perd de la masse. Le départ de l'eau est la principale cause de la perte de masse du béton avant 600°C [Kalifa et al, 2001].

La figure I.3 montre les résultats expérimentaux de perte de masse en fonction de la température obtenue par [Hager, 2004]. Généralement, la perte de masse se déroule en trois étapes dans le béton [Xing et al, 2011], [Pliya 2010],[Kanema, 2007],[Xiao et al, 2006],[Hager, 2004],[Phan et al, 2001],[Noumowé, 1995].

– De la température ambiante jusqu'à 100 - 150°C : Faible perte de masse due au départ de l'eau libre contenue dans le béton [Malier, 1992], [Noumowé, 1995].

– Entre 150 et 300°C: Augmentation rapide de la perte de masse due au départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H [Noumowé, 1995], [Hager, 2004]. Selon Kanema à 300°C, le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale.

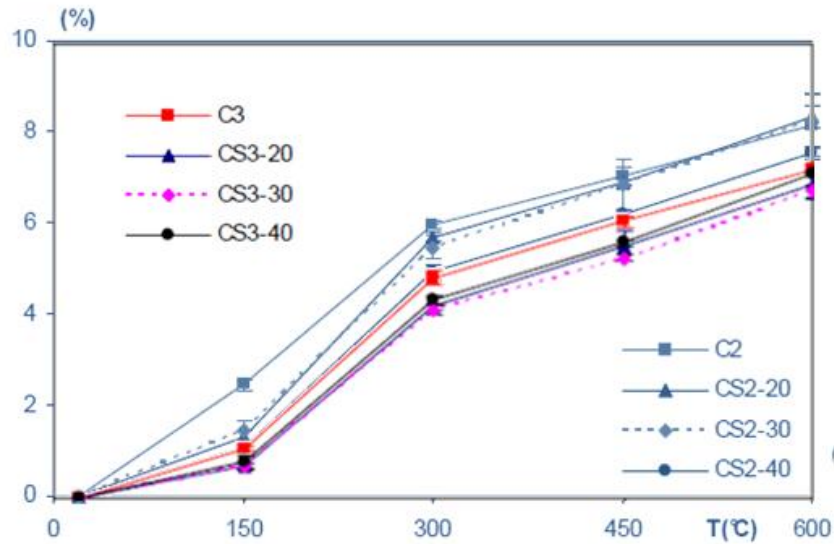
–Au-delà de la température 300°C : Faible perte de masse correspondant à la déshydroxylation de la portlandite (450-550°C), à la décomposition des silanols (SiOH), du silex (400-570°C) [Xing, 2011], et à la décarbonatation du calcaire  $\text{CaCO}_3$  (600-800°C) [Xing et al, 2011], [Xiao et al, 2006], [Khoury, 1992].



**Figure I.3** Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons [Hager, 2004]

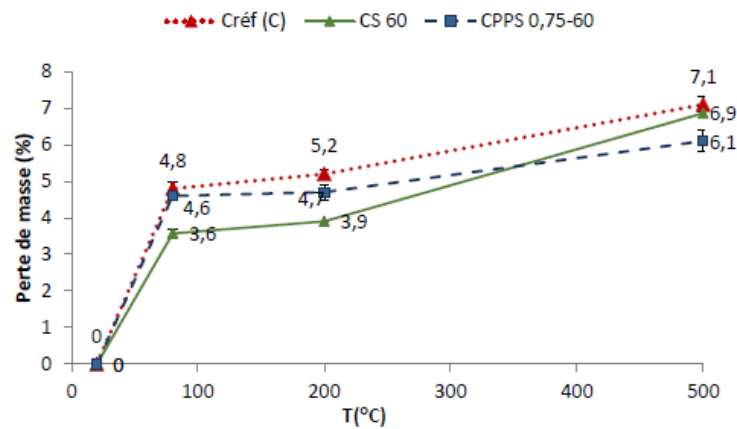
L'ajout des fibres polypropylène dans le béton ne change pas l'évolution de la perte de masse en fonction de la température, [Hager, 2004] a effectué des essais de perte de masse sur trois bétons sans fibres et avec divers dosages en fibres de polypropylène de  $0.9 \text{ kg/m}^3$  et  $1.75 \text{ kg/m}^3$ , la perte de masse du béton sans fibres au chauffage à  $600^\circ\text{C}$  était de 3.75%. Avec les dosages en fibres de polypropylène de  $0.9 \text{ kg/m}^3$  et  $1.75 \text{ kg/m}^3$ , les pertes de masse de ces bétons étaient respectivement de 4.42% et 4.44%. Une augmentation de la cinétique de perte de masse des bétons fibrés avait donc été constatée par l'auteur et d'autres comme [Pilya, 2010] et les trois domaines caractérisant l'évolution de la perte de masse sont également observés.

L'ajout des fibres métalliques dans le béton, [Pilya, 2010] conclut que ces fibres ne modifient pas l'allure de la courbe de la perte de masse du matériau, tout comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène, il a remarqué la présence toujours des trois domaines. Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse est moins que celle du béton sans fibres ou béton.



**Figure I.4** 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 [Pilya, 2010].

Cependant, [Yermak, 2015] a noté que les pertes de masse des bétons *mélange de fibres (fibres de polypropylène et fibres métalliques)* sont inférieures à celles des bétons sans fibres mais supérieures à celles des bétons de fibres métalliques (figure I.5), Ces résultat sont en bonne cohérence avec les travaux de [Pilya, 2010].



**Figure I.5** 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 [Yermak, 2015].

### I 3.1.2 La porosité

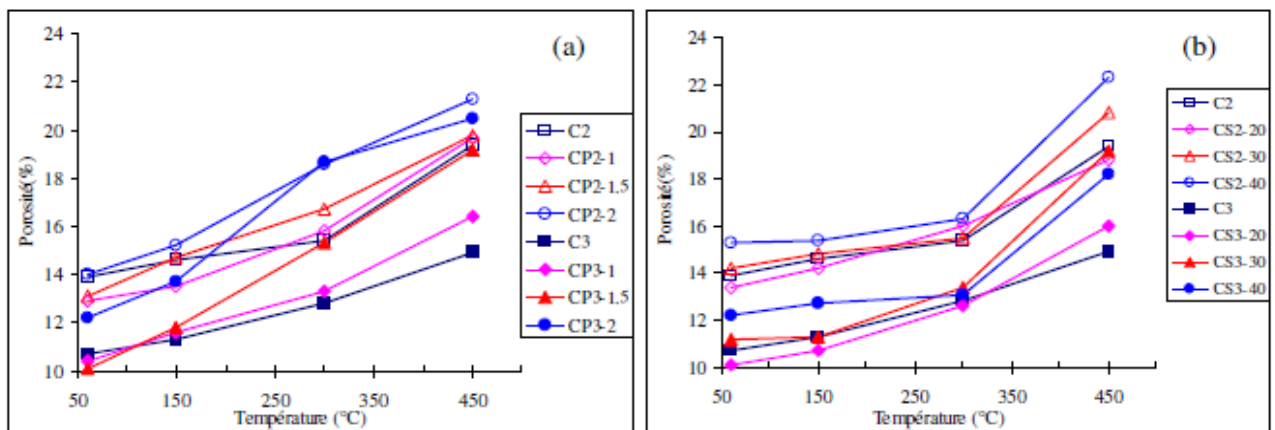
C'est l'un des importants paramètres caractérisant la microstructure des bétons. Celle-ci peut se définir comme les espaces vides d'un matériau qui se présentent entre les phases solides. Quand le béton est soumis à de hautes températures, les changements physiques et chimiques se produisant au sein des phases solides, engendrent des changements dans la porosité totale et également dans la distribution de tailles des pores. La mesure de la porosité à l'eau ou au mercure de bétons chauffés a fait l'objet de plusieurs études. Il est intéressant de noter que les mesures de la porosité à l'eau sont supérieures à celles de la porosité mesurée par intrusion de

mercure. Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec la température pour le béton ordinaire ou le béton à hautes performances en présence ou non de fibres [Yermak, 2015], [Haniche 2011],[Pliya 2010], [Mindeguia 2009], [Hager 2004], [Kalifa et al, 2001],[Noumowé 1995].

Un important travail expérimental concernant l'évolution de la porosité a été réalisé par [Pliya, 2010] sur l'influence de la nature et de la proportion des fibres dans le béton chauffé. Un béton ordinaire C2, un béton à hautes performances C3, trois proportions des fibres de polypropylène (1, 1.5 et 2 kg/m<sup>3</sup>) et trois proportions des fibres métalliques (20, 30, 40 kg/m<sup>3</sup>) sont utilisées dans cette étude. [Pliya, 2010] conclut que :

*L'addition des fibres de polypropylène ne change pas l'allure des courbes de l'évolution de la porosité. Une porosité supplémentaire s'observe avec la présence des fibres. Celle-ci augmente avec le dosage en fibres par rapport aux bétons sans fibres. L'impact des fibres de polypropylène est lié à la composition du béton. Plus le rapport E/C est faible, plus l'endommagement est important. D'autres auteurs ont aussi remarqué que l'addition de fibres de polypropylène favorise une porosité supplémentaire qui évolue avec le dosage en fibres [Noumowé et al, 2002], [Hager 2004], [Mindeguia, 2009], [Haniche 2011].*

*L'addition des fibres métalliques, selon travaux de recherche de [Pliya 2010] la porosité des bétons de fibres métalliques varie peu par rapport aux bétons sans fibres jusqu'à un chauffage à 300°C. L'accroissement rapide de porosité remarqué avec les bétons sans fibres s'observe aussi avec les bétons contenant les fibres métalliques. La porosité des bétons de fibres métalliques augmente plus rapidement que celle des bétons sans fibres. Ce phénomène est lié à l'affaiblissement de la liaison pâte de ciment -fibres consécutive à la déshydratation des C-S-H. De plus, les micropores existants entre fibres et matrice prennent des tailles plus importantes.*



**Figure I.6a)** Évolution de la porosité absolue des bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

**b)** Evolution de la porosité absolue des bétons avec les fibres de métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [Pliya 2010].

Pour un mélange de fibres polypropylène et fibres métalliques la porosité des bétons augmente en fonction de la température. D'après la figure I.7 qui montre les résultats [Pliya 2010] sur l'effet des fibres de cocktail dans les bétons sur la porosité des bétons. Il remarque que le mélange des fibres est influencé par le volume des fibres polypropylène ou contenant  $1 \text{ kg/m}^3$  de fibres de polypropylène croît beaucoup plus vite que celle des bétons contenant  $2 \text{ kg/m}^3$  de fibres de polypropylène. La porosité relative du béton CSP3-40x1 est de 144% tandis que celle du béton CSP3-40x2 est de 111%. La présence des fibres métalliques limite l'apparition de porosité supplémentaire induite par les fibres de polypropylène à  $300^\circ\text{C}$ .

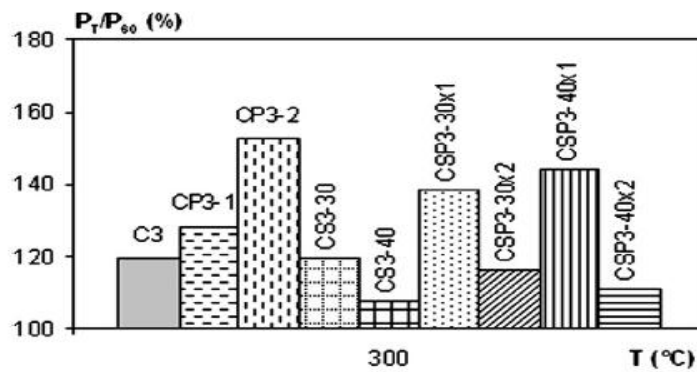


Figure I.7 Évolution de la porosité relative des bétons de cocktail de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement [Pliya 2010].

### I 3.1.3 La perméabilité

La perméabilité du béton caractérise la capacité que possède ce matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression. Les mesures de la perméabilité de bétons tendus ont été souvent réalisées pour caractériser l'interaction entre l'ouverture de fissure et la perméabilité. La perméabilité des bétons a une relation directe à la porosité de la pâte de ciment qui, à son tour dépend du rapport E/C ainsi que du vieillissement du béton [Fares, 2009].

Les auteurs [Haniche, 2011], [Mindeguia,2009], [Kanema,2007] ont remarqué une augmentation de la perméabilité en fonction de la température pour des bétons BO et BHP comme présentées sur la figure I.8.

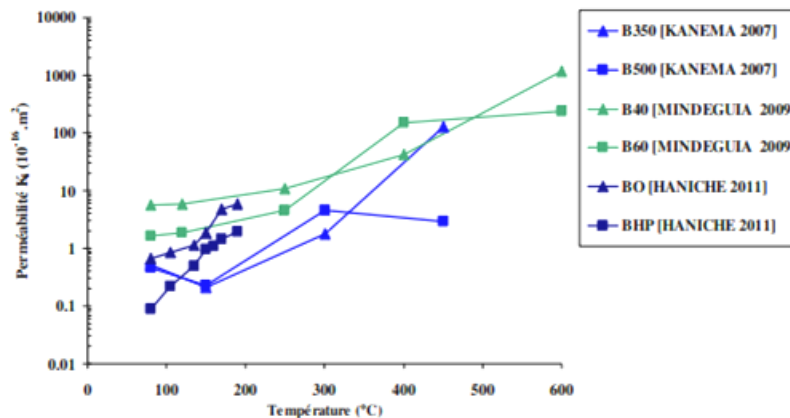
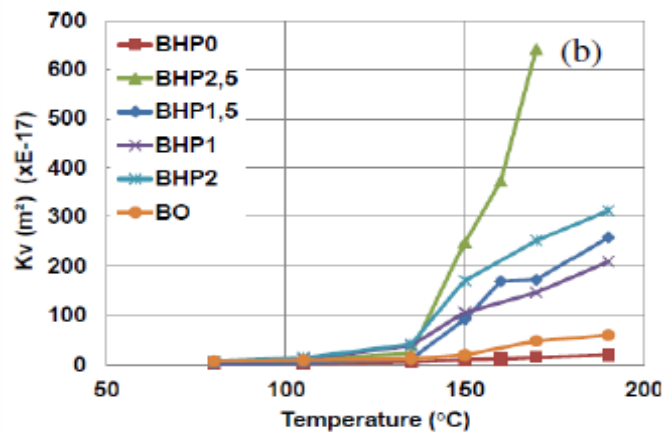


Figure I.8 Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la température [Haniche 2011, Mindeguia 2009, Kanema 2007]].

L'augmentation de la perméabilité est due au départ de l'eau capillaire, à la microfissuration de la matrice liée à la déshydratation des C-S-H et aussi à l'incompatibilité de déformation entre pâte et granulats.

Des résultats expérimentaux de [Haniche 2011] présentés sur la figure I.9 pour des bétons BO et BHP montrent un accroissement très significatif de la perméabilité dans des bétons de fibres de polypropylène à partir d'une température de la fusion de fibre polypropylène ainsi cette fusion et vaporisation génèrent un canal favorisant le transport de flux. La figure I.9 met en évidence l'impact des fibres de polypropylène sur la perméabilité des bétons



**Figure I.9** Influence des fibres de polypropylène sur la perméabilité des BO et BHP avec différents proportions de fibres polypropylènes [Haniche 2011]

### I.3.2 Les propriétés mécaniques du béton chauffé

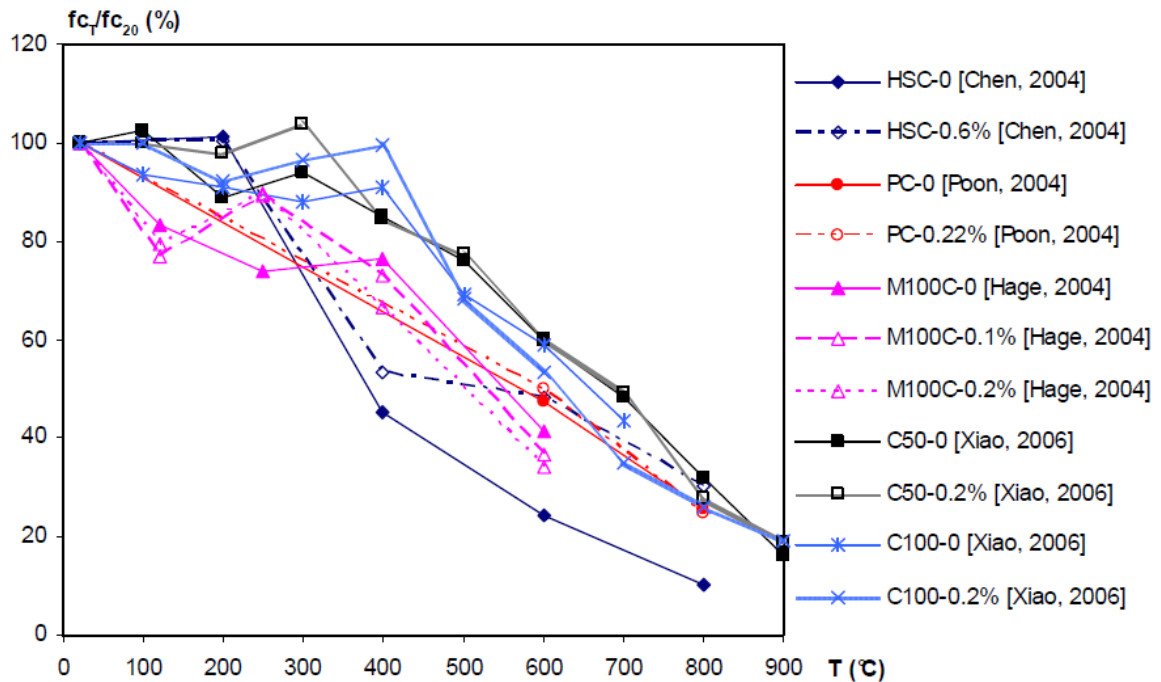
#### I.3.2.1 Résistance en compression

L'essai de résistance à la compression résiduelle, est l'un des essais les plus couramment utilisés pour décrire l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec la température. Il a l'avantage de se pratiquer sur un matériel simple (une presse hydraulique) et ne nécessite pas un personnel qualifié, à la différence de l'essai de compression à chaud. Ce dernier se pratique à la fin du palier de stabilisation de température au cours du cycle thermique. Il est considéré comme étant plus représentatif du comportement du matériau à haute température.

Plusieurs études ont mis en évidence la variation des propriétés mécaniques des bétons en fonction de la température [Nomowé, 1995] [Hager, 2004] [Behnood et al, 2009] et [Pilya, 2010] [Yermak, 2015]. D'une manière générale, les résultats montrent que la baisse de la résistance à la compression est observée au cours du chauffage. La principale raison de la diminution de la résistance est tout d'abord l'évolution de la microstructure à cause de la déshydratation (retrait de la matrice provoqué par la phase de séchage et de déshydratation). Il faut ajouter l'augmentation de la microfissuration et de la porosité, l'influence de la nature de la pâte et des granulats et les déformations différentielles entre la pâte et les granulats [Hager, 2004].

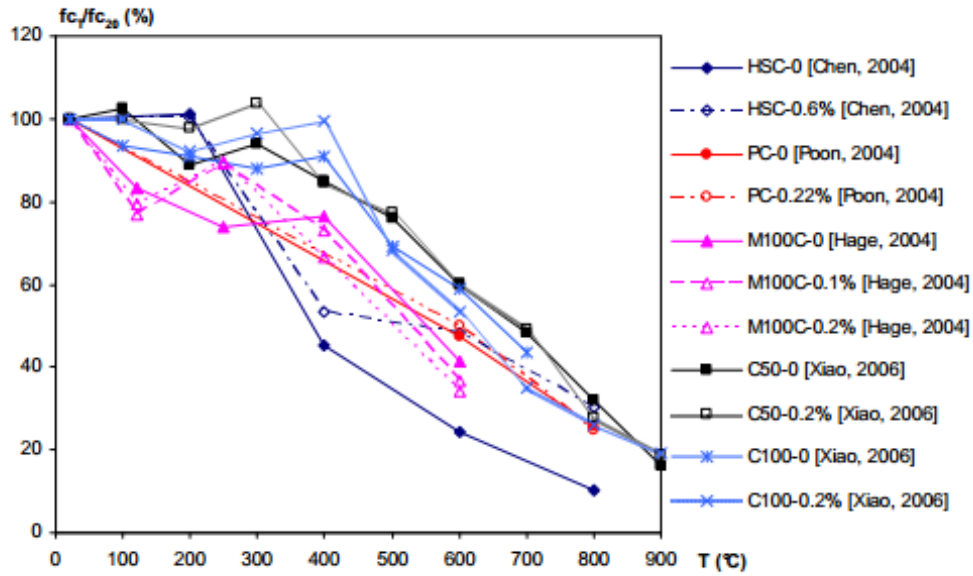


Les fibres de polypropylène dans le béton améliorent sa stabilité thermique et elles sont utilisées comme un moyen de prévention contre l'éclatement du béton. Sur les performances de la résistance en compression, les avis divergent selon les auteurs. Les auteurs comme [Suhaendi et al 2006], [Noumowé, 2005], et [Poon, 2004] ont remarqué une baisse de résistance résiduelle tandis que d'autres [Behnood et al, 2009], [Xiao et al, 2006], [Chen et al, 2004] ont observé le phénomène contraire. Il faut toutefois noter que la teneur hydrique, la vitesse de chauffage ainsi que les conditions expérimentales ne sont pas identiques.



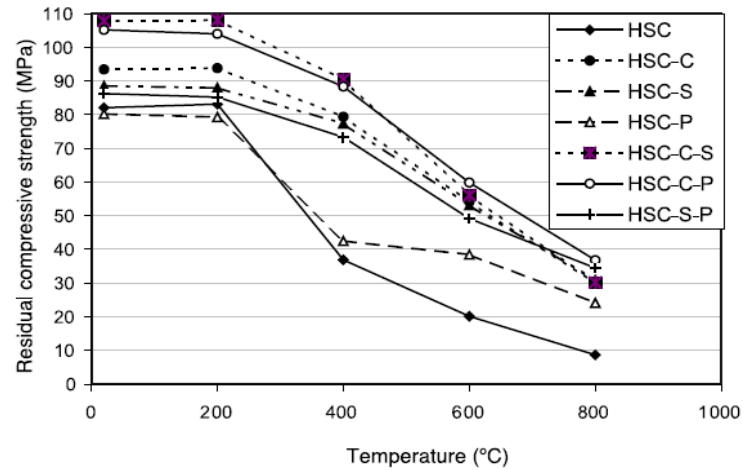
**Figure I.10** Évolution de la résistance en compression pour béton avec divers teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.

Les fibres métalliques sont ajoutées aux bétons pour améliorer sa résistance ainsi que la ténacité, il possède de nombreuses performances supérieures au béton ordinaire, puisqu'il retarde la propagation des microfissures au niveau macroscopique. De façon générale, à travers la littérature les auteurs ont montré que l'addition de fibres métalliques améliore les résistances résiduelles ou à chaud en compression par rapport à celles des bétons non renforcé [Pliya, 2010], [Suhaendi et al, 2006], [Chen et al, 2004], [Poon et al, 2004]. [Hertz, 2003], a conclu que le doublement du volume de fibres n'entraîne pas d'amélioration du comportement résiduel, mais les éprouvettes ayant le plus fort dosage de fibres étaient les plus susceptibles à s'éclater. L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température des bétons de fibres métalliques varie suivant les auteurs. La figure I.11 rassemble les résultats obtenus par différents auteurs.



**Figure I.11** Évolution de la résistance résiduelle relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.

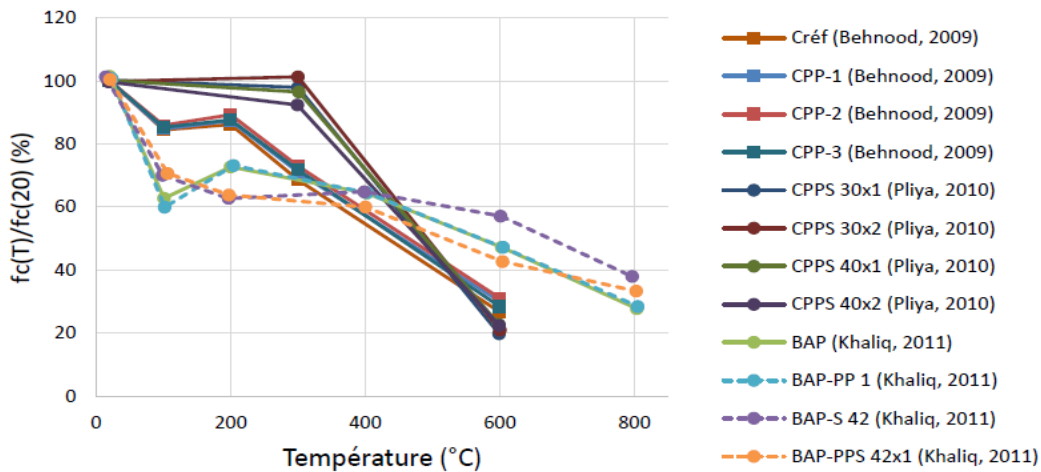
Bien que les fibres métalliques soient les plus utilisées, ces dernières années, des solutions innovantes, obtenues *en combinant différents types de fibres* deviennent de plus en plus communs. De nombreuses études portent sur des mélanges constitués de fibres de différentes géométries et matériaux tels que le polypropylène et métallique [Libre et al, 2011], [Choumanidis et al, 2016]. Il convient de noter que d'autres combinaisons de ces fibres ont également été étudiées: métallique/palmier/ synthétique [Dawood et al, 2011]. Récemment, la combinaison de fibres d'acier avec des cendres volantes [Sahmaran et al, 2007] ou de la fumée de silice [Akçay et al, 2012] aussi un mélange de fibres métalliques et de polypropylène avec des cendres volantes [Ding et al, 2012] ont été utilisées. L'auteur [Tanyildizi, 2018] a étudié l'influence de l'ajout des fibres de carbone et fumée de silice sur le comportement mécanique du béton soumis à hautes températures. Il a utilisé trois pourcentages de fumées de silice (0%, 10%, et 20%) et des proportions de fibres de carbone de (0, 2, 4, and 8 kg/m<sup>3</sup>) à des températures de 400°C, 600°C, and 800°C. Il a constaté que la résistance de compression supérieure pour 20% fumée de silice et 1% de fibre de carbone pour toutes les températures d'exposition. Cependant [Chen et al, 2004], a utilisé trois types de fibres métallique/carbone/polypropylène comme montre la figure I.12, les valeurs de la résistance en compression pour BHP de fibres de carbone, BHP de fibres métalliques et BHP de fibres polypropylènes sont respectivement de 32%, 38% et 30% par rapport à la valeur de référence mesurée à 20°C.



**Figure I.12** Résistance relatives à la compression du béton HSC exposé à des différentes températures (C, S, and P représente fibres carbone, métallique, and polypropylène respectivement [Chen et al, 2004].

[Khaliq et al, 2011] notent que les fibres métalliques ( $42 \text{ kg/m}^3$ ) et le mélange de fibres ( $42 \times 1 \text{ kg/m}^3$ ) n'ont pas donné d'effet favorable vis-à-vis de la résistance à la compression.

La variation de la teneur en fibres affecte la résistance résiduelle en compression. Selon [Suhaendi et al, 2006] qui ont comparés deux bétons de mélange de fibres contenant  $0.5 \times 0.25\%$  et  $0.25 \times 0.5\%$  de fibres polypropylène et métallique. La proportion volumique de cocktail de fibres est la même pour les deux compositions de béton ( $0.75\%$ ). Bien que les deux bétons aient un même volume de fibres, le béton contenant moins de fibres métalliques perd plus de résistance.



**Figure I.13** Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène décrite par plusieurs auteurs.

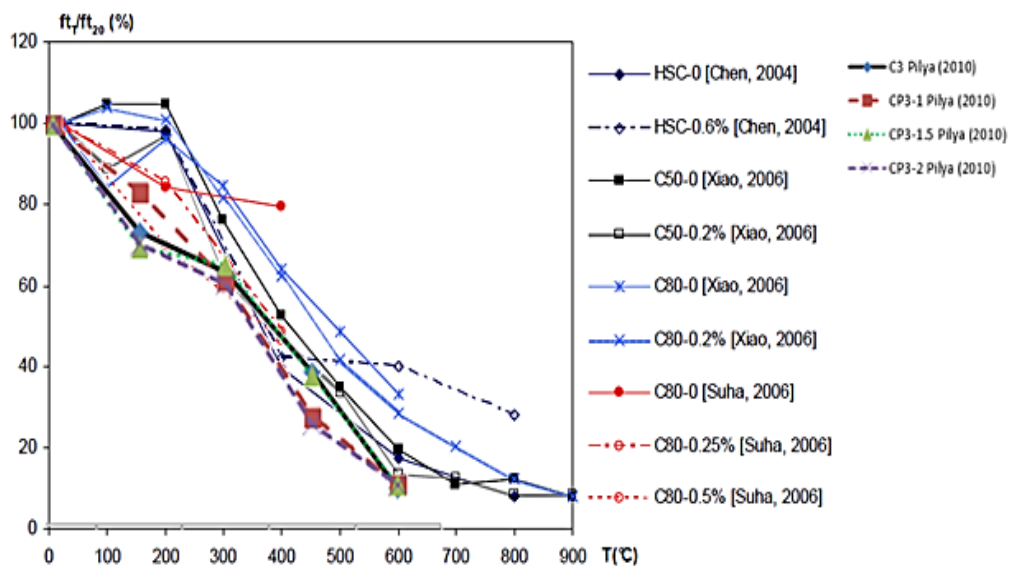
### I.3.2.2 Résistance en traction

Peu de recherches ont été faites pour déterminer le comportement mécanique du béton à la traction à hautes températures, vu la complexité de la réalisation des essais. Par conséquent, on fait appel à des essais indirects de type flexion trois points pour identifier le comportement en traction du béton ou par fendage [Noumowé, 1995]. L'évolution de la résistance à la traction en

fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance à la compression. Les travaux réalisés à haute température montrent une chute de cette résistance avec la température comme dans le cas de la résistance à la compression. Les résultats affirment que la résistance à la traction résiduelle des bétons diminue sous le traitement thermique [Noumowé 1995], [Chen et al, 2004], [Suhaendi et al, 2006], [Aydin et al, 2008], [Haniche 2011], [Pilya 2010] et [Yermak, 2015].

Les fibres de polypropylène améliorent la résistance résiduelle en traction des bétons fibrés [Chen et al, 2004], [Pilya 2010] et [Haniche 2011], qui ont constaté un gain de résistance à la traction par fendage de BHP après 300°C ou 400°C. Contrairement [Noumowé, 2005], [Suhaendi et al, 2006], et [Behnood et al, 2009] ont souligné un effet négligeable de la présence des fibres de polypropylène sur la résistance résiduelle en traction des bétons BHP.

Sur la figure I.14, nous avons collecté plusieurs résultats de résistance à la traction pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique et quantité.



**Figure I.14** Évolution de la résistance résiduelle en traction des bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température.

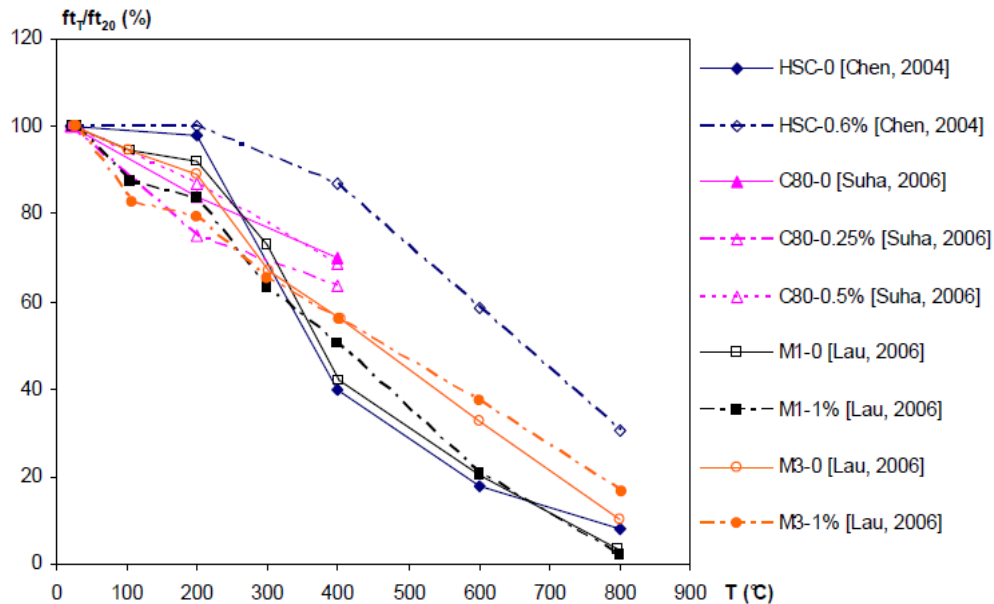
Les fibres métalliques leurs effets sur la résistance à la traction est positive. Comme pour le béton avec et sans fibres de polypropylène, cette résistance diminue avec l'augmentation de la température. Mais, la réduction de la résistance résiduelle à la traction varie lentement pour le béton avec les fibres métalliques [Pilya, 2010], [Suhaendi et al, 2006], [Chen et al, 2004]. L'ajout de fibres métalliques, non seulement améliore la capacité résistante à la traction pour le béton exposé à haute température, mais encore limite l'ouverture des fissures [Pilya 2010] et [Chen et al, 2004]

Les travaux de [Pilya, 2010] ont montré que les bétons sans fibres ( $E/C = 0,3$  et  $0,45$ ) ont perdu respectivement 52% et 53% de résistance relative entre les températures 300°C et 600°C, alors

que la baisse de résistance résiduelle relative des bétons au volume de fibres métalliques 0,25% et 0,51% pour  $E/C = 0,3$  et  $0,45$  respectivement de 63%, 50%, 51% et 45%. Le béton PHB avec les fibres métalliques présente de meilleures résistances relatives en traction. L'auteur signale que les fibres métalliques apparaissent plus efficaces en traction par flexion avec une matrice cimentaire plus dense assurant une meilleure adhérence fibre/matrice.

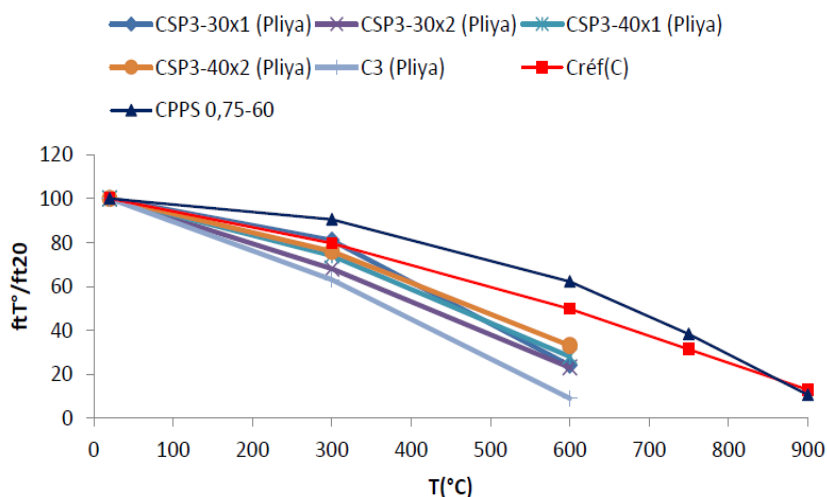
Selon [Lau et al, 2006] et [Chen et al, 2004] on montre qu'un ajout d'une fraction volumique de 1% de fibres métalliques induit une amélioration de la résistance résiduelle relative à la température de 400°C. Cette amélioration est encore de 30% à 800°C pour [Chen et al, 2004], alors que pour [Lau et al, 2006] l'amélioration disparaît à 800°C.

*Des fibres de carbone* sur la résistance résiduelle à la traction est le même que celui des fibres métalliques. L'ajout de fibres métalliques ou de carbone, non seulement améliore la capacité résistante à la traction pour le béton exposé à haute température, mais encore limite l'ouverture des fissures [Chen, 2004].



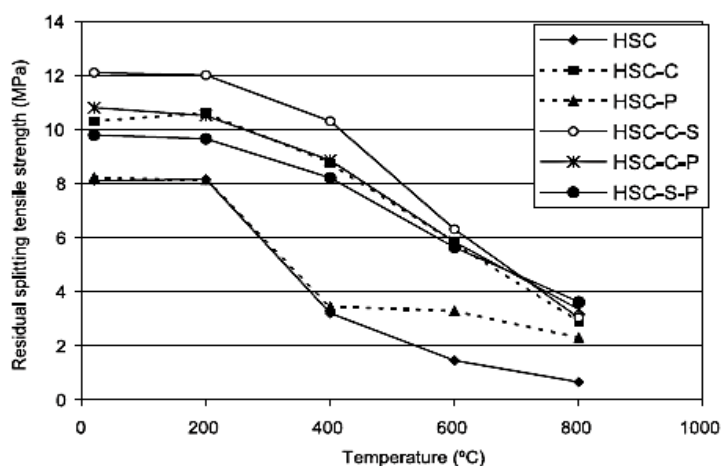
**Figure I.15** Évolution de la résistance relative en traction du béton pour différents teneurs en fibres métalliques.

La résistance en traction des bétons de *mélange de fibres* baisse avec la température. Comme en compression, le cocktail de fibres induit une amélioration de la résistance résiduelle en traction [Yermak, 2015], [Pilya 2010], [Suhaendi et al, 2006], et [Chen et al, 2004].



**Figure I.16** Évolution de la résistance relative en traction des bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques [Yermak, 2015].

Les fibres métalliques et les fibres de carbone jouent un rôle important puisque le pourcentage de 0,3% de mélange de deux fibres dans le béton HSC-C-S induit un gain de résistance en traction (figure I.17).

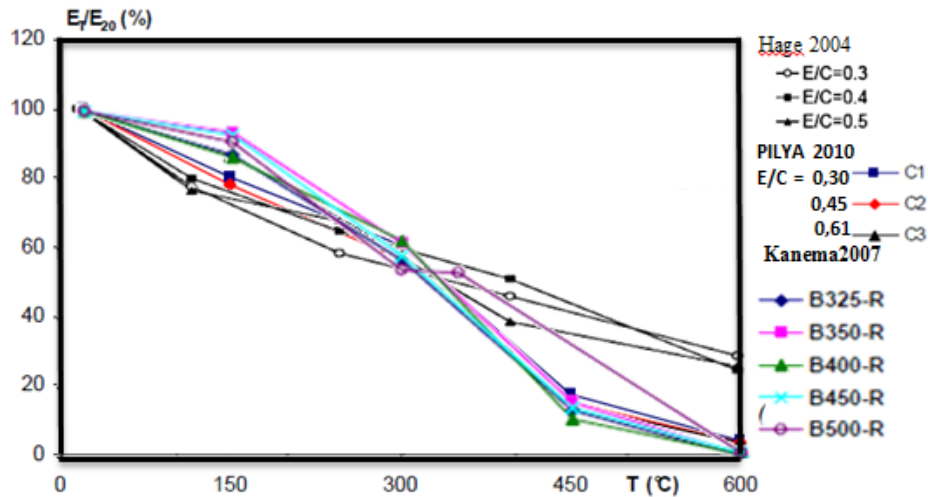


**Figure I.17** Évolution de résistance en traction résiduelle des différents types de bétons contenant des fibres polypropylène, métallique et carbone avec la température [Chen et al ,2004].

### I.3.2.3 Le module d'élasticité

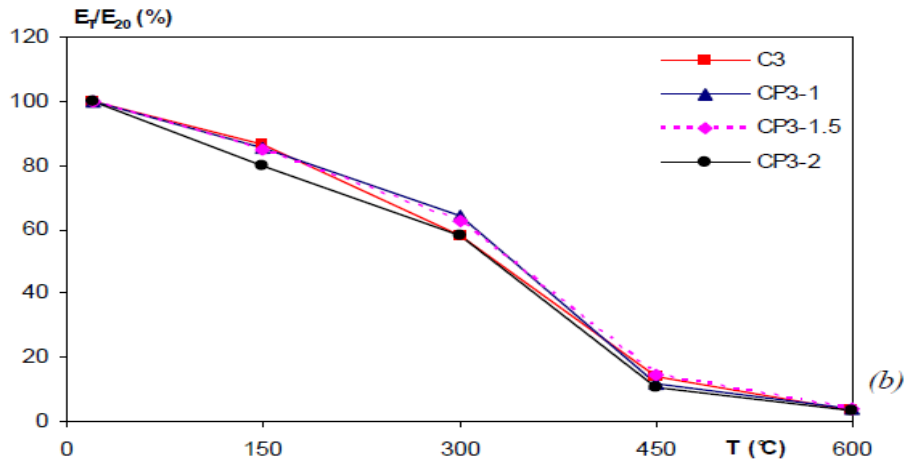
La baisse du module d'élasticité est due aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire ainsi qu'à la déformation des granulats et à la fissuration de la zone d'interface pâte-granulats du béton à une température élevée alors que [Tolentino et al, 2002] affirme que la diminution du module d'élasticité des bétons peut être due à l'augmentation du volume poreux dans les bétons. De nombreux auteurs ont observé une diminution graduelle du module d'élasticité avec l'élévation de la température [Haniche, 2011], [Pliya, 2010], [Fares, 2009], [Kanema, 2007], [Tolentino et al, 2002], [Hager, 2004],[Phan et al, 2001], et [Noumowé1995].

D'après [Kanema, 2007] qui a effectué des essais de module d'élasticité à chaud sur trois bétons de rapport E/C égal à 0,3, 0,4 et 0,5 chauffés aux températures respectives de 120°C, 250°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de montée en température égale à 1°C/min, a constaté que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température. Cela est confirmé par les travaux de [Pliya, 2010], [Hager, 2004], qui ont conclu que le module d'élasticité résiduel diminue d'une manière progressive et identique en fonction de la température et quel que soit le rapport eau/ciment (figure I.18)



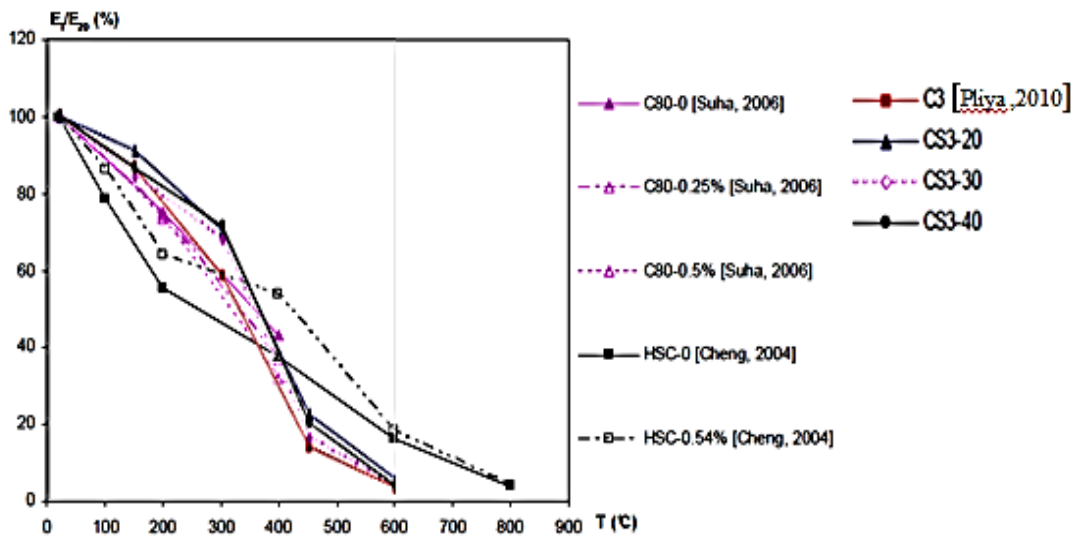
**Figure I.18** Évolution avec la température du module d'élasticité relatif d'un béton sans fibres en fonction de E/C [Hager, 2004], [Kanema, 2007], et [Pilya, 2010]

Les fibres de polypropylène semblent mener à une baisse du module d'élasticité résiduel du béton à haute résistance au cours du chauffage [Pilya, 2010], [Suhaendi et al, 2006], [Noumowé, 2005]. Le module d'élasticité résiduel du béton à haute résistance diminue avec le dosage de fibres de polypropylène utilisé [Suhaendi et al, 2006] et une diminution significative (33%) avec le dosage de 1,8 kg/m<sup>3</sup> en fibres à 200°C est notée par [Noumowé, 2005]. Les résultats obtenus par [Hager 2004] montrent le même phénomène pour des bétons contenant 0,9 kg/m<sup>3</sup> et 1.75kg/m<sup>3</sup> de polypropylène. Cependant, il y a de légers gains sur les modules d'élasticité pour des bétons BHP de fibres de polypropylène après un chauffage à 300°C. Au-delà de cette température, les modules d'élasticité résiduels des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont voisins et la courbe se partageant en deux domaines de pentes distinctes [Pliya, 2010]. La figure I.19 regroupe les résultats d'évolution du module d'élasticité résiduel [Pilya, 2010] relatif aux bétons pour différents teneurs en fibres polypropylènes exprimées en pourcentage volumique.



**Figure I.19** Évolution du module d'élasticité relatif des bétons C3 ( $E/C=0,3$ ) pour différentes teneurs en fibres polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [Pilya, 2010].

Les fibres métalliques ne modifient pas l'allure des courbes de modules d'élasticité avec la montée de la température de bétons avec ou sans fibres métalliques. Le module d'élasticité résiduel baisse de façon progressive avec la montée de la température [Pilya, 2010], [Suhaendi et al, 2006], [Cheng et al, 2004]. À partir de différents résultats expérimentaux, [Pilya, 2010] a pu conclure : une augmentation du module d'élasticité résiduelle est observée avec les fibres métalliques par rapport au module d'élasticité résiduelle de béton avec les fibres de polypropylène aux différents cycles de chauffage-refroidissement : 150°C, 300°C et 450°C. Après chauffage à 600°C, la différence entre le béton sans fibres et le béton avec les fibres métalliques n'existe quasiment plus, quel que soit le dosage. Pilya 2010 a constaté un effet bénéfique avec les fibres métalliques jusqu'à la température 300°C - 400°C ce qui est en accord avec les travaux de [Suhaendi et al, 2006], et [Cheng et al, 2004].

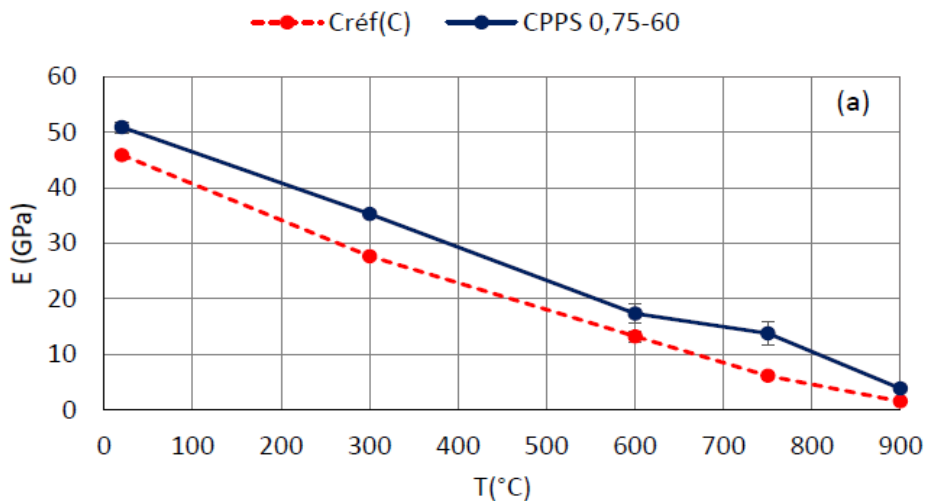


**Figure I.20** Evolution du module d'élasticité résiduel et à chaud relatif de bétons avec plusieurs teneurs de fibres métalliques teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique [Suhaendi 2006], [Cheng 2004] et du dosage de fibres métalliques [Pilya 2010]



Peu d'études ont porté sur le module d'élasticité des bétons de *cocktail de fibres de polypropylène* et métalliques. Le module d'élasticité résiduel baisse de façon progressive avec la température et le comportement est similaire à celui du béton sans fibres [Yermak, 2015], [Pliya, 2010], [Poon et al, 2004], [Suhaendi et al, 2006].

L'étude de [Yermak, 2015] montre que pour un mélange de fibres  $0,75 \text{ kg/m}^3$  polypropylène et  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibres métalliques, la perte relative de module est cependant moins élevée pour le béton fibré. La présence des fibres ne modifie pas la courbe d'évolution du module d'élasticité. Le pourcentage d'amélioration du module d'élasticité résiduel des bétons CPPS 0,75-60 par rapport aux bétons Créf (C) est de 8 % en moyenne jusqu'à  $750^\circ\text{C}$  (figure I.21)



**Figure I.21** Évolution du module d'élasticité résiduel des bétons Créf (C) et CPPS 0,75-60 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement (Yermak, 2015)

#### I.4 Les propriétés thermiques du béton avec la température

Lorsque le béton est porté à une température élevée, il subit diverses transformations qui conduisent à la modification des propriétés thermiques (la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur massique).

##### I.4.1 La conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau est définie comme l'énergie (ou la quantité de chaleur) transférée par conduction thermique à travers un matériau. La conductivité thermique des bétons dépend de la conductivité thermique de chacun de ses composants. Cependant, il est généralement admis que la conductivité thermique du béton dépend essentiellement de celle des granulats [Xing et al, 2011]. Pour les bétons courants, la conductivité thermique diminue lorsque la température augmente. Cette baisse de conductivité est montrée à travers les travaux de [Mindeguia, 2009], [Xing et al, 2011] et [Haniche, 2011] suivant le type de béton et la nature des granulats (figure I.22).

La baisse de la conductivité thermique est générée par le séchage du matériau, la déshydratation des C-S-H. De plus, au-delà de 300°C, l'apparition et le développement des fissures causées par l'incompatibilité de déformation entre le retrait de la pâte de ciment et la dilatation des granulats limitent le transfert de chaleur dans le béton [Mindeguia, 2009], [Schneider et al,1982]. La diminution de la conductivité thermique en fonction de la température est assez marquée pour un béton de granulat silico-calcaire, faible pour un béton de granulats calcaires, et peu significative pour un béton léger [Collet, 1977], [Kodur et al,1998].

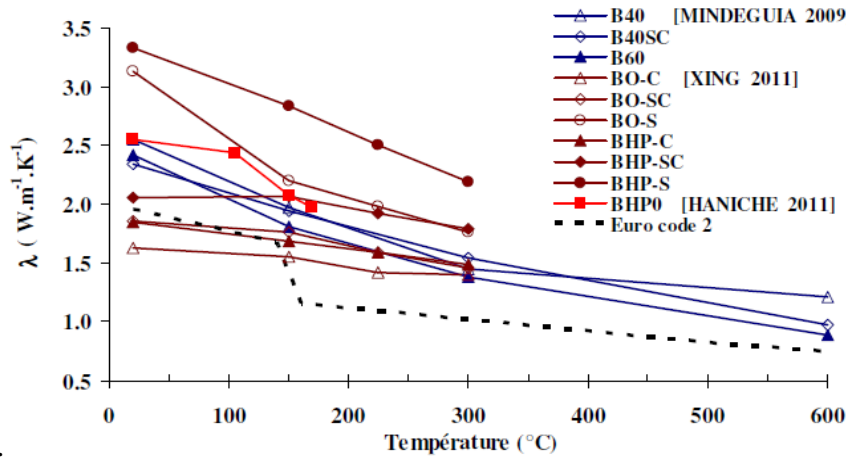


Figure I.22 Conductivité thermique du béton en fonction de la température [Haniche, 2011], [Xing, 2011], [Mindeguia, 2009]

#### I.4.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré une masse unitaire de matière ou on peut la définir par la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'un kilogramme de matériau.

La chaleur spécifique augmente d'une manière générale avec la température. Dans le béton elle dépend de la teneur en eau, du type de granulats et de sa densité. Puisque l'eau joue un rôle important dans l'évolution de la chaleur massique du béton. Schneider [Schneider, 1988] note que la présence de l'eau influence la chaleur massique du béton à des températures inférieures à 200°C. Le béton saturé présente une chaleur massique deux fois plus élevée que celle du béton sec [Kodur et al, 1998] et [Schneider, 1988] ont montré que cette évolution dépend des différentes réactions endothermiques. Lors du traitement thermique, la chaleur spécifique sera fortement modifiée par le départ de l'eau libre, la déshydratation des CSH et la décomposition de la Portlandite.

L'observation de [Xing et al, 2011] présentée dans la figure I.23 montre que la chaleur spécifique des bétons calcaires et bétons siliceux augmente avec la température. Cette augmentation de la chaleur spécifique est peut-être liée aux transformations physico-chimiques qui ont lieu dans le béton à hautes températures et qui sont en général endothermiques.

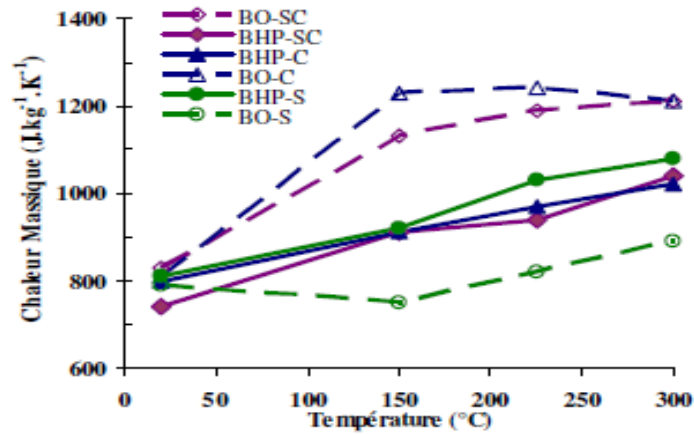


Figure I.23 Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons [Xing et al, 2011].

## I.5 Instabilité thermique du béton

Quand un béton est exposé à des hautes températures, deux phénomènes peuvent apparaître et entraîne la perte de matière: l'écaillage et l'éclatement. Ces deux termes peuvent être définis comme suit:

### I.5.1 Différentes formes d'instabilité thermique

#### I.5.1.1 L'écaillage

Dans la communauté anglo-saxonne, ce phénomène est appelé "Thermal Spalling", en français on l'appelle «Écaillage». Ce phénomène désigne le mécanisme par lequel les parements de béton perdent une partie de leur béton de surface quand celui-ci est exposé à des hautes températures [CETU, 2005]. Ce détachement progressif sous forme d'écaillés de quelques centimètres carrés et de quelques millimètres d'épaisseur, se produit souvent au début de l'incendie, (figure I.24, figure I.25)



Figure I.24 Écaillage du tunnel sous la Manche et tunnel de Tauern [Mindeguia,2009]



Figure I.25 Écaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc [Toumi ,2010]

### **I.5.1.2 L'éclatement**

Lors d'incendie ou d'essais testant la résistance au feu des matériaux, il a été fréquemment observé des désordres importants appelés «Éclatement » ou « Spalling » (en anglais). En effet, les échantillons de bétons ou de structures en béton ont présenté des éclats et ont été détruits suite à un bruit sourd comme une explosion [Fares, 2009]. Il s'agit de morceaux de béton volumineux qui se détachent au cours de l'agression par le feu et peuvent engendrer la perte de capacité portante de la structure.

### **I.5.1.3 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé**

Dans la littérature, le mécanisme de deux phénomènes décrits auparavant «écaillage et éclatement » s'appuient actuellement pour décrire leur mécanisme sur deux axes: d'une part sur le rôle des contraintes thermiques et d'autre part sur celui des pressions des vapeurs d'eau:

- Le processus thermomécanique (dilatation thermique): [Bazant, 1997] et [Ulm, 1999(a)] considèrent que la destruction du matériau est due à des contraintes de compression parallèles à la surface chauffée (figure I.26.a). Ces contraintes de compressions entraînent une destruction du matériau par délaminage parallèle à la surface. D'après [Bazant et al, 1997] les pressions de vapeur internes amorceraient simplement le développement des fissurations. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent [Bazant, 1996, Khoury 1995, Khoury 1992, Schneider, 1982], tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation [Diederichs et al, 1989], le phénomène d'écaillage peut se produire [Kalifa et al, 2000], [Consolazio et al, 1997].
- Le processus thermo-hydrique (pression interne) : Il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure I.26.b montre le mécanisme d'éclatement lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement.

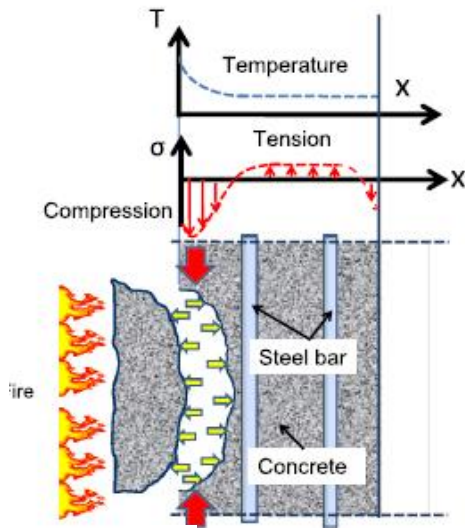


Fig. 1. Thermal dilation.

a)

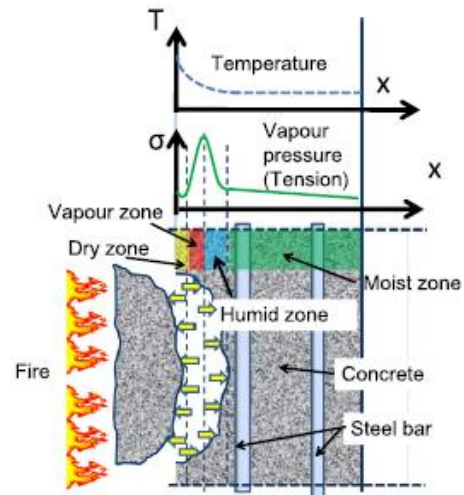


Fig. 2. Vapour pressure.

b)

Figure 1.26a) Écaillage par dilatation thermique gênée [Bazant, 1997] b) Écaillage par pressions internes [Anderberg, 1997] Photos de [Mitsuo, 2014]

#### I.5.1.4 Paramètres influençant sur l'instabilité thermique

Il y a des paramètres qui peuvent influencer sur l'éclatement du béton, les chercheurs dans ce domaine ont permis de spécifier plusieurs paramètres [Noumowé, 1995], [Khoury, 2003]. Ces paramètres sont :

- La présence de l'eau qui joue un rôle principal pour l'apparition des pressions internes qui causent l'éclatement.
- La vitesse de montée en température : Le risque d'éclatement augmente lorsque la vitesse de montée en température augmente.
- Nature des granulats : le comportement des granulats est fortement lié à leur nature chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires [Xing et al, 2011].
- les dimensions de la structure qui a une influence sur l'augmentation de la dégradation est accentuée pour les BHP [Hertz, 1984].
- La présence d'armatures Les armatures peuvent avoir un effet favorable ou défavorable selon leur forme, leur taille et leur disposition. Les armatures constituent une zone de discontinuité thermique et mécanique qui peut favoriser l'éclatement. Par contre, elles peuvent retenir les éclats de béton, ces derniers formant un écran thermique qui limite considérablement la progression de la dégradation par éclatement.
- La présence des charges mécaniques favorise parfois l'éclatement du béton [Diederichs et al, 1989] le démontre notamment par des essais avec pré-charges ou sur des structures précontraintes.

### I.5.1.5 Moyens préventifs contre l'éclatement

L'addition des fibres polypropylènes est un moyen permettant la réduction des risques d'éclatement des BHP, lorsqu'ils sont soumis au feu d'après plusieurs recherches [Kalifa et al, 2001], et [Kodur et al, 2003]. Le mélange de fibres est un nouveau moyen de prévention contre l'éclatement selon les recherches de [Yermak, 2015] montré sur la figure I.28. D'après [Toumi 2010], Les fibres sont employées en quantité de 0.1% à 0.2% du volume du béton qui correspond à une quantité couramment employée dans le but de la prévention de l'écaillage.

Autres moyens pour éviter le phénomène d'éclatement concerne la conception des éléments de structure ou utilisé agent entraîneur d'air AEA [D'aloia, 2012]. Il est possible de les modifier pour améliorer les dimensions, la géométrie ou encore ajouter des renforts. Il est également envisageable de mettre en place une protection externe (barrière thermique). Mais, cette solution augmente le coût de l'ouvrage [Feres, 2009].

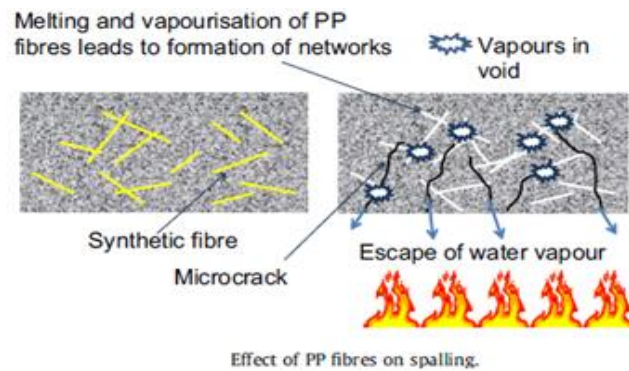


Figure I.27 Montre l'effet bénéfique des fibres polypropylènes dans le béton [Mitsuo, 2014].



Figure I.28 Éprouvettes cylindriques après chauffage à 10°C/min jusqu'à 600°C pour : a) béton sans fibres- b) béton avec 60 Kg de fibres métalliques - c) béton avec un cocktail 0,75kg fibres polypropylènes et 60 Kg de fibres métalliques [Yermak, 2015]

## **I.6 1 Principales méthodes non destructives pour l'évaluation du béton exposées à des hautes températures**

Les incendies des tunnels du Tauern (Autriche 1999), du Mont-Blanc (France 1999) ou de la tour Windsor (Madrid 2005) et le tunnel Akhdaria (Algeria, 2008) ont révélé que le béton chauffé à hautes températures peut présenter des risques d'instabilité. Pour cela on a recouru aux méthodes non destructives qui sont favorisées grâce à leur facilité de mise en œuvre et à leur cadence élevée.

Dans les conditions normales pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages la procédure consiste à des essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Dans le cas où le béton est exposé à des hautes températures comme les incendies il faut un examen plus détaillé pour un ouvrage endommagé mais réparable. L'investigation consiste à établir un relevé quantitatif des dégâts occasionnés par l'incendie en termes de surface atteinte, de profondeur d'altération (éclatement, écaillage, fissuration, modifications physico-chimiques, etc.) [LCPC, 2005].

Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées dans les ouvrages de [Bungey et al, 1996], [Malhotra et al, 2004] et [Breysse et al, 2005]. Parmi ces méthodes, trois méthodes nous intéressent dans notre étude inspection visuelle, le scléromètre et l'ultrason qui sont les plus couramment choisis pour l'estimation non destructive de la résistance du béton [Breysse, 2012].

### **I.6.2 Inspections visuelles**

L'inspection visuelle est le premier moyen de contrôle non destructif à la reconnaissance et au diagnostic d'ouvrages en béton armé [Graybeal et al, 2002]. Elle permet de fournir une idée sur l'état du béton et de l'ouvrage. L'observation visuelle peut s'accompagner de moyens supplémentaires [Fnine, 2006]:

- Appareils photos numériques
- Caméra d'enregistrement
- Moyen de mesure de déplacement ou de déformation de l'ouvrage (fissuromètre,...)

L'évaluation par l'observation du changement de couleur selon les résultats de la recherche de [Bessey, 1956] sur béton avec granulats siliceux et [Ahmed et al, 1992] sur béton avec granulats calcaire présenter sur le tableau I.2 ou la remarque que est le béton est influencé par le type de granulats calcaire ou siliceux [Purkiss et al, 2014]. Afin de décrire les changements de couleur du béton exposé à de hautes températures d'une manière plus précise, une variété de techniques de description des couleurs sont utilisées [Short, 2001, Felicetti, 2004, Luo 2007, Annrel, 2009]. Dans les tests menés par Faure et Hemond [LCPC 2005] un spectrophotomètre a été utilisé

directement sur la surface des échantillons de béton. La méthode utilisée par [Short et al,2001] consistait à observer des échantillons à travers un microscope polarisant équipé d'un logiciel d'analyse des couleurs.

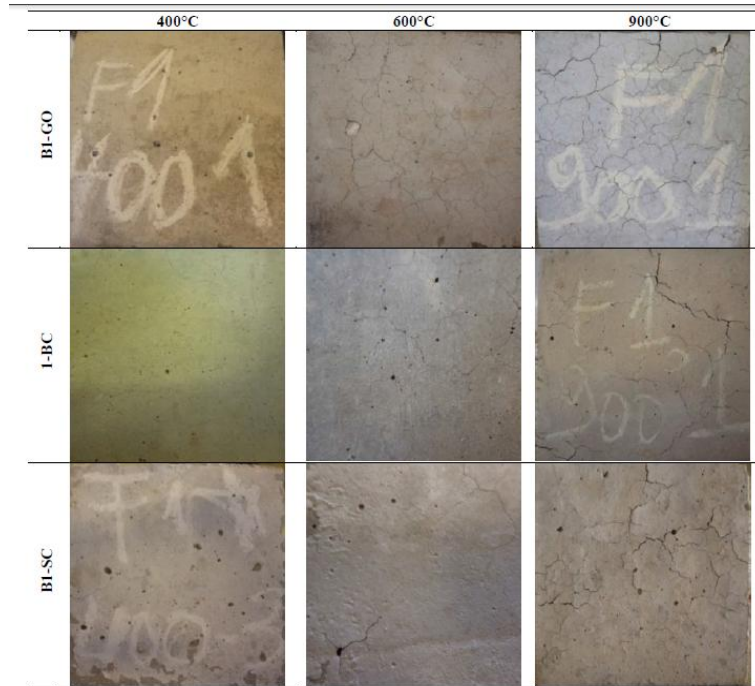
La technique proposée par [Felicetti , 2004] ou il utilise un appareil photo pour prendre des photos et analyse les changements de couleur du béton en fonction de la température atteinte. Cette dernière méthode nécessite toutefois la maîtrise des conditions d'éclairage, ce n'est pas facile à réaliser. Récemment, [Hager, 2012, Hager, 2010] ont proposés une technique dans laquelle un scanner à plat est utilisé pour obtenir des conditions d'éclairage constantes tandis que des images d'échantillons de béton sont prises. Cette méthode est moins coûteuse, il suffit d'un logiciel de traitement d'image en utilisant un logiciel d'analyse d'images comme Scion Image pour effectuer ces observations.

**Tableau I.2** Changement de couleur de béton exposée à des hautes températures avec deux types de granulats siliceux et calcaire [Purkiss et al, 2014].

Couleurs	Température (c°)
<b>Granulats Siliceux</b>	
Normal	0-300
Rose	300-600
Blanc à Gris	600-950
Orange	950
<b>Granulats calcaire</b>	
Gris	0-200
Rose clair	200-400
Gris terne	400-600
<i>Note:</i> Not all siliceous or limestone aggregate concretes will show these changes, as they may be due to impurities in the set as well as the aggregate. Absence of or a different colour change to those noted above should be treated with care.	
<i>Sources:</i> Bessey (1956) Building Research Establishment: Crown Copyright et Ahmed, Al-Shaikh et Arafat (1992) by permission Thomas Telford Publications	

L'observation visuelle de dégradation des bétons exposés à des températures élevées se caractérise aussi par le détachement d'écailles ou bien par l'éclatement d'éléments de structure et l'apparition des fissures allant de quelque millimètre à des centimètre selon la température de chauffage [Hachemi, 2015]. Les premières fissurations ont été observées à l'œil nu à la surface des éprouvettes après le cycle de chauffage-refroidissement de 400°C sans présence d'événement d'éclatement des éprouvettes de béton avec différents types de granulats le même remarque et constaté par [Arioz, 2009].





**Figure I.29** Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons avec des différents types de granulats après les cycles de chauffage de 400°C, 600°C et 900°C [Hachemi, 2015].

La seule inspection visuelle n'est pas en mesure d'évaluer la résistance ou les dégradations internes de la structure. A l'étape de pré-auscultation, l'inspection visuelle peut s'accompagner de l'emploi de techniques non destructives simples, tels que le scléromètre et/ou l'ultrason [Kenai et al, 2003].

### **I.6.3 Rebond (marteau de rebondissement de Schmidt)**

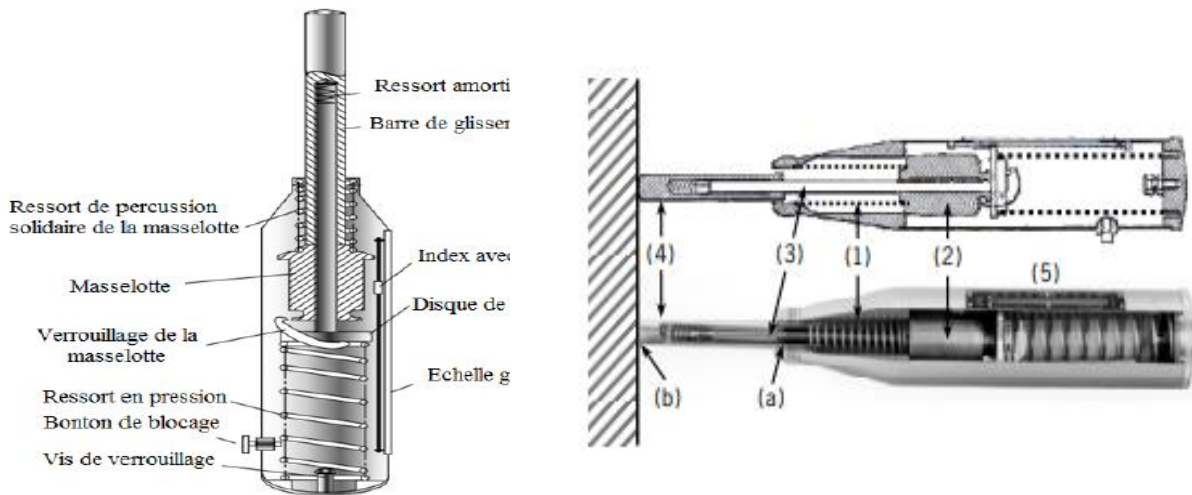
Jusqu'à nos jours, la méthode la plus largement utilisée pour mesurer la dureté superficielle du béton est le scléromètre de Schmidt [Hannachi, 2015], [Szallagy, 2013].

Le scléromètre est utilisé dans le cas de béton exposé aux haute températures [Likang, 2017], [Hager et al, 2014], [Savva et al, 2005], [Arioz, 2009] et à donner des valeurs qui peuvent aider l'inspection visuelle [Emanuelle, 2012]. C'est un outil peut cartographier la zone où le béton a été exposé à haute température [Joakim et al, 2011]. Il faut noter que les essais par le scléromètre caractérisent l'état de surface du béton (altéré par exemple l'incendie) alors que les essais de compression sont réalisés sur toute la profondeur ce qui expliquera que le scléromètre n'est pas suffisamment sensibles pour détecter l'endommagement de béton exposée à des hautes températures [Joakim et al, 2011], [LCPC, 2005], [Logothetis et al, 1981]. Le scléromètre Schmidt permet d'obtenir des indications qualitatives sur la gravité des dégâts, à la condition toutefois qu'il n'y ait pas d'éclatements et que la surface soit plane.

Le scléromètre utilisé pour estimer les propriétés mécaniques des bétons sans les détruire. Son principe est basé sur la chute d'un objet entraînant une énergie cinétique. Lors de l'impact, celle-ci est absorbée en partie par le matériau, l'énergie restante se manifeste par le rebond de l'objet.

Cet appareil ne donne qu'une information locale sur les propriétés du béton. Il existe plusieurs types de scléromètre qui se différencient par la valeur de l'énergie d'impact [Sakhraoui et al, 2009].

La recherche des données et le traitement des résultats des tests de ces équipements sont conformes aux principales normes de l'industrie telles que ASTM C805 / EN 12504-2 et les recommandations de (RILEM TC 7- NDT, 1977; RILEM TC 43-CND, 1983).



**Figure I.30** Schéma d'un scléromètre [Beinish , 1999, Szilágyi K, 2013].

### I.6.3.1 Mode opératoire d'utilisation pour un béton chauffé

Selon [EN 12504-2, 2003, Qasrawi, 2000] il faut toujours préparer l'instrument à l'essai, afin de s'assurer d'un fonctionnement correct, le scléromètre doit être actionné au moins trois fois avant de procéder à la lecture d'une série de résultats. Les essais doivent être réalisés sur une surface talochée, il conviendra de meuler, à l'aide d'une pierre.

Des mesures seront réalisées sur des parties de l'ouvrage situées de part et d'autre de l'incendie. La valeur médiane de ces mesures servira de référence pour l'indice de rebondissement auquel seront comparées les valeurs mesurées sur les zones ayant subi l'incendie [LCPC, 2005].

Un procédé opératoire a été proposée par les laboratoires des ponts et chaussées [LCPC, 2005] dans le cas de béton après un incendie :

- Les essais seront réalisés suivant des lignes s'éloignant du centre des zones visuellement dégradées par l'incendie.
- Neuf mesures se feront sur chaque point. C'est la valeur médiane qui est retenu. Pour les essais en laboratoire des sur éprouvettes cubiques (150 mm x 150 mm x 150 mm) de laboratoire sera effectuée au moins 5 points avec un espacement de 20 mm et la valeur moyenne est retenu [Mróz, 2017]

- L'espacement entre les points de mesure sera d'environ 0,20 m (mesure sur un ouvrage). Cet espacement pourra être changé selon le degré et l'étendue des désordres.
- Si plus de 20 % de l'ensemble des lectures effectuées sur une zone d'essai diffèrent de la valeur médiane de plus de six unités, l'ensemble des mesures doit être écarté.
- L'ensemble des résultats permet de délimiter la zone altérée par l'incendie, zone où les résultats sont inférieurs à l'indice  $I_{sm}$  de référence. De plus, il est possible de tracer des courbes d'iso-dureté à l'aide des différentes mesures  $I_{sm}$  (Figure. I.31).

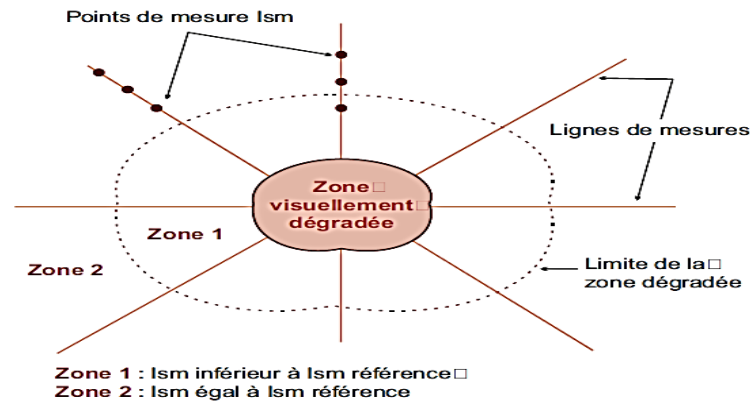


Figure I.31 Schéma d'implantation des mesures par scléromètre [LCPC, 2005].

L'appareil peut être à la position horizontale, verticale vers le haut ou vers le bas, ou à n'importe quel angle intermédiaire, à condition que le marteau soit fermement maintenu de manière à permettre à la tige de frapper perpendiculairement la surface d'essai. Il convient d'utiliser le scléromètre dans une température ambiante comprise entre 10 et 35 °C [EN 12504-2, 2003]. Ainsi pour effectuer des essais sur béton chauffé il faut attendre le refroidissement complet de béton testé.

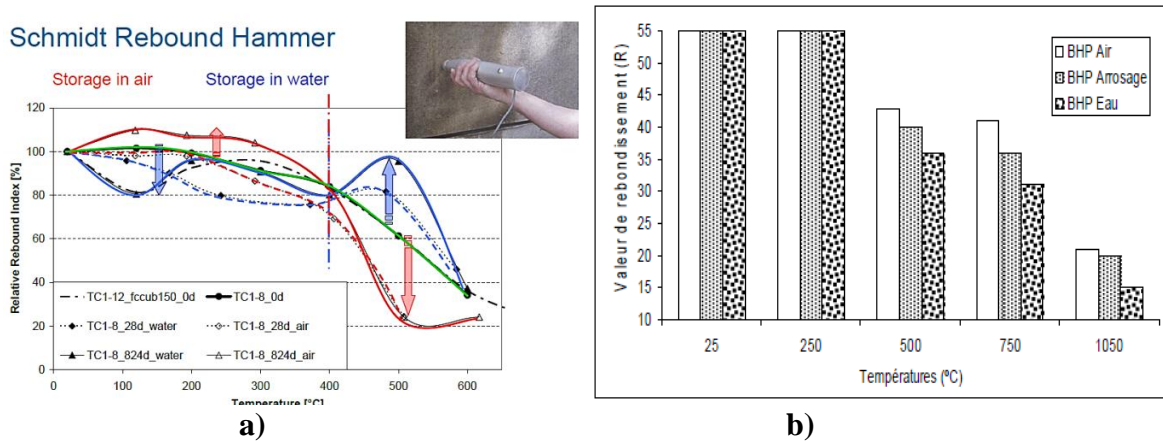
### I.6.3.2 Facteurs influençant l'essai au scléromètre

Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment, les gros granulats et le degré de carbonatation de la surface [Hannachi, 2015, Ali Benyahia, 2017, Feidman, 1977].

D'autres facteurs qui peuvent influencer sur les mesures de scléromètre dans des conditions normales (température ambiante) et des températures élevées qui vont être détaillé.

- l'élément à tester doit être rigidement maintenu ou soutenu par une masse lourde [Khan, 2002]. Alors l'éprouvette à examiner doit être fermement retenue par compression sous une charge initiale approximativement égale à 15% de la charge finale.
- - L'essai de rebondissement ne devrait pas être effectué sur un béton de faible résistance au jeune âge ou que la résistance du béton est moins de 7 MPa puisque la surface du béton pourrait être endommagée par le marteau [Khan, 2002].

- D'après [Kolek, 1969, Khan, 2002], le béton fabriqué avec un ciment alumineux ou un ciment super-sulfaté a une valeur de la résistance à la compression 100% supérieure et une valeurs de la résistance 50% inférieure par rapport un béton fabriqué avec un ciment ordinaire respectivement, ce qui influé nécessairement à des valeurs différents de l'indice de rebondissement.
- Le degré de saturation du béton a un effet décisif sur la valeur de l'indice de rebondissement qui a démontré que la dureté d'une surface humide du béton est inférieure à celle d'une surface sèche.[Malhotra, 2004]. A des températures élevées les mesures de l'indice de rebondissement sur éprouvettes sont influencées par le mode de refroidissement [Annrel et al, 2012], [Toumi, 2010]. D'après la figure I.32 les valeurs de rebondissements sont plus élevées que le mode de refroidissement est à l'air libre que par arrosage et enfin refroidi par l'eau. Globalement, l'évolution des valeurs de rebondissement est fonction de la température et de mode de refroidissement [Toumi, 2010].



**Figure I.32** Valeur de rebondissement relative et résiduelle (R) pour béton avec différents mode de refroidissement en fonction de la température [a) [Annrel et al, 2012] et b) [Toumi, 2010].

- Température d'échauffement de béton, Selon [Savva et al, 2005] les valeurs de l'indice diminuent avec l'augmentation de température d'exposition pour des bétons contenant de pouzzolane confectionnée avec deux types de granulats calcaire et siliceux influencé par la température à l'âge de trois ans. Ils ont conclu que à la température dépassent 750°C, il est impossible d'effectuer des mesures par l'essai de rebondissement (scléromètre) en raison de la détérioration de la surface des éprouvettes. Par contre les travaux [Logothetis et al, 1981] a montré avec l'augmentation de la température provoque au premier séchage et durcissement de la couche de surface du béton, les valeurs de l'indice de rebondissement présentent une légère augmentation jusqu'à 400°C. Pour des températures plus élevées, une fissuration interne intensive et décomposition chimique (carbonisation), les mesures l'indice de rebondissement montrent une légère diminution. Il a conclu que les mesures du rebond ne montrent pas une

sensibilité considérable à la température. Les travaux de [Arioz, 2009] montre que les valeurs de l'indice de rebondissement diminué avec l'augmentation de température jusqu'à 1200°C.

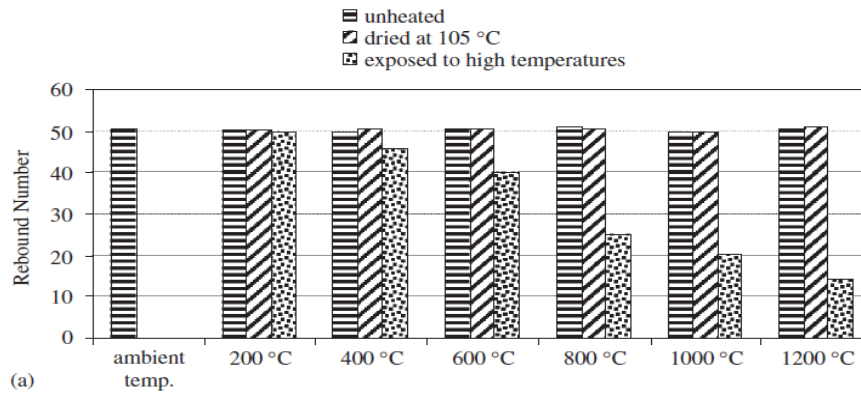


Figure I.33 les valeurs de rebondissement de scléromètre pour éprouvettes (100×100×100) mm de béton exposées à hautes températures [Arioz, 2009].

### I.6.3.3 Corrélation entre la résistance et le Rebond

D'après [Malhotra et al, 2004], il existe des relations théoriques généralement entre les valeurs de l'indice de rebondissement et la résistance à la compression du béton. Cependant, ce rapport reliant la résistance avec le rebond n'est pas unique, car il est affecté par beaucoup de facteurs. Après une enquête sur les modèles existants, plus de 60 modèles empiriques ont été répertoriés par (Szilágyiet et al, 2009), alors que plus de 80 modèles différents ont été trouvés par (Breysse, 2012), trois types de modèles sont plus couramment trouvés: loi de puissance, linéaire et loi polynomiale de second ordre. Des modèles de corrélation ont été proposés par différents chercheurs comme le montre le Tableau I.2 spécialement conçu pour le béton à haute température.

Tableau I.3 Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression Fc (MPa) (ou d'autres paramètres) et l'indice de rebondissement RN conçu que pour béton à des températures élevées.

Auteurs	Fonctions de régression	Conditions
[Mróz et al, 2017]  D'autre caractéristiques ont été corrélation module d'élasticité et résistance à la traction	$F_c = 3,33RN - 60$ (agrégat: Basalt) $R^2 = 0,95$ $F_c = 2,56RN - 40$ (agrégat: Dolomie) $R^2 = 0,87$ $F_c = 2,96RN - 54$ (agrégat: Granit) $R^2 = 0,98$ $F_c = 2,56RN - 40$ (agrégat: gravier de rivière) $R^2 = 0,95$ $F_c = 2,56RN - 40$ (pour tous les types les agrégat) $R^2 = 0,89$ $E = 0,0025 e^{RN.4,42}$ (agrégat: Basalt) $R^2 = 0,97$ $E = 0,0002 e^{RN.4,92}$ (agrégat: Dolomie) $R^2 = 0,93$ $E = 0,0002 e^{RN.4,90}$ (agrégat: gravier de rivière) $R^2 = 0,94$ $E = 0,0011 e^{RN.4,48}$ (For all agrégats) $R^2 = 0,82$ L'auteur a remarqué que pour le béton de dolomite (D), il y a petit de changement de valeurs de l'indice de rebond et le module d'élasticité du béton la corrélation ne peut pas être déterminé. $F_t = 0,11 e^{0,08 RN}$ (agrégat : Granit) $R^2 = 0,95$ $F_t = 0,05 e^{0,1 RN}$ (agrégat: gravier de rivière) $R^2 = 0,95$ $F_t = 0,06 e^{0,11 RN}$ (agrégat: Balsate) $R^2 = 0,95$ $F_t = 0,11 e^{0,09 RN}$ (pour tous les types agrégat) $R^2 = 0,83$	Cubes (150 mm x 150 mm x 150 mm) pour l'essai la résistance en compression et cylindriques (Ø100 mm, h = 200 mm) pour détermination de module d'élasticité et résistance en flexion, vitesse d'échauffement 0.5 °C/min et température (T = 20,200, 400, 600, 800,1000°C). Différents types de granulats utilisés.
[Abdulkadir ,2017]	$f_{cu} = 1.773RN - 27.58$ $R^2 = 0.957$ All mixes cooled in Air $f_{cu} = 1.750RN - 26.357$ $R^2 = 0.982$ All mixes cooled in water $f_{cu} = 1.7541RN - 26.686$ $R^2 = 0.9717$ All mixes	cubes (150x150x150 mm), exposé pendant (en minutes) 0, 15, 30, 60 min.
[Brozovskyet et al , 2016]	A 20° $F_c = 0.0425RN^2 - 1.4965RN + 25.294$ $R^2 = 0.9579$ A différents températures : $F_c = 1,5598e^{0,00645.RN}$ $R^2 = 0,9579$	Température avant échauffement à 20°Température d'échauffement de 200 à 800°C) avec une vitesse d'échauffement 10°/min.

<p>[Hager et al 2015]</p>	<p>fc=3.00 RN-66.71 fc=2.47RN-52.04 fc=1.69RN-45</p>	<p>R<sup>2</sup>= 0.95 R<sup>2</sup>= 0.96 R<sup>2</sup>= 0.89</p>	<p>pour E/C=0.30 pour E/C=0.45 pour E/C=0.60</p>	<p>L'âge des éprouvettes de béton 90 jours, Essais sur éprouvettes 150x150x150 mm et cylindriques Ø100 mm, h = 200 mm) variant E/C et la température = 200 ° C, 400 ° C, 600 ° C, 800 ° C and 1000 ° C. La vitesse d'échauffement est 0.5 ° C/min</p>
---------------------------	--	--	--	---

### I.6.4 Les ultrasons ou couramment nommée UPV

Les ultrasons sont à l'heure actuelle la méthode reine pour la détection de défaut sur des matériaux composites. Le matériel est constitué d'un générateur couplé à deux transducteurs piézoélectriques (émetteur – récepteur) et d'un oscilloscope numérique en option permettant d'enregistrer des signaux de mesure. Il est possible aujourd'hui de réaliser des mesures sur site à l'aide d'un matériel portable tel que le PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating. Tester) (figure I.34).



Figure I.34 Appareil à ultrason Tico.

Le temps de propagation des ondes ultrasonores dans le béton, noté  $T$  en  $\mu s$ , s'affiche sur l'écran de l'appareil. À partir du temps mesuré, la vitesse ultrasonore, notée  $V$  en m/s, est calculée pour chaque mesure par la relation II.1 [Qasrawi, 2000 ; EN 12504-4,2005]

$$L = \frac{V}{T} \quad (\text{Eq I.1})$$

Avec  $L$  est la distance considérée entre émetteur et récepteur.

Le son est un moyen de détecter la présence des vides, fissures. Ainsi les ultrasons permettent de déterminer des caractéristiques mécaniques du milieu ausculté et d'en apprécier l'homogénéité (en détectant des vides, délaminages et micro-fissurations), de caractériser un béton dont le rapport E/C est incorrect, ou ayant subi une modification structurelle (cas des bétons gelés ou incendiés) [LCPC, 2005].

L'ultrason un moyen fiable, rapide, sûr, peu coûteux et non invasif, permettant l'estimation des propriétés et offre la possibilité de contrôle direct de la qualité, pour des constructions en béton saines ou endommagées par le séisme, la fatigue, l'incendie ou d'autres scénarios catastrophiques.

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité [Feidman, 2005] comme il a été décrit dans le Tableau I.3.

**Tableau I.4** Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [Feidman, 2005].

Vitesse de propagation des impulsions (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500 – 4500	Bonne
3000 – 3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

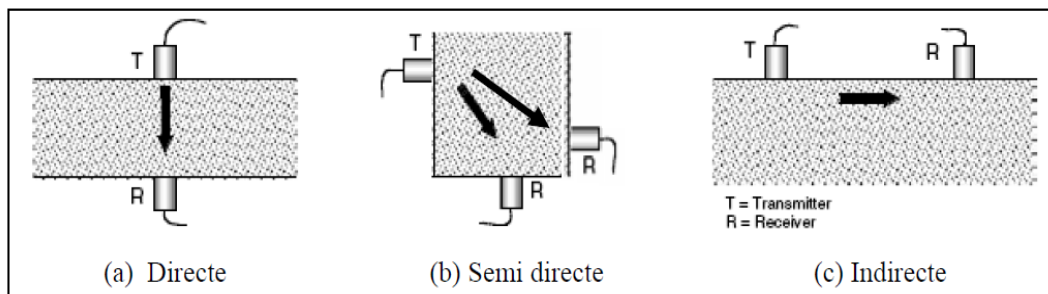
Dans le cas d'un béton soumis à des températures élevées, l'élévation de température provoque une modification physico-chimique du matériau. L'auscultation sonore, basée sur des mesures de temps de parcours et d'énergie transmise, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation [LCPC, 2005]. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à étudier l'évolution du comportement d'une onde ultrasonore se propageant dans un milieu ayant subi préalablement un traitement chimique, thermique [Ouldnaffa et al, 2002]; [Lafhaj et al, 2009], [Uysal, 2012]. La majeure partie de ces études ont montré la sensibilité des paramètres de propagation (diminution de la vitesse, augmentation de l'atténuation) aux différents degrés d'endommagement engendrés (fissuration, augmentation de la porosité, diminution de la résistance) [Nguyen 2014].

Plusieurs pays ont développées des normes et recommandations pour standardiser la procédure de l'essai non destructif de la mesure ultrasonique UPV. [Komlos and al, 1996] ont listé plus de 20 standards publiés entre 1972 et 1994. Les plus connus sont les normes européennes [EN 12504-4, 2004] et les normes américaines [ASTM C597, 2002].

**I.6.4.1 méthodologie de mesurage**

Il existe 3 méthodes pour conduire l'essai ultrasonique, (figure I.35)

- *Transmission indirecte* : La source et le capteur se trouve sur la même face et le couple source capteur peut se déplacer le long de la surface.
- *Transmission directe* : Le matériau se situe entre la source et le capteur, C'est la méthode la plus employée.
- *Transmission semi directe* : La disposition semi directe est utilisée lorsque la disposition directe ne peut pas être adoptée



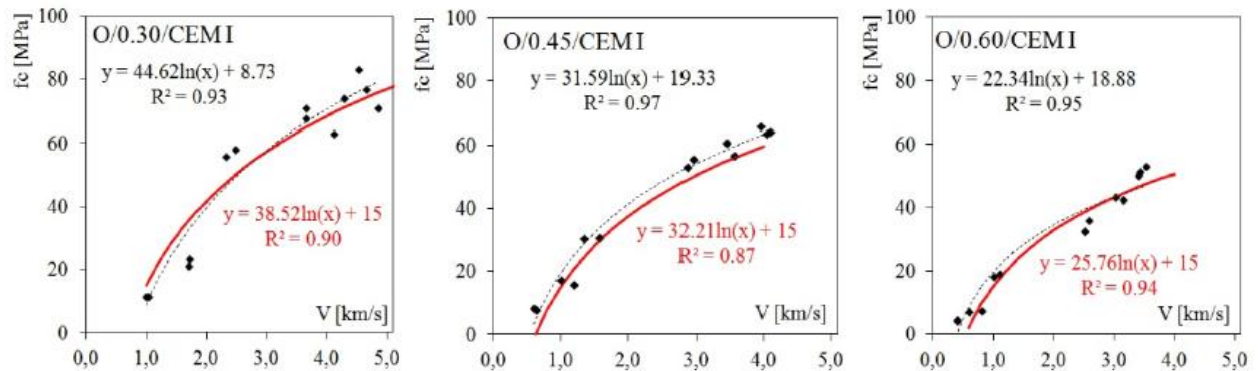
**Figure. I.35** Configurations des transducteurs pour la mesure de la vitesse ultrasonore [Naik et al, 2004].

### I.6.4.2 Facteurs affectant la vitesse ultrasonore

Plusieurs facteurs peuvent affecter la vitesse de propagation et sur sa corrélation avec la résistance à la compression du béton : on condition normale (en terme de température: température ambiante), et température élevé.

- Lorsque le rapport E/C diminue, la résistance en compression augmente ainsi que la vitesse de l'impulsion. Au contraire lorsqu'il y a une diminution de résistance à la compression et la vitesse de l'impulsion correspondante le rapport E/C augmente, pour la même composition de béton [Kaplan, 1959].

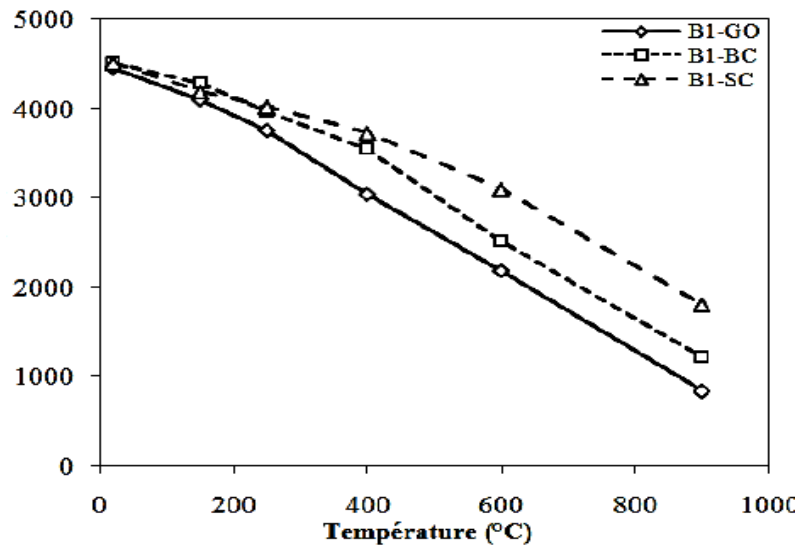
Les essais de [Hager et al, 2015] sur un béton exposé à des températures élevées, ont montré que la vitesse de l'impulsion augmente avec la diminution du rapport E/C au même temps elle indique qu'avec l'augmentation de la température la vitesse diminue comme illustre la figure I.36.



**Figure I.36** Relation entre la résistance en compression et la vitesse de l'impulsion  $f_{cT}$  ( $V_T$ ) de béton exposée à des hautes températures [Hager et al, 2015].

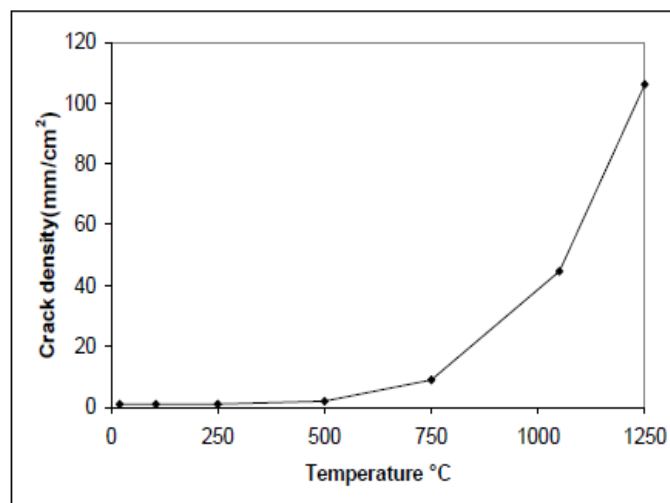
- -Taille, classe, type et dosage des granulats : Beaucoup de chercheurs ont constaté que la vitesse de l'impulsion est affectée sensiblement par le type et la quantité des granulats [Jones 1962, Kaplan 1959, Gregor et al 2008] puisque les bétons ayant les plus grandes teneurs en granulats donnent les valeurs les plus élevées de la vitesse de propagation. Les granulats jouent un rôle important dans le béton car ils en constituent le squelette par lequel sont transmis les efforts. Sous l'effet de la température, les granulats se décomposent et subissent également des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro-structurales du matériau. D'après les travaux de [Hachemi, 2015] les granulats jouent un rôle important sur l'évolution de la vitesse de l'impulsion tout comme la résistance en compression sous l'effet de température. Cette remarque est confirmée selon les travaux d'autres chercheurs [Sava et al, 2005], [Mróz et al, 2017]





**Figure I.37** Evolution Effet de la température sur la vitesse de l'impulsion pour béton confectionnée ave deux types de granulats B1-GO granulats calcaire et B1-BC granulats briques concassée (Hachemi, 2015).

- Vu la grande diversité des adjuvants utilisés pour la préparation du béton, le problème de leur influence sur la corrélation vitesse - résistance est très complexe [Ali Benyahia 2017]. Alors que l'entraîneur d'air ne semble pas influencer la corrélation [Jones, 1954]. Par contre, l'addition du chlorure de calcium réduira le temps de prise du béton et augmentera la vitesse d'hydratation par lequel la vitesse d'impulsion augmente [Naik et al, 2004].
- La présence de fissures et de vides conduit à un trajet de propagation plus long de l'onde propagée et, par conséquent, le temps de transit augmente [Carino, 2008], ainsi dans le cas de béton endommagé par la température plusieurs chercheurs (Toumi, 2010), (Laneyrie, 2015) ont remarqué que la densité de fissuration du béton chauffé augmente en fonction de l'augmentation de la température de chauffage ce qui traduit la diminution de la vitesse d'impulsion avec la montée de température.



**Figure I.38** Densité de fissuration en fonction de la température de chauffage [Toumi, 2010].

- L'un des facteurs les plus importants influençant la vitesse d'impulsion est la présence de barres de renfort. La vitesse du béton armé au voisinage du ferrailage est plus élevée que celle du béton ordinaire. Par conséquent, dans la mesure du possible, les barres de renforcement parallèles et proches de la trajectoire entre les transducteurs (ou barres transversales qui croisent cette trajectoire) doivent être évitées lors du choix des positions d'essai des transducteurs [BS 1881: Part 203, 1986].

### I.6.4.3 Modèles de corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonore

Des corrélations empiriques établies entre la résistance à la compression afin d'évaluer la résistance à la compression du béton basée sur écrasement et la vitesse ultrasonore correspondante. Toutefois il faut mentionner qu'il y-a des corrélations entre la vitesse ultrasonore UPV et d'autres propriétés comme la résistance en traction, module d'élasticité perméabilité [Suhaendi et al, 2006], et porosité, densité [Panzera, 2008]. Plusieurs modèles de corrélation ont été proposés dans ce sens par différents chercheurs comme le montre le tableau suivant :

**Tableau I.5** Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression « $f_c$  (MPa)» et vitesse ultrasonore « $V$  (km/s, m/s)» pour béton exposées à des hautes températures.

Auteurs	Fonctions de régression	Conditions
[Chung,1985]	Béton refroidir à l'air libre: $(f_c/f_{20}) = -0.07 + 3.29 (Vt/V_0) - 2.42 (Vt/V_0)^2$ $R^2 = 0,98$ Béton refroidir par l'eau : $(f_c/f_{20}) = -0.08 + 2.15 (Vt/V_0) - 1.32 (Vt/V_0)^2$ $R^2 = 0,91$	Essai sur éprouvettes cubique 10X10 cm en variant E/C =0,4/0,45/0,50/0,55/0,60 à des températures 400, 600, 700,800°C, les éprouvette conserver à l'eau 28 jours puis 3semaine à l'air libre
[Suhaendi et al , 2006]	$F_c = 17,244e^{0,2997V}$ $R^2 = 0,8345$ $F_t = 1,1054e^{0,3222V}$ $R^2 = 0,7575$ (résistance en flexion) $E = 2,0503e^{0,629V}$ $R^2 = 0,9445$ (module d'élasticité) $K = 2.10^{-5}e^{2,099V}$ $R^2 = 0,7$ (K propriété perméabilité)	Des éprouvettes cylindriques de béton avec des fibres (métalliques, polypropylène et de mélange de fibres) exposées à des températures 200°et400° d'une vitesse d'échauffement 10°C/min
[Yang et al, 2009]	$F_c = 1,00373 \cdot V - 0,05810$ pour E/C= 0,58 $R^2 = 0,94$ $F_c = 1,06208 V - 0,07085$ pour E/C= 0,68 $R^2 = 0,92$ $F_c = 1,03015 V - 0,06344$ Equation générale $R^2 = 0,93$	Essais sur éprouvettes 100x200 mm en béton ordinaire avec E/C =0,58 et 0,68 traité thermiquement après 28 jours à l'eau et puis mise à l'air libre tester à l'âge de7,30, 90,180 jours à des températures 400,500,550, et 600, la vitesse d'échauffement est 2,5°C/min,.
[Prasopchaichana, 2012]	La corrélation est faite en modifiant la position de récepteur et transmetteur de l'ultrason $f_c = 14.804e^{0.0002v}$ $R^2 = 0.63$ direct $f_c = 7.5391e^{0.003v}$ $R^2 = 0.70$ semi direct $f_c = 65583e^{0.0004v}$ $R^2 = 0.68$ indirect	Essais sur éprouvettes 150x150x150 mm en béton ordinaire traité thermiquement après 28 jours à l'eau et 07 jours à l'air libre à des températures 200, 300, 400, 500, 600, 700 et 800°C, la vitesse d'échauffement est 5°C/min
[Hager et al 2015]	$f_c = 44,62 \ln(V) + 8,73$ $R^2 = 0,93$ pour E/C=0.30 $f_c = 31,59 \ln(V) + 19,33$ $R^2 = 0,97$ pour E/C=0.45 $f_c = 22,34 \ln(V) + 18,88$ $R^2 = 0,95$ pour E/C=0.60	L'âge des éprouvettes de béton 90 jours, Essais sur éprouvettes 150x150x150 mm et cylindriques Ø100 mm, h = 200 mm) variant E/C et la température = 200°C, 400°C, 600°C, 800°C and 1000°C. La vitesse d'échauffement est 0.5°C/min

<p><b>[Mróz, et al 2017]</b> D'autres caractéristiques ont été corrélées module d'élasticité et résistance à la traction</p>	<p>F<sub>c</sub>= 64Ln V -19 (agrégat: Basalt) R<sup>2</sup>= 0,98                  F<sub>c</sub>= 54 Ln V-7, 6 (agrégat: Dolomie) R<sup>2</sup>= 0,89                  F<sub>c</sub>= 43Ln V +18 (agrégat: Granit) R<sup>2</sup>= 0,89                  F<sub>c</sub>= 46Ln V +8 (agrégat: gravier de rivière) R<sup>2</sup>= 0,94                  F<sub>c</sub>= 45Ln V +9,2 (for all agrégat) R<sup>2</sup>= 0,89                  E=644 V<sup>2,65</sup>(agrégat: Basalt) R<sup>2</sup>= 0,99                  E= 1221V<sup>2,24</sup>(agrégat: Dolomie) R<sup>2</sup>= 0,99                  E= 984 V<sup>2,40</sup>(agrégat : Granit) R<sup>2</sup>= 0,98                  E=1201V<sup>2,11</sup>(agrégat: gravier de rivière ) R<sup>2</sup>= 0,97                  E= 988V<sup>2,33</sup>(For all agrégats) R<sup>2</sup>= 0,97                  F<sub>t</sub>= 1,1V-0,05(agrégat : Granit) R<sup>2</sup>= 0,94                  F<sub>t</sub>= 1,92V-3,23 (agrégat: Balsate) R<sup>2</sup>= 0,98                  F<sub>t</sub>= 1,33 V-1,22 (agrégat: Dolomie) R<sup>2</sup>= 0,99                  F<sub>t</sub>= 1,74V-1,85(agrégat: gravier de rivière) R<sup>2</sup>= 0,97                  F<sub>t</sub>= 1,47V-1,2( For all agrégat) R<sup>2</sup>= 0,90</p>	<p>Cubes (150 mm x 150 mm x 150 mm) pour l'essai la résistance en compression et cylindriques (Ø100 mm, h = 200 mm) pour détermination de module d'élasticité et résistance en flexion, vitesse d'échauffement 0.5 °C/min et température (T = 20,200, 400, 600, 800,1000°C).</p>
<p><b>[Abdulkadir ,2017]</b></p>	<p>f<sub>cu</sub> = 18.604e<sup>0.2UPV</sup> R<sup>2</sup> = 0.69 All mixes cooled in Air                  f<sub>cu</sub> = 14.018 e<sup>0.26UPV</sup> R<sup>2</sup> = 0.84 All mixes cooled in water                  f<sub>cu</sub> = 16.016 e<sup>0.2319UPV</sup> R<sup>2</sup> = 0.7542 All mixes</p>	<p>cubes (150x150x150 mm), exposé pendant (en minutes) 0, 15, 30, 60 min.</p>

### I.6.5 L'analyse de régression et corrélation

L'objectif particulier est d'établir des relations qui permettront d'améliorer la précision de l'évaluation de la résistance du béton. Plusieurs outils et différentes approches peuvent être utilisés : récemment les réseaux de neurones artificiels ont montré des performances exceptionnelles comme des outils de régression, en particulier lorsqu'ils sont utilisés pour la reconnaissance des formes et l'estimation des fonctions ainsi il convient pour calculer des relations non linéaires [Atıcı U ,2011]

On peut utiliser pour décrire la relation entre observables et indicateurs le tableau I.5 présente le nombre des modèles empiriques qui sont disponibles dans la littérature pour étudier les relations entre la résistance du béton avec la vitesse ultrasonore  $f(V)$  et avec le rebond  $f(R)$  [Breysse, 2012]. Les modèles de régression les plus usuels sont la loi de puissance, la loi linéaire, la loi polynômiale et la loi exponentielle

**Tableau I.6** Nombre des modèles existants pour estimer la résistance du béton [Breysse, 2012].

Type de modèle	Forme	$f_c = f(V)$	$f_c = f(R)$
Exponentiel	$X = a e^{bY}$	26	8
Puissance	$X = a Y^b$	17	31
Linéaire	$X = a Y + b$	18	28
Polynôme (2)	$X = a Y^2 + b Y + c$	6	15
Divers		3	7

Des méthodes les plus connues dans le domaine scientifique et les plus appliquées en statistique pour l'analyse de données quantitatives c'est la régression. Elle est utilisée pour établir une liaison entre une variable et une ou plusieurs autres variables quantitatives, sous la forme d'un modèle mathématique. Si la relation est établie entre deux variables, on parlera de régression simple en exprimant une variable en fonction de l'autre. Si la relation établie entre une variable et plusieurs variables, on parlera de régression multiple.

### I.6.5.1 Définition du coefficient de corrélation linéaire

Le coefficient de corrélation linéaire, noté  $r$  est un nombre sans dimension qui mesure l'intensité de la liaison linéaire entre deux variables observées dans un échantillon de taille  $n$ . Le coefficient de détermination  $r^2$  (Eq. I.2) est un indicateur statistique qui permet de juger la qualité d'une régression, simple ou multiple.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad r^2 = \frac{\text{variation expliquée}}{\text{variation totale}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{éq I.2})$$

De même que le coefficient de détermination,  $r^2$  représente le pourcentage de la variation de  $y$  expliquée par la variation de  $x$ .

On a toujours :  $-1 \leq r \leq 1$

- La corrélation parfaite, correspondant au cas  $r = 1$ , se rencontre très peu en pratique, mais sert de point de comparaison. Plus  $r$  est proche de 1, plus les variables  $x$  et  $y$  seront étroitement liées. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres calculés sont ceux qui déterminent la distribution des données.
- Si  $x$  et  $y$  sont indépendants, on a bien sûr  $r = 0$ . Mais la réciproque n'est pas nécessairement vraie. Si  $r = 0$ , on peut affirmer qu'il n'existe pas de liaison linéaire entre  $x$  et  $y$ . Mais il peut exister une liaison d'un autre type. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des données

## I.7 Conclusion

L'intérêt de ce chapitre est de faire un aperçu sur les connaissances et les résultats expérimentaux requis par différents chercheurs sur le comportement du béton à des hautes températures.

À la lumière de ce qui est mentionné dans ce chapitre, on peut conclure que:

- Sous l'effet de la température, le béton subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et de ses propriétés mécaniques.
- L'eau, présente dans le béton sous forme libre, liée ou adsorbée, s'échappe progressivement et représente la principale cause de perte de masse, d'augmentation de la porosité et de la perméabilité et la destruction de la matrice cimentaire.
- une baisse des propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction, module d'élasticité) est remarquée sous l'effet de l'augmentation de la température.
- En vue d'améliorer le comportement thermique du béton, des fibres de polypropylène sont utilisées comme des solutions techniques afin d'améliorer la stabilité thermiques des bétons. La fusion de fibres polypropylène entre 160°C et 170°C et ensuite leur

vaporisation autour de 340°C offre une porosité supplémentaire qui facilite le transport de flux au sein du matériau.

- Les fibres métalliques ou de carbone, sont utilisées dans le béton dans les cas traditionnels pour limiter la propagation de fissures et rendre le béton plus ductile. L'étude de l'influence des fibres métalliques et de carbone conduit d'une façon globale, à une influence positive puisque les propriétés mécaniques qui sont améliorées par rapport aux bétons fibrés de polypropylène ou des bétons sans fibres.
- Plusieurs recherches ont été menées sur l'utilisation d'un mélange ou combinant de fibres de polypropylène et de fibres métalliques ou des fibres de carbone dans les bétons. D'une façon générale, une stabilité thermique de ces bétons est notée. Les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de mélange de fibres semblent meilleures que celles des bétons sans fibres.
- Il y a une nécessité d'estimer la résistance du béton pour des raisons de rénovation, de modification ou changement d'usage de la construction ou après une défaillance de structure ou dommage par le feu. Les techniques comprennent diverses méthodes telles qu'un marteau de rebond de Schmidt, vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV), analyse thermique différentielle (DTA), analyse gravimétrique thermique (TGA), calorimétrie, analyse pétrographique, analyse d'image sont très utiles et utilisées dans le cas de bétons exposés à des hautes températures.
- La méthode de la vitesse des impulsions ultrasonores et la technique de marteau à rebond constituent la méthode non destructive la plus simple, la plus rapide et la moins onéreuse pour évaluer la résistance du béton sur place et en laboratoire.

## *CHAPITRE II*

### *MATERIAUX ET PROTOCOLES D'ESSAIS*

## II.1 Introduction

Afin d'étudier l'évolution des propriétés mécaniques et physiques de béton en fonction de la température, trois types de béton en été confectionnés un béton de haute performance (BHP), un béton de haute résistance (BHR) et un béton ordinaire (BO). Des différents bétons de haute performance confectionnés avec des fibres de polypropylène, de fibres métalliques et fibres de carbone et le mélange de deux types de fibres afin d'étudier l'effet des fibres sur le comportement du béton porté à une température élevée. Des éprouvettes ont été confectionnées, conservées, puis soumises à un traitement thermique. Les propriétés physiques et mécaniques sont déterminées à la température ambiante et à des températures 200°C, 300°C, 400°C, et 600°C. Des essais destructifs et non destructifs sont utilisés dans la méthodologie expérimentale.

Le but de ce chapitre est de présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, les compositions des bétons testés, la manière dont ils ont été confectionnés et la façon dont ils ont été testés.

## II.2 Programme expérimental

Le programme expérimental réalisé a pour but d'examiner le comportement des bétons exposés à de hautes températures en appliquant des essais destructifs et non destructifs. Il comprend :

- Des mesures qui ont été réalisées pour déterminer les propriétés mécaniques : résistance en compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm, et la résistance en flexion sur éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm en béton à la température ambiante et chauffés à 200°C, 300°C, 400°C, et 600°C.
- Des mesures qui ont été réalisées pour évaluer la perte de masses sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm et prismatiques 10x10x40 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour évaluer la porosité à l'eau.
- Des mesures qui ont été réalisées pour mesurer les valeurs de la vitesse de propagation des impulsions ultrasonores par l'ultrason sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour mesurer les valeurs de la dureté de la surface des bétons par le scléromètre sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour mesurer les valeurs de la densité de fissuration causée par les hautes températures sur éprouvettes cubiques 7x7x7 cm et 10x10x10 cm.
- Microscope optique Magnit 24x MPB-2 du béton soumis à haute température peut nous permettre d'observer la largeur des fissures développant sur la surface.
- Une étude de la microstructure sur des observations au Microscope Electronique à Balayage MEB.

### II.3 Caractéristiques des matériaux

Pour notre étude, On a choisi de fabriquer les différents bétons à partir d'un squelette granulaire issu d'un mélange tertiaire de gravier, de gravillon et de sable, d'un ciment et d'un superplastifiant, ainsi trois types de fibres : métalliques, carbone et polypropylène.

#### II.2.1 Ciment

Un ciment Portland CPJ CEM II/ A 42,5 utilisée provenant de la cimenterie d'Aïn-Touta, constitué essentiellement de 94% de clinker et de gypse et 6% de calcaire. La composition chimique et les caractéristiques physico-mécaniques du ciment sont données dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** Composition chimiques et caractéristique physico-mécaniques du ciment, (fiche technique 2013).

Eléments	Teneur (%)	Caractéristiques Physiques		Caractéristiques mécaniques	
CaO	56,20	Poids spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	3,03	Résistance en	2j 21,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,60	Reterait (µm/m)	834	compression	7 j 34,33
SiO <sub>2</sub>	24,95	Gonflement (µm/m)	0,00	(MPa)	28 j 44,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,81	S.S Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4296	Résistance en	2j 4,54
MgO	1,61	Consistance	28,65	compression	7 j 6,26
Na <sub>2</sub> O	0,45	Debut de prise (h :min)	2h :04	(MPa)	28 j 7,22
K <sub>2</sub> O	0,91	Fin de prise (h :min)	3h :06	Lim Inf R.C à 2 jrs	19,03
CL	0,016	Exp à chaud (mm)	0,37	Lim Inf R.C à 28 jrs	44,93
SO <sub>3</sub>	2,85	Refus sur tamis 45 µm(%)	9,94	Lim Sup R.C à 2 jrs	53,41
P.A.F	4,75				
Résidus insolubles	10,55				
CAO Libre	0,77				

#### II.2.2 Granulats

Le choix des granulats s'est porté sur des granulats calcaires concassés propres de la carrière d'Aïn-Touta (wilaya de Batna). Ces granulats ont été utilisés pour la plupart des constructions dans l'est de l'Algérie. Leurs caractéristiques sont détaillées dans le tableau II.2. La figure II.2 donne les courbes granulométriques de ces trois types de granulats (gravier 3/8 et 8/15 et sable 0/5). Le sable utilisé est celui de l'oued Djedi de Biskra de classe granulaire est 0/5.

**Tableau II.2** Propriétés physique des: gravillon, gravier, sable.

Propriétés physiques		G 3/8	G8/15	S 0/5
Masse volumique absolue (Kg/cm <sup>3</sup> )		2.63	2.61	2.57
Masse volumique apparente (Kg/cm <sup>3</sup> ) [NF. 18-555, 2003]		1.41	1.42	1.67
Equivalent de sable (%) [ NF.P 18-598,1997]	ESV (visuel)			80.82
	ESP (piston)			78.01
Coefficient los Anglos (%) [ NF. P.18-573,1990]			22	
Module de finesse				2.58



Gravier 8/15

Gravillon 3/8

**Figure II.1** Aperçu des granulats utilisés.



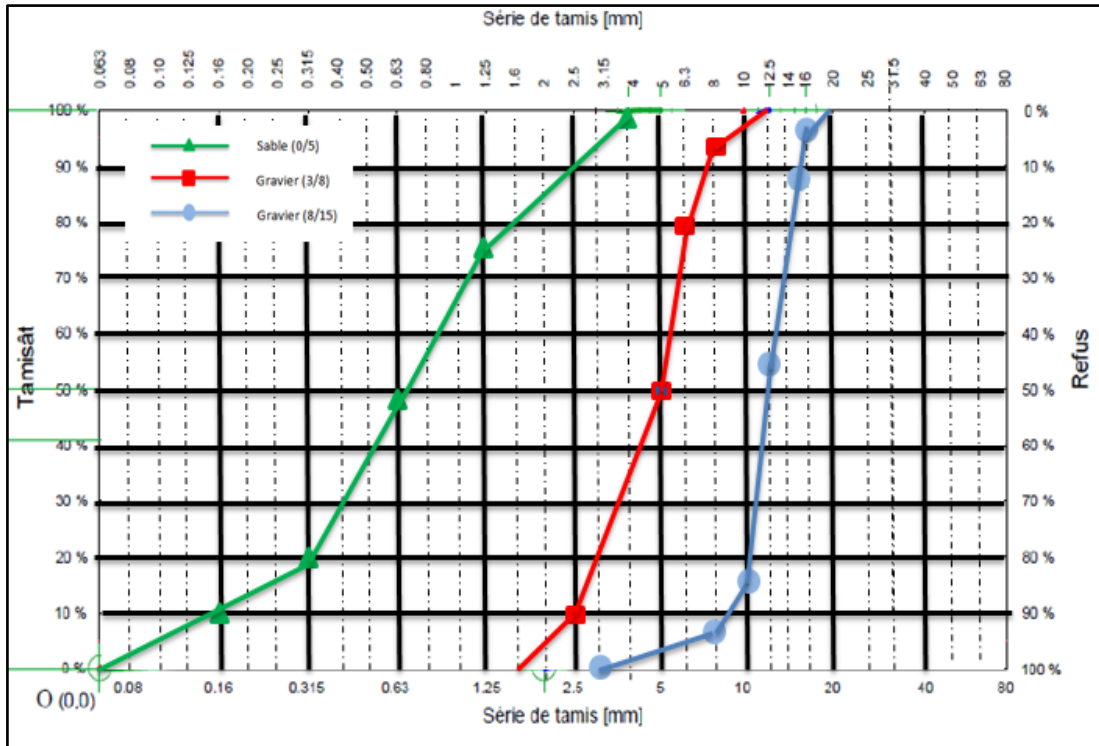


Figure II.2 Courbes granulométriques du sable, gravillon, gravier selon [NF. P 18-431,1990].

### II.2.3 L'adjuvant

Sika Viscocrete Tempo 12 est un superplastifiant haut réducteur d'eau (SP/HRE) à base de polycarboxylate-polyacrylate produit par Sika. Il s'agit d'un adjuvant liquide marron sans chlore. Il est commercialisé par la société Sika El kalitouss Algérie. Ces caractéristiques sont indiquées dans le tableau II.3.

Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.



Tableau II.3 Caractéristique de l'adjuvant.

Nom commercial	Sika Viscocrete Tempo 12
Masse volumique à 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,06±0.01
Teneur en chlorure (%)	< 0.1
Extrait sec (%)	30.2 ±1.3
Na2O eq (%)	<1%
Ph	6±1

Figure II.3 Adjuvant Sikaviscocrete Tempo 12.

## II.2.4 Les fibres

### II.2.4.1 Les fibres métalliques

Les fibres de SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé. Elles comportent un enrage mécanique constitué de crochets aux extrémités. Elles sont libres non encollées. Elles sont présentées en sacs papier de 20kg.



Figure II.4 Fibres métalliques.

Tableau II.4 Caractéristiques des fibres de métalliques.

Nature	Fil d'acier tréfilé sans revêtement
Longueur	50 mm
Diamètre	1.05 mm
Elancement	48
Nombre de fibres	2800 fibre/Kg
Résistance en traction	1000Mpa (sur fil)
Température de fusion	1380°C
Masse volumique	7.85 Kg/ dm <sup>3</sup>

### II.2.4.2 Les fibres polypropylène

Les fibres utilisées sont des monofilaments fins de polypropylène sont de forme cylindrique et ont une longueur de 12mm. Les fibres sont livrées sous forme d'amas et se dispersent facilement lors du malaxage (figure II.5).



Figure II.5 Fibres de polypropylène.

Tableau II.5 Caractéristiques des fibres de polypropylène.

Masse volumique	0.91 Kg/dm <sup>3</sup>
Température de fusion	160 – 170 °C
Langueur	12 mm

### II.2.4.3 Les fibres de carbone

Les fibres utilisées sont des filaments fins de carbone coupé en longueur de 12 mm. Ces caractéristiques sont indiquées dans le tableau II.6.

Tableau II.6 Caractéristiques des fibres de carbone.

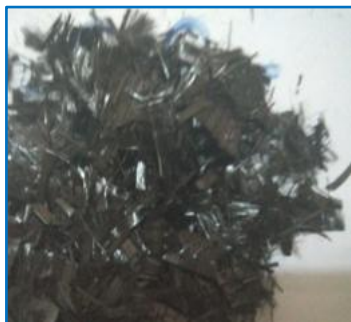


Figure II.6 Fibres de carbone.

Epaisseur	0,13 mm
Langueur des fibres	12 mm
Masse volumique	1,6 Kg/dm <sup>3</sup>
Résistance en traction	4 300 MPa
Module d'Elasticité en traction	234 000 MPa
Elongation à rupture	1,8 %

### II.2.5 L'eau

L'eau potable recueillie directement au robinet. Aucune analyse poussée n'a été effectuée dessus. Elle convient pour la confection du béton selon des normes [NF.P 18-303,1990] concernant les concentrations des matières en suspension et les sels dissous. Une eau de mauvaise qualité peut avoir des effets néfastes sur le béton tels que la diminution de la résistance mécanique, l'apparition des taches nuisibles sur la surface du béton, la corrosion ...etc. La masse volumique retenue pour le calcul des formulations est de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

### II.3 Formulations

Nous avons confectionné différentes formulations du béton, qui permettent de couvrir la gamme des bétons ordinaires à ceux des bétons à hautes performances. Nous distinguons trois types de béton sans fibres en fonction de rapport E/C. Ce rapport varie de 0.35 pour le béton BHP et 0.45 pour BHR et finalement 0.65 pour le béton BO couvrant la gamme de résistance de  $25 \text{ à } 60 \pm 1.0 \text{ MPa}$  à 28 jours

- Béton à hautes performances **B**
- Un béton intermédiaire (entre le **BO** et le **BHP**) **B1**
- Béton ordinaire **B2**.

La composition des bétons sans fibres est obtenue en utilisant la méthode de formulation de Dreux-Gorisse [Dreu, 1998]. Concernant la composition des bétons élaborés, le rapport volumique G/S est gardé fixe de l'ordre de  $1.70 \pm 1$  pour des raisons d'ouvrabilité, la composition du squelette granulaire a été modifiée pour atteindre une ouvrabilité satisfaisante au moment du coulage (entre un béton plastique et très plastique) selon la norme [NF.P 18-451]. Les compositions des bétons sans fibres sont présentées dans le tableau II.7. Le dosage en adjuvant est ajusté en réalisant des essais préliminaires permettant d'avoir une ouvrabilité satisfaisante au moment du coulage.

En ce qui concerne les compositions des bétons de fibres métalliques, nous avons formulé deux formulations de bétons BHP (désignant par BM) et BHR (désignant par B1M). Les fibres métalliques sont utilisées dans des proportions de 15 –19.5 et 39 kilogrammes dans un mètre cube de béton soit un pourcentage volumique respectif de 0.19, 0.25 et 0.50 %. La désignation de ces bétons est la suivante : **BM15** ou **B1M15**. Le chiffre désigne le dosage en kilogramme de fibres métalliques. Ce choix de composition est fait dans le but de voir l'impact des fibres métalliques sur l'évolution des performances mécaniques résiduelles et l'évolution des propriétés physiques, dans le cas d'un béton haute résistance et d'un béton à hautes performances. Le tableau II.8 montre la composition des bétons avec les fibres métalliques.

Le choix de dosage de fibres métalliques selon [CSA A23.1, 2005], qui spécifie la quantité d'insertion sera entre 15 to 45 kg/m<sup>3</sup>.

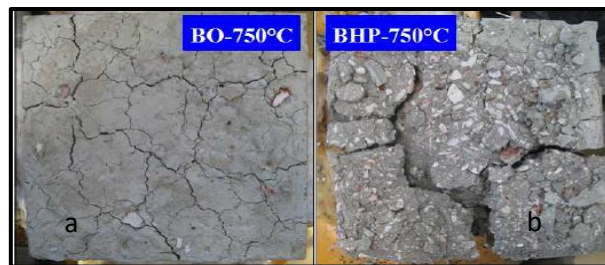
Afin de mettre en évidence l'influence des fibres sur le comportement du béton, notre choix se porte sur le maintien du même volume de pâte, et le même rapport E/C pour toutes les compositions. Notre choix est fait sur le béton à matrice hautes performances (BHP) avec un rapport E/C de 0.35 puisque c'est le béton le plus endommageable et influençable par l'élévation de température (Figure II.7). La composition des ces bétons est résumée dans le tableau II.9.

Les dosages en fibres de polypropylène sont de 0.5 – 1 et 1.5 kilogrammes par mètre cube de béton soit un pourcentage volumique respectif de 0.055 – 0.11 et 0.17 %. Le choix de dosage maximale de fibres polypropylène était selon la littérature (Selon les résultats du projet national français [BHP, 2000] et [Pilya, 2010], le dosage des fibres de polypropylène optimal s'est avéré être proche de 1,5 kg/m<sup>3</sup>.

Concernant les dosages en fibres de carbone sont de 2 – 4 et 8 kilogrammes par mètre cube de béton soit un pourcentage volumique respectif de 0.13 – 0.25 et 0.5 %.

D'après [Tanyildizi, 2008, Tanyildizi, 2018], le dosage des fibres de carbone optimal s'est avéré être proche de 2 kg/m<sup>3</sup>.

Concernant le dosage de mélange de fibres sera choisie dans le but d'avoir le même pourcentage volumique (quelques soit le type de fibres).



**Figure II. 7** Endommagement de la surface chauffée à 750° du béton : a) béton ordinaire b) béton à haute performance [Xing, 2011].

La désignation des bétons formulées se fait de la façon suivante : désigne nos bétons sont nommés par leur première lettre, c'est à dire «B» pour le béton, puis la deuxième lettre désigne « M » pour les fibres métalliques, ou « P » pour les fibres polypropylène ou « C » pour les fibres de carbone. Le nombre venant tout de suite après indique la quantité des fibres en Kg, pour le mélange de fibres on ajoute troisième lettre désignant les fibres ajoutées au mélange ainsi que le signe «fois» puis la deuxième de la quantité des fibres en Kg et les deux chiffres sont entre deux parenthèses.

**Tableau II.7** La composition des bétons sans fibres pour 1m<sup>3</sup>.

Bétons Constituons	B	B1	B2
Ciment	450	400	330
Eau	158	181	214
Graviers 3/8	182	180	181
Gravier 8/15	956	951	956
Sable 0/5	658	654	657
Superplastifiant (%)	1.5	1	-
Superplastifiant (Kg)	6.75	4	-
E/C	0.35	0.45	0.65
Mv	2404	2370	2340

**Tableau II.8** La composition des bétons de fibres métalliques pour 1m<sup>3</sup>.


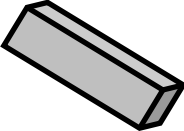



Bétons Constituons	BM 15	BM 19.5	BM 39	B1M 15	B1M 19.5	B1M 39
Ciment	450	450	450	400	400	400
Eau	158	158	158	181	181	181
Graviers 3/8	182	182	182	181	181	181
Gravier 8/15	952	951	948	947	946	943
Sable 0/5	653	652	649	650	649	646
Superplastifiant (%)	1.7	1.9	2	1.2	1.4	1.6
Superplastifiant (Kg)	7.65	8.55	9.00	5.40	6.30	7.20
Fibres métalliques (Kg)	15	19.5	39	15	19.5	39
Fibres (%)	0.19	0.25	0.5	0.19	0.25	0.5
E/C	0.35	0.35	0.35	0.45	0.45	0.45
MV	2417,65	2421	2435	2379,4	2382,8	2397,2

**Tableau II.9** La composition des bétons de différents types de fibres pour 1m<sup>3</sup>.

Bétons Constituons	Béton avec fibres polypropylène			Béton avec fibres carbone			Béton avec fibres métalliques	Béton avec mélange de fibres		
	BP 0.5	BP 1	BP 1.5	BC 2	BC 4	BC 8	BM 15	BPM (1x15)	BMC (15x2)	BPC (1.5x2)
Ciment	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Eau	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158
Graviers 3/8	182	182	182	182	182	182	182	182	182	182
Gravier 8/15	954	953	953	953	951	948	952	955	955	955
Sable 0/5	654	654	653	653	652	648	653	653	653	653
Superplastifiant (%)	2	2.1	2.2	2.7	2.8	3	1.7	2,8	2,8	2,8
Superplastifiant (Kg)	9.00	9.45	9.90	12.15	12.60	13.50	7.65	12.60	12.60	12.60
Fibres de polypropylène (%)	0.055	0.11	0.17					0.11		0.17
Fibres Métalliques (%)							0.19	0.19	0.19	
Fibres de carbone (%)				0.13	0.25	0.5			0.13	0.13
Fibres combinée(%)								0.30	0.32	0.30
E/C	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Mv	2407	2406	2405	2410	2409,6	2407,5	2417,6	2427	2428	2414

Le programme expérimental est regroupé dans le tableau II.10. Ce tableau propose une vue d'ensemble des essais réalisés dans le cadre de cette thèse

**Tableau II.10 Programme expérimentale**

Essais	T(C°)	B	B1	B2	B1M 15	B1M 19.5	B1M 39	BM 15	BM 19,5	BM 39	BP0.5	BP1	BP1.5	BC 2	BC 4	BC 8	BPM (1x15)	BMC (15x 2)	BPC (1,5x2)
Résistance en compression +Perte de masse + Vitesse des ondes soniques+ Indice de rebondissement 	20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	200	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	300	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	400	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	600	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
éprouvette 10x10x10 cm Résistance en flexion +Perte de masse 	20	3	3	3	-	-	-	3	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3
200	3	3	3	3	-	-	-	3	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3
300	3	3	3	3	-	-	-	3	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3
400	3	3	3	3	-	-	-	3	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3
600	3	3	3	3	-	-	-	3	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3
Porosité à l'eau 	20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
200	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
300	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
400	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
600	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Densité des fissures 	20	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
400	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
600	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7x7x7 cm et 10x0x10 Microscope à balayage 	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-

## II.4 Fabrication et conservation des éprouvettes

### II.4.1 Fabrication et mise en œuvre

Les fibres ont été dispersées à la main pour assurer une bonne répartition dans la masse du béton. Le déroulement des gâchées de béton est décrit par [Qian et al, 2000]:

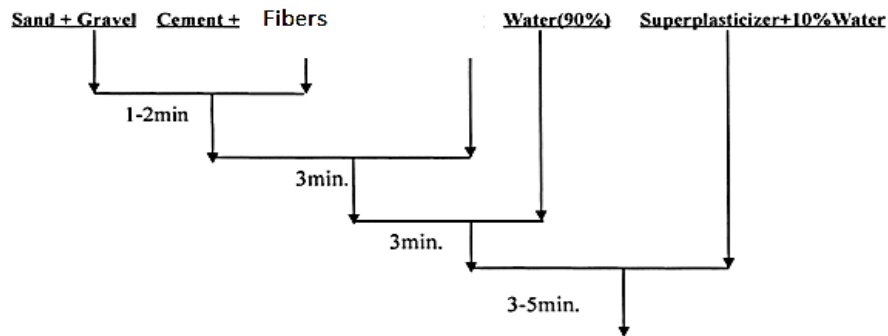


Figure II.8 Procédure de mixage de béton utilisé.

Le remplissage des moules est fait en une couche pour des éprouvettes. Une fois remplis, les moules sont recouverts de sacs plastiques. Pour réaliser les essais, nous utiliserons des moules cubiques en métal (acier) de dimensions 10x10x10cm puis 7x7x7cm et des moules prismatiques de dimensions 10x10x40cm selon la norme [NF P 18-400].

### II.4.2 Conservation

Les conditions de conservation sont les suivantes :

- dans leurs moules, 1 jour au laboratoire à température ambiante, les moules sont recouverts d'une bâche en plastique afin de les protéger de la dessiccation.
- démoulées, immergées dans des bacs remplis d'eau en salle maintenue à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 28 jours.
- Les éprouvettes sont conservées et recouvertes de sac plastique pendant 28 jours de plus à l'air ambiant afin de diminuer les gradients hydriques et thermiques dans les éprouvettes ainsi diminuer en conséquence l'endommagement des éprouvettes lors du traitement thermique.
- Au total les éprouvettes sont conservées jusqu'à cinquante-six jours au minimum.



Figure II.9 a) Mélange des constituants b) Remplissage des moules c) Conservation des éprouvettes

## II.5 Dispositif expérimental

### II.5.1 Cycle de chauffage – refroidissement

D'après les travaux réalisés dans la littérature, l'étude du comportement des bétons exposés à des températures élevées peut être effectuée dans la marge de températures entre 20°C et 1200°C (Hager 2004). Cependant, dans notre travail une plage de température choisie est inférieure, c'est-à-dire, entre 20°C et 600°C. Puisque d'après [Peng 2006], au-delà de 600°C le béton est généralement endommagé au point de ne plus être suffisamment résistant structurellement.

Le chargement thermique se fait en trois phases :

- La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de 10°C/min (Figure II.10.a), plus modéré que le feu ISO (Figure II.10.b), mais générant toutefois un gradient thermique important contrairement à la vitesse de chauffage utilisée pour la caractérisation des bétons.
- La seconde est un palier de température constante dans le four afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes. Elle dure une heure de temps.
- La dernière phase les éprouvettes sont ensuite refroidies naturellement dans le four (refroidissement lent). Enfin, les éprouvettes sont sorties du four aux alentours de 20°C. Cette phase de refroidissement des éprouvettes n'est pas pilotée. Elle se fait de façon naturelle en fonction de la température à l'intérieur du four qui est maintenu fermé. On souhaite en effet s'assurer que l'endommagement induit dans le béton résulte seulement de l'effet de la température.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi quatre cycles de chauffage – refroidissement de la température ambiante jusqu'à la température de 200°C, 300°C, 400°C, 600°C, La vitesses d'échauffement est choisie de façon que ce scénario d'exposition thermique permette d'étudier comment l'histoire de la température a influencé la dégradation de la résistance.

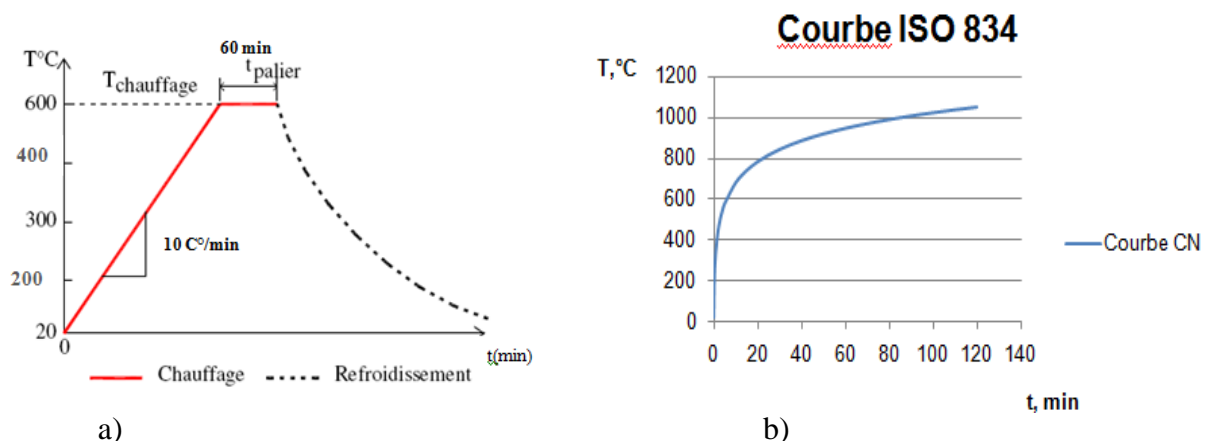


Figure II.10. a) Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 10°C/min) b) courbe ISO 834



## II.5.2 Dispositif de chauffage

Deux fours électriques programmables sont utilisés de dimension 250 x 255 x 355 mm permettant de contenir trois éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm et autre four de dimensions 380 x 380 x 480 mm permettant de contenir trois éprouvettes prismatiques de dimensions 10x10x40 cm. Ces deux fours sont pilotés par un régulateur programmeur, relié à un thermocouple placé dans les fours, offrant la possibilité à un opérateur d'installer des programmes prédéfinis et permettant l'enregistrement des températures à l'intérieur du four. Une étuve utilisée à la température de séchage 80° afin de déterminer la porosité. (Figure II.11)



Figure II.11 a) la position des éprouvettes dans deux fours.



Figure II.11 b) l'étuve utilisée dans notre étude.

## II.6 Mesure des propriétés mécaniques

### II.6.1 Essais mécaniques

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

### II.6.2 Essai de compression

L'essai de compression a pour but de connaître la résistance à la compression du béton. Les mesures de résistance à la compression ont été réalisées selon la norme [NF P. 18-406]. L'application d'une charge mécanique croissante jusqu'à la rupture est effectuée par une presse hydraulique. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. La charge de rupture,  $P$ , est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit  $S$  la section orthogonale de l'éprouvette ; la résistance,  $F_c$ , est exprimée en MPa obtenue par la formule suivante :

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{II.1})$$



Figure II.12 Mise en place des éprouvettes sur presse hydraulique (La résistance en compression).

### II.6.3 Essai de flexion

C'est un essai destructif est réalisé sur des éprouvettes prismatiques ( $10 \times 10 \times 40$ )  $\text{cm}^3$  selon les normes [NF P. 18-407]. Il s'agit de déterminer la résistance à la flexion de quatre points de d'une charge au moyen de deux rouleaux supérieurs et de deux rouleaux inférieurs distancés de  $3a$  ( $a = 10$  cm) et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieurs et inférieurs) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette. Conformément à la norme NF EN 12390-525 [Afn, 2001] (voir Figure II.13). La résistance à la traction en MPa est la moyenne des résultats de trois éprouvettes. La contrainte de traction par flexion est donnée par la relation ci-dessous :

$$R_f = \frac{3F}{a^2} \quad (\text{II.2})$$

Ou  $R_f$  : contrainte de traction (en MPa).

F : charge de rupture (en KN), b: coté de la section carrée (en mm), b=100mm.



Figure II.13 Machine d'essai de flexion.

## II.7 Mesure des propriétés physiques

L'analyse des propriétés physiques ont été effectuées après avoir soumis les éprouvettes aux cycles de chauffage.

### II.7.1 Perte de masse

La perte de masse des éprouvettes est une donnée importante de l'étude du béton exposé à des hautes températures, elle permet de suivre l'évolution du poids du béton après application des cycles thermiques. L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière qu'ont subie les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

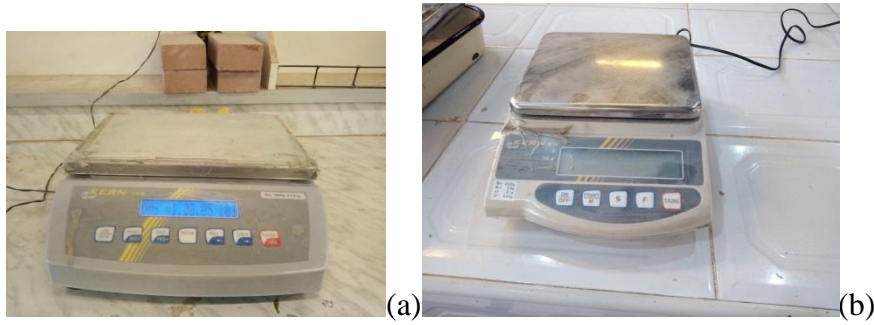
$$perte\ de\ masse = \frac{m_{ambient} - m_{après\ refroidissement}}{m_{ambient}} \times 100 \quad (II.3)$$

Avec:

$m_{ambient}$  La masse de l'éprouvette à température ambiante avant le chauffage.

$m_{après\ refroidissement}$  La masse l'éprouvette après refroidissement à la sortie du four.

Les essais de mesure de la perte de masse des éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm sont réalisés sur une balance à une capacité de 10 kg et une précision de 1 g (figure II.14 (a)), tandis qu'aux éprouvettes cubiques de béton 10x10x10 cm, On utilise une balance d'une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g (figure II.14 (b)).



**Figure II.14** (a) Balance a une capacité de 10 kg et une précision de 1 g  
 (b) Balance d'une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g.

### II.7.2 La porosité accessible à l'eau

L'essai de porosité accessible à l'eau a consisté à mesurer la porosité des éprouvettes de béton afin de déterminer le pourcentage de vide pouvant être occupé par l'eau. La technique utilisée est une variante de la porosité à l'eau par pesée hydrostatique recommandée par [l'AFREM.97]. Les échantillons testés sont prélevés sur les éprouvettes après les essais mécaniques (essai de compression), pour chaque champ de température, l'essai est réalisé sur divers échantillons. Ils sont conservés dans des sacs étanches, puis mis dans une étuve à une température de 80°C jusqu'à masse constante. Nous avons choisi cette température afin de réduire l'effet de la température sur les hydrates pour les échantillons de référence. Lorsque les échantillons sont entièrement secs, ils sont immergés dans de l'eau jusqu'à saturation complète. Des mesures de masse saturée sont effectuées au fil du temps jusqu'à la saturation complète. Une fois que l'échantillon est saturé, une pesée en état saturé immergé est réalisée puis elle est suivie de la pesée en état saturé après que l'échantillon soit essuyé avec un linge pour enlever le surplus d'eau de la surface.

Les échantillons testés sont ceux issus des chauffages à 80°C, 200°C, 300°,400°C, et 600°C, en plus des échantillons non chauffés.

La porosité  $P$  exprimée en pourcentage volumique est donnée par l'équation suivante:

$$p = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sat} - m_{sat}^{im}} \rho_e \quad (II.4)$$

avec  $m_{sat}$  la masse d'échantillon saturé séché en surface,  $m_{sec}$  la masse de l'échantillon sec après étuvage,  $m_{sat}^{im}$  la masse de l'échantillon saturé immergé et  $\rho_e$  la masse volumique de l'eau.



**Figure II.15** Echantillons utilisés pour la détermination de la porosité à l'eau et dispositif de la pesée hydrostatique.

## II.8 Mesure par essais non destructifs

### II.8.1 Vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Cette technique est standardisée par la norme NF P 18-418. L'équipement utilisé pour la mesure de la vitesse de l'ultrason est le PUNDIT. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. Dans le cas d'un béton au feu, l'élévation de la température provoque une modification physico-chimique du matériau, l'auscultation sonique, basée sur la mesure de temps parcourus et d'énergie transmise, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation. La vitesse des ondes,  $V$ , est calculée par la formule :

$$v = \frac{L}{t} \quad (\text{II.5})$$

Où :  $L$  est la distance entre les transducteurs (m). La longueur de parcours de l'onde doit être supérieure ou égale à 10 cm.

$t$  est le temps de propagation (s).

Selon le chercheur Whitehurst, 1966, il a donné une évaluation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions :

- ✓  $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$  béton de faible résistance,
- ✓  $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$  béton de moyenne résistance,
- ✓  $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$  béton à haute résistance,
- ✓  $V \geq 4200 \text{ m/s}$  béton à très haute résistance.



**Figure II.16** Ultrason de PUNDIT

### II.8.2 Dureté de la surface

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours (EN 12504-2). Cet essai a été réalisé avec le scléromètre à béton original Schmidt modèle N. Les scléromètres (figure II.17) sont conçus pour évaluer la résistance à la compression du béton dans une plage comprise entre 10 et 70 MPa. Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse.



Figure II.17 Le Scléromètre

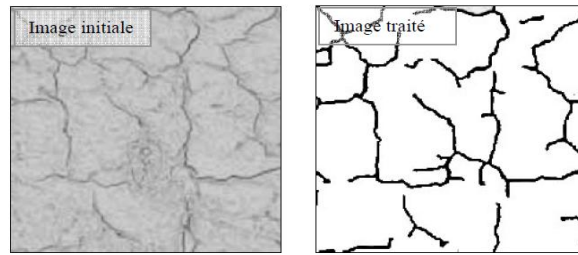
### II.8.3 Analyse par traitement d'images

L'analyse par traitement d'images est une technique non destructive. L'image numérique est l'image dont la surface est divisée en éléments de tailles fixes appelés cellules ou pixels, ayant chacun comme caractéristique un niveau de gris ou de couleurs prélevé à l'emplacement correspondant dans l'image réelle, ou calculée à partir d'une description interne de la scène à représenter [Toumi 2010]. Elle est utilisée dans des nombreuses disciplines très variées, citons par exemples : les sciences des matériaux, les sciences de la vie, l'astronomie, la reconnaissance automatique des formes ...

Pour pouvoir manipuler une image sur un système informatique, il est avant tout nécessaire de lui faire subir une transformation qui la rendra lisible et manipulable par ce système. Ces systèmes de saisie, dénommés optiques, peuvent être classés en deux catégories principales :

- les caméras numériques,
- les scanners.

L'objectif de la méthode de traitement des images est applicable pour quantifier la densité de fissuration. Les informations sur la densité et la répartition des fissures sont très utiles pour déterminer les températures minimales auxquelles le béton a été exposé. Pour la détermination de la densité de fissuration, exprimée par mm de longueur de fissure par  $\text{cm}^2$ . La figure II.18 montre un exemple de la densité de fissuration.



**Figure II.18** Densité de fissuration (BO 1050 °C) [Toumi, 2010]

Pour déterminer l'évolution des fissures les étapes suivantes sont suivies :

- Les observations des fissures sont réalisées à l'œil nu. Elles permettent de donner une première appréciation de l'état global des éprouvettes après leur refroidissement et l'apparition des macrofissures et le changement de couleur sur les surfaces exposées à hautes températures.
- Les observations des fissures sont réalisées par microscope optique pour évaluer la largeur de l'ouverture des fissures.
- La densité des fissures est déterminée par traitement d'image, on utilise un scanner à plat de haute résolution pour l'acquisition des images, puis analysée grâce à un logiciel de traitement d'images comme logiciel libre « Image J » « visilog »...etc.

#### **II.8.4 Les observations des fissures au microscope optique**

Le microscope optique est un instrument qui permet de distinguer des éléments invisibles à l'œil nu, le microscope optique (Magnit 24x MPB-2) permet un agrandissement d'environ 24x. À cette échelle, nous pouvons évaluer la largeur de l'ouverture des fissures et la température correspondante et c'est l'objectif de la méthode.



**Figure II.19** Microscope optique Magnit 24x MPB-2.

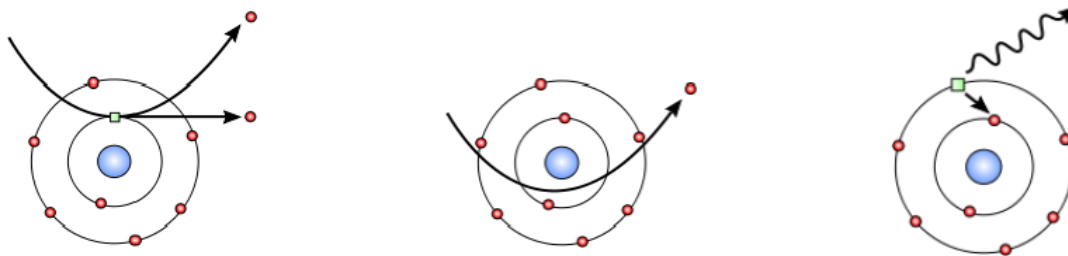
Microscope optique Magnit 24x MPB-2 est un microscope de mesure de fissure normes BS1881:204 - DIN 1045, pour la détection des fissures dans les structures de béton. Avec source lumineuse réglable, grossissement 24x, dans coffret, poids 600 g.

## II.9 Microscope électronique à balayage (MEB)

L'objectif de cette méthode est de donner des informations supplémentaires sur les microfissures et leurs évolutions qui apparaissent au sein du béton suite à l'augmentation de la température.

Le béton est un matériau non conducteur, alors pour l'observation de l'échantillon, il doit être métallisé juste avant de l'introduire dans la chambre du microscope. Il est donc important de le rendre conducteur. La métallisation se fait à l'or.

Le principe du microscope électronique à balayage (MEB) est de balayer avec un faisceau d'électrons de haute énergie et très focalisé suivant une série de lignes parallèles sur la surface de l'échantillon à analyser. Le faisceau d'électrons se forment des électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons Auger ou rayons X (figure II.20). Chacun de ces effets peut donner lieu à la formation d'une « image ». Les électrons rétrodiffusés résultent du contact entre les électrons du faisceau primaire et des électrons des couches proches du noyau de l'atome touché elles permettent d'avoir une image de contraste chimique ou numéro atomique. Par contre, les rayons X caractéristiques de chaque élément entrant dans la composition chimique de l'échantillon, elles permettent de déterminer la nature de l'élément. Dans notre cas on s'intéresse aux des électrons secondaires qui est le mode habituel de formation d'images pour les microscopes à balayage courants. Elles permettent d'obtenir des renseignements sur la topographie de la surface observée.



[a] Électron secondaire.

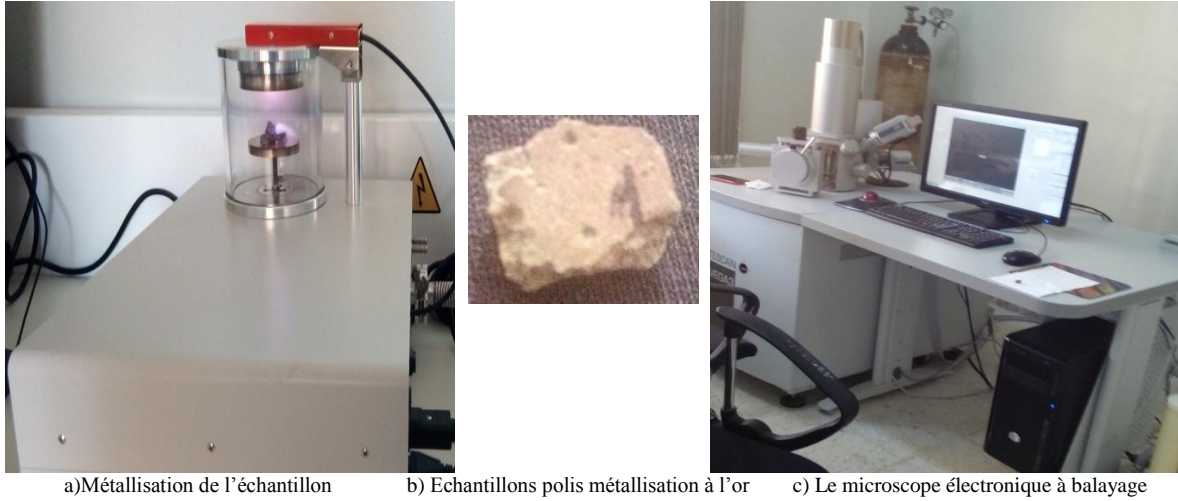
[b] Électron rétrodiffusé.

[c] Émission de rayons X.

**Figure II.20** Les différents résultats de l'interaction du faisceau d'électrons avec les atomes de l'échantillon [Razafinjato, 2015]

Afin de réaliser cet essai on utilise un microscope électronique à balayage (MEB). Nous avons procédé différents grossissements à partir d'un microscope électronique à balayage (MEB) sur surfaces polies et métallisées. Les analyses ont été faites au laboratoire de *l'université de Biskra*. Le microscope électronique à balayage utilisé pour ce travail est un **Tescan VEGA3** équipé d'une microsonde pour l'analyse en sélection d'énergie.





**Figure II.21** Etape de métallisation a) et microscope électronique à balayage Tescan VEGA3

## II.10 CONCLUSION

Dans un premier temps, nous avons présenté les programmes expérimentaux à réaliser puis nous avons présenté les matériaux utilisés dans notre étude, ainsi que les formulations des bétons testés, les détails de confection et conditionnement des éprouvettes.

Dans un deuxième temps, nous avons décrit les méthodes d'essais utilisées pour ces différentes formulations pour pouvoir caractériser les propriétés physiques et mécaniques des bétons en fonction de la température et atteindre nos objectifs.

## ***CHAPITRE III***

***PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS DU  
COMPORTEMENT DES BETONS AVEC DIFFERENTS TYPES  
DE FIBRES SOUMIS A HAUTE TEMPERATURE***

### **III.1 Introduction**

Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif de caractériser expérimentalement la réponse des bétons exposés à hautes températures influencés par les types de fibres par les méthodes destructives et non destructives.

Les propriétés mécaniques et les propriétés physiques des bétons avant et après les sollicitations thermiques ont été déterminées. Nous nous sommes intéressés à la mesure de la vitesse de propagation des impulsions par l'ultrason à travers des éprouvettes endommagées et aussi l'état de dureté de la surface. A la fin ont établi des corrélations entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement et la vitesse des impulsions ( $F_{CT-RN}$  et  $F_{CT-UPV}$ ).

Les résultats et les discussions de chapitre sont structurés comme suit :

- Béton sans fibres et bétons avec fibres métalliques.
- Béton avec les fibres polypropylène, béton avec fibres de carbone.

### **III.2 Caractérisation du comportement des bétons sans fibres et les bétons avec des fibres métalliques**

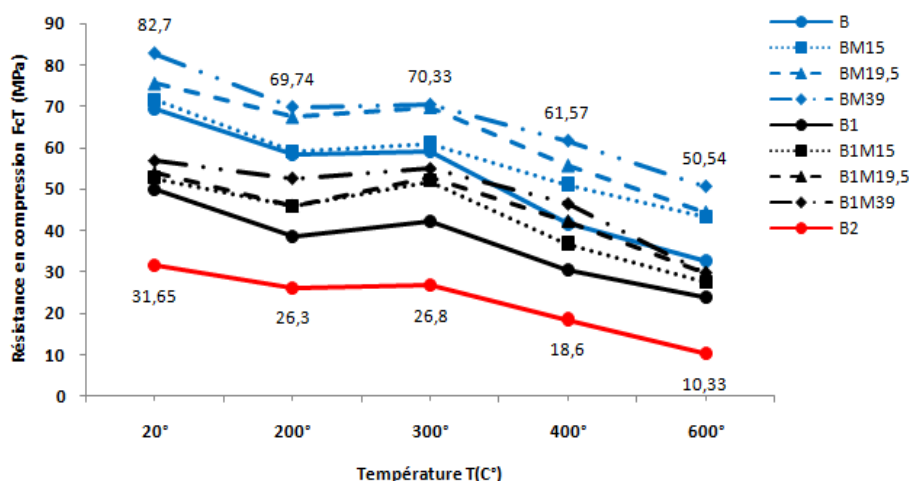
Notre étude portera sur le comportement des bétons sans fibres et les bétons avec des fibres métalliques soumis aux différents cycles de chauffage-refroidissement. Trois familles de bétons sans fibres sont confectionnées. Les rapports E/C des bétons varient de 0.35 (béton B) à 0.65 (béton B2) et un béton intermédiaire (béton B1) de rapport 0.45. Pour le béton avec les fibres métallique formulé avec rapport E/C qui varie entre 0.35 et 0.45. Les proportions de fibres métalliques utilisées sont 15, 19.5 et 39 kg/m<sup>3</sup> (correspondant à une fraction volumique respective de 0.19, 0.25 et 0.5%).

#### **III.2.1 Mesures des propriétés mécaniques**

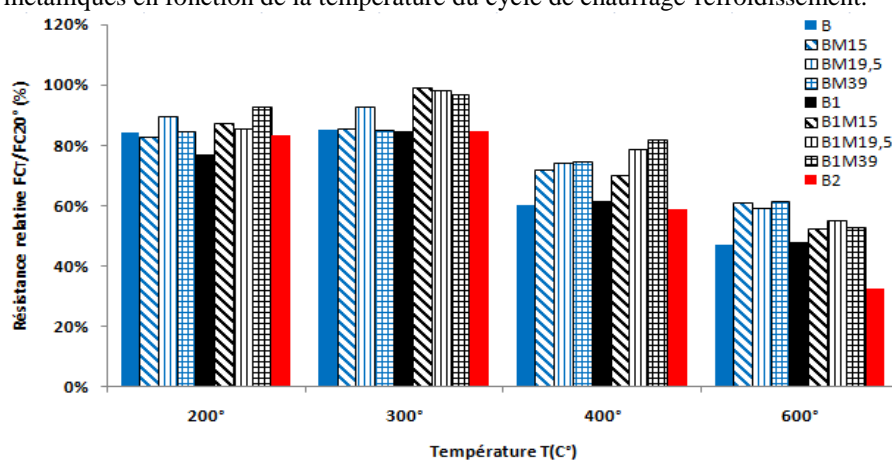
Les éprouvettes ont été soumises aux cycles de chauffage-refroidissement et les propriétés mécaniques ont été déterminées. Chaque valeur de la résistance résiduelle est la moyenne obtenue sur trois éprouvettes.

##### **III.2.1.1 Résistance en compression**

Les résultats de cette campagne d'essais sont montrés sur la figure III.1 et la figure III.2. Ces figures présentent respectivement les valeurs d'évolution de la résistance résiduelle et relative (en pourcentage de la résistance initiale à 20°C) en compression des bétons en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.



**Figure III.1** Evolution de la résistance résiduelle en compression des bétons sans fibres et des bétons avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.



**Figure III.2** Evolution de la résistance relative en compression des bétons sans fibres et des bétons avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

D'après la figure III.1, on remarque que la résistance en compression décroît avec l'augmentation de la température. Ce fait a déjà été observé et discuté à plusieurs reprises dans la littérature [Yermak, 2015], [Pilya, 2010], [Kanéma, 2007], [Phan, 2001], [Qian, 2000] qui ont conclu que ce décroissement peut être lié à la dégradation de la microstructure de la pâte de ciment et granulats ainsi qu'au départ d'eau.

On constate que la résistance en compression des bétons de fibres métalliques baisse avec l'augmentation de la température de la même manière que pour les bétons sans fibres, toutefois il faut noter que les bétons de fibres métalliques présentent de meilleures résistances résiduelles en compression que le béton sans fibres pour les deux séries de formulation.

Globalement, la diminution de la résistance résiduelle à la compression des bétons testés s'effectue suivant deux domaines. Le premier, allant de la température ambiante à la température 300°C, est caractérisé par une faible baisse et/ou amélioration de résistance et le second domaine, au-delà de 300°C, présente une importante diminution de résistance.

Entre 20°C jusqu'à 300°C, une faible baisse la perte de résistance relative des bétons de l'ordre de 17% pour le béton sans fibres B (E/C=0,35) et B2 (E/C=0,65) tandis que B1 (E/C=0,45) est

de l'ordre de 23%. Pour le béton avec les fibres métallique on remarque une perte variant entre 7% et 17%. La faible baisse est due à la délation de l'eau sous l'effet de la température ce qui provoque un écartement des feuillet du gel C-S-H, ce qui entraine une diminution des forces d'attraction entre les feuillet et engendre la naissance de microfissures [Khoury, 1992], [Hager, 2004], [Mindeguia, 2009], et [Pilya, 2010].

Une ré-augmentation à 300°C pour les plupart des bétons, elle est due au départ de l'eau et une forte cohésion des feuillet de C-S-H [Dias, 1990], [Pilya, 2010] et [Laneyrie, 2014].

Au-delà de 400°C, tous les bétons sans fibres perdent plus de 40% de leur résistance initiale. La baisse de la résistance en compression relative des bétons avec des fibres métalliques BM15, BM19.5 et BM39 est respectivement de 27%,26% et 25% tandis que pour B1M15, B1M19.5 et B1M39 est respectivement de 30%,21% et 18%. D'après des chercheurs cette perte de résistance est due à l'apparition de fissures [Laneyrie ,2014] et [Hachemi ,2015].

A la température 600°C, la perte de résistance résiduelle est similaire pour tous les bétons. Cette forte perte suppose l'endommagement du matériau provoqué par la dégradation de la matrice cimentaire et aussi à la désagrégation des granulats [Pilya, 2010]. Cette remarque a également été faite par [Kanema, 2007] et [Pimi, 2000]. Mais toutefois de meilleures performances résiduelles sont observées pour les bétons avec les fibres métalliques

On peut conclure, également qu'après une sollicitation identique que les bétons avec E/C=0.45 présentent une diminution de résistance beaucoup plus marquée que les bétons avec un rapport E/C=0.35, ceci est sans doute lié à la différence de microstructure entre ces deux bétons.

### III.2.1.2 Résistance en flexion

Des essais de flexion 3 points ont été réalisés sur trois éprouvettes pour chaque formulation avant et après chauffage à différentes températures. Les résultats sont présentés sur la figure III.3 qui représente respectivement les valeurs d'évolution de la résistance résiduelle et relative (en pourcentage de la résistance initiale à 20°C) en flexion des bétons en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

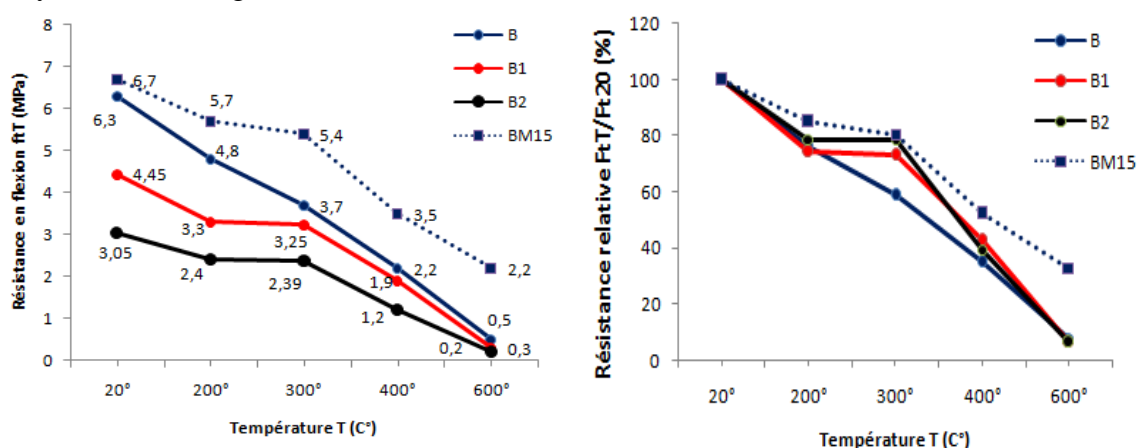


Figure III.3 Evolution de la résistance résiduelle et relative en flexion des bétons sans fibres B, B1 et B2 et le béton avec les fibres métalliques BM15 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

D'après la figure ci-dessous on peut constater:

Les valeurs de la résistance en flexion des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température. L'allure générale de la courbe n'est pas modifiée par l'ajout de fibres métalliques et elle est similaire aux bétons sans fibres.

A la température ambiante, le béton BM15 présente une meilleure résistance en traction que les bétons sans fibres puisque les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter le développement de la fissuration et empêcher l'apparition des macrofissures.

A 200°C, on observe une baisse de la résistance à la flexion de béton B(E/C=0,35) et B2 (E/C=0,65) qui perd environ plus de 24% et 21% de sa résistance initiale alors que B1 (E/C=0,45) perd environ 26 % alors que BM15 perd environ 15 %.

A 300°C On remarque que les bétons sans fibres BHP (nommé B) (41%) perdent beaucoup plus de leur résistance à la flexion que les deux autres formulations qui perdent en moyenne environ (25%). Cette perte de résistance plus rapide pour le BHP est aussi relevée par d'autres auteurs comme [Pilya, 2010], [Kanéma, 2007], [Noumowé, 1995].

Au-delà de la température 300°C, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale sauf BM15 qui ne perd que 48%.

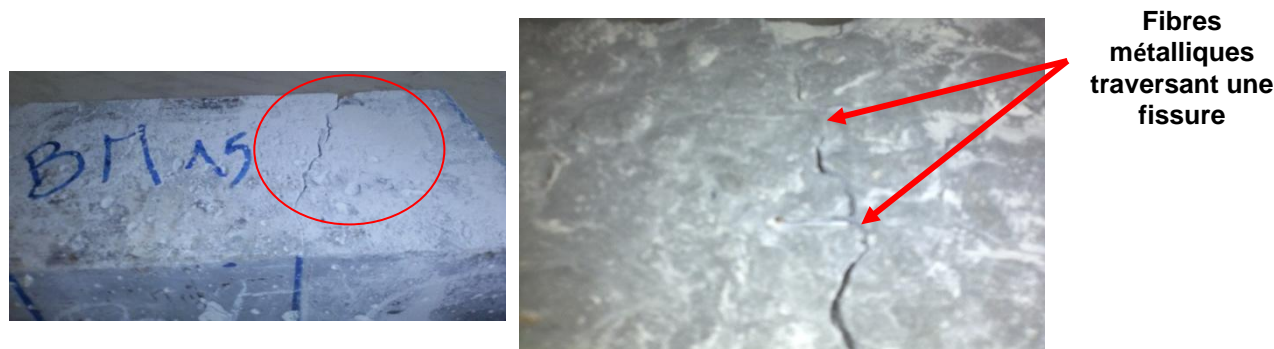
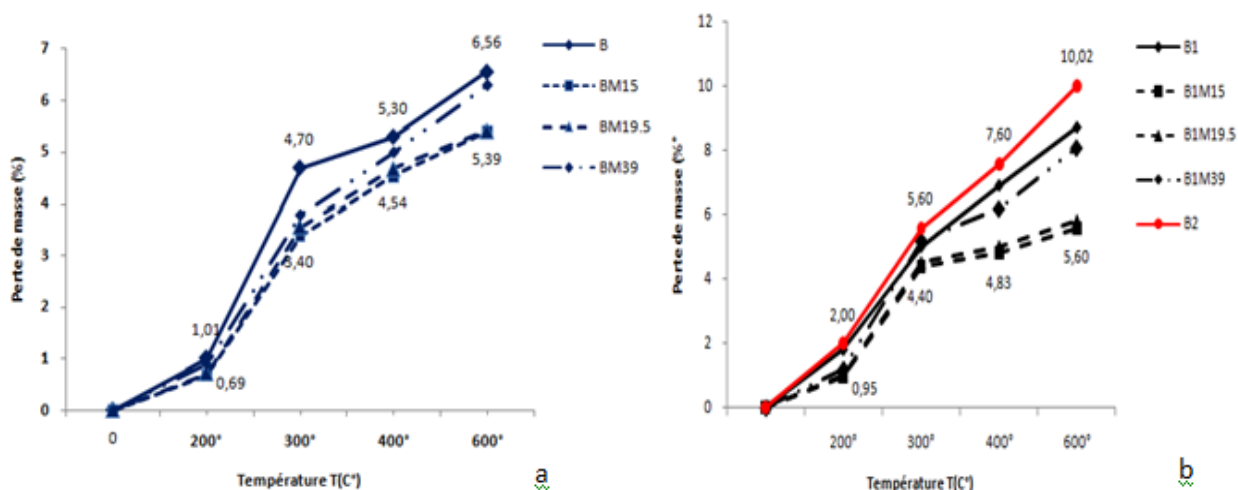


Figure III.4 L'état des éprouvettes après essai de flexion.

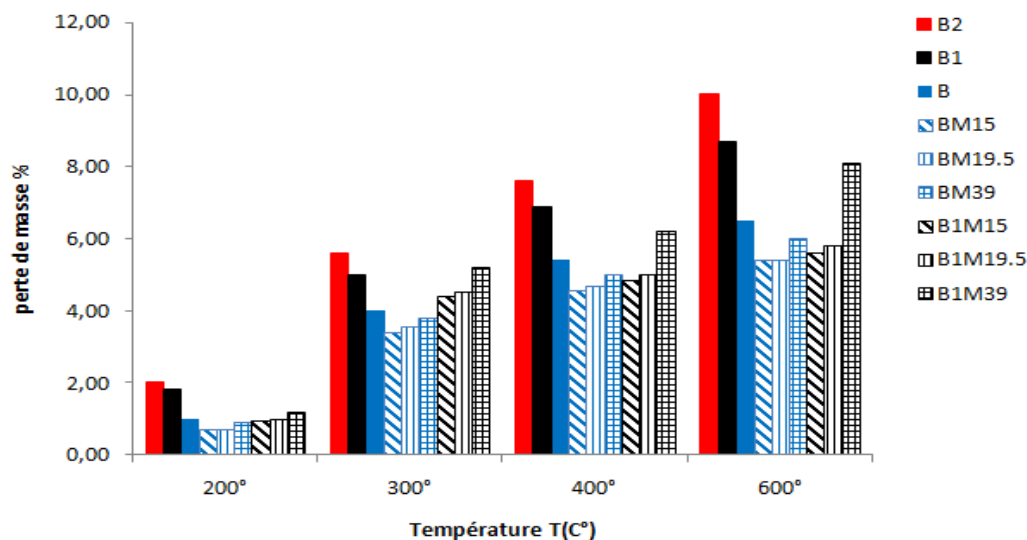
## III.2.2 Mesure des propriétés physiques

### III.2.2.1 Perte de masse

Le béton exposé à de hautes températures subit une dégradation au niveau microstructural qui conduit à une perte de densité du matériau. La pesée des éprouvettes avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement a permis d'étudier l'évolution de la perte de masse des bétons formulés en fonction de la température. Les figure III.5 et III.6 récapitulent l'évolution de la perte de masse des bétons sans fibres variant le rapport E/C et les bétons avec des fibres métalliques (E/C =0.35 et 0.45) en fonction de la température.



**Figure III.5** Evolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage refroidissement pour (a) des bétons à haute performance sans fibres B et avec des fibres métalliques BM15, BM19.5 et BM39 (b) le béton sans fibres B1 et B2 et les béton avec des fibres métalliques, B1M15, B1M19.5 et B1M39.



**Figure III.6** Evolution de la perte de masse des bétons sans fibres et avec des fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

L'allure de la courbe de perte de masse est identique pour tous les bétons. Elle ne dépend donc pas du rapport E/C ou l'ajout des fibres. Pour les bétons étudiés, trois domaines s'observent comme l'ont remarqué certains auteurs : [Khoury, 1988], [Noumowé, 1995], [Hager, 2004], [Kanéma, 2007] [Pilya, 2010] et [Hachemi, 2015].

Entre la température ambiante et 200°C, la perte de masse observée est essentiellement liée au départ de l'eau libre et absorbée présente dans les bétons. Une faible variation de perte de masse 1,01% pour le béton B (E/C=0.35) et 1,8 % pour B1 (E/C=0.45) et 2% pour B2 (E/C=0.65). Le béton ordinaire (B2) perd plus de masse que le béton à hautes performances (B). Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres comme exemple la perte de masse de BM39 est de 0,65% alors que B perd 1,01 %.

A la température 200°C à 400°C, on remarque par une forte augmentation de perte de masse. Elle est due au départ de l'eau absorbée et liée (décomposition des hydrates).

Pour un chauffage à 600°C, une perte de masse est de 6.5 % pour le béton B2 (BO) et de 7.7 % pour le béton B1 tandis que pour le béton B elle est de 10 % et la perte de masse est 5,80% et 5,60%, 8,10% pour les bétons avec des fibres métalliques B1M15, B1M19.5 et B1M39 respectivement.

D'une manière générale, on note une perte de masse relative est moins importante pour les bétons formulés avec un faible rapport E/C puisque ils contiennent moins d'eau, le contraire si plus le rapport E/C de la formulation est fort et plus la quantité d'eau perdue est importante ainsi la perte de masse est importante [Kanéma, 2007]. Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres [Pilya, 2010] à cause de remplacement d'une partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée.

### III.2.2.2 La porosité à l'eau

La mesure de la porosité permet de caractériser la microstructure poreuse du béton. Les résultats sont obtenus par l'essai de pesée hydrostatique et récapitulés sur la figure III.7 et la figure III.8. La porosité relative est déterminée en pourcentage et est normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température initiale de 80°C.

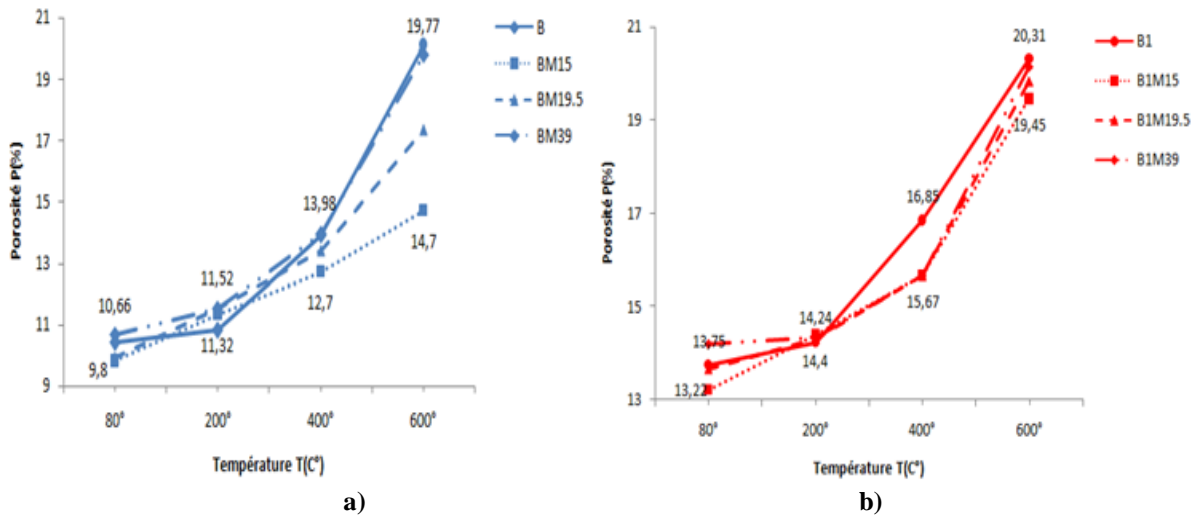


Figure III.7 (a) Evolution de la porosité absolue des bétons sans fibres et avec des fibres métallique (E/C=0,35) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement (b) Evolution de la porosité absolue des bétons sans fibres et avec des fibres métallique (E/C=0,45) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

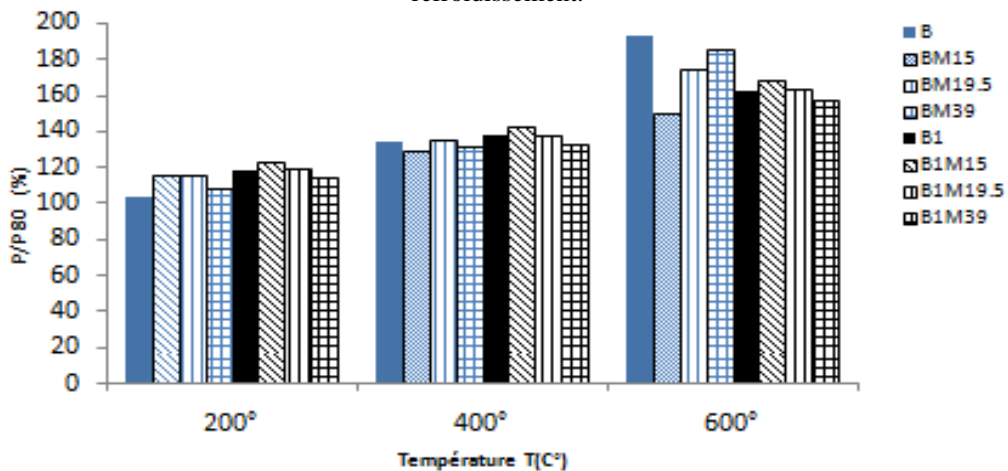


Figure III.8 Evolution de la porosité relative des bétons sans fibres et avec des fibres métallique en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.



Les résultats montrent que la porosité à l'eau augmente avec l'augmentation de la température. Entre 80°C et 200°C, on n'observe pas ou très peu d'évolution de la porosité accessible à l'eau, et la porosité des bétons de fibres métalliques varie peu par rapport aux bétons sans fibres.

A 400°C, on remarque pour tous les bétons une augmentation rapide de porosité pour les bétons sans fibres et aussi pour les bétons contenant les fibres métalliques.

A 600°C, en revanche, on remarque que la porosité augmente rapidement à la température atteinte puisque les valeurs sont comprises entre 14,7 % et 19.77% pour les bétons BM15 BM19.5 et BM39 et B.

Comme a conclu [Pilya, 2010] la porosité des bétons de fibres métalliques varie peu par rapport aux bétons sans fibres jusqu'à un chauffage à 200°C. Au-delà de la température 200°C, l'accroissement rapide de porosité remarqué avec les bétons sans fibres s'observe aussi avec les bétons contenant les fibres métalliques.

### III.2.3 Mesures par essais non destructifs

#### III.2.3.1 Indice de rebondissement

Le scléromètre est un instrument qui peut rapidement évaluer la qualité d'un béton. La lecture effectuée sur les éprouvettes est la moyenne de plusieurs lectures d'indice de rebondissement (la lecture contradictoire est éliminée ou répétée).

Les valeurs des indices de rebondissements résiduelles et relatives sont présentées sur la figure III.9 et figure III.10.

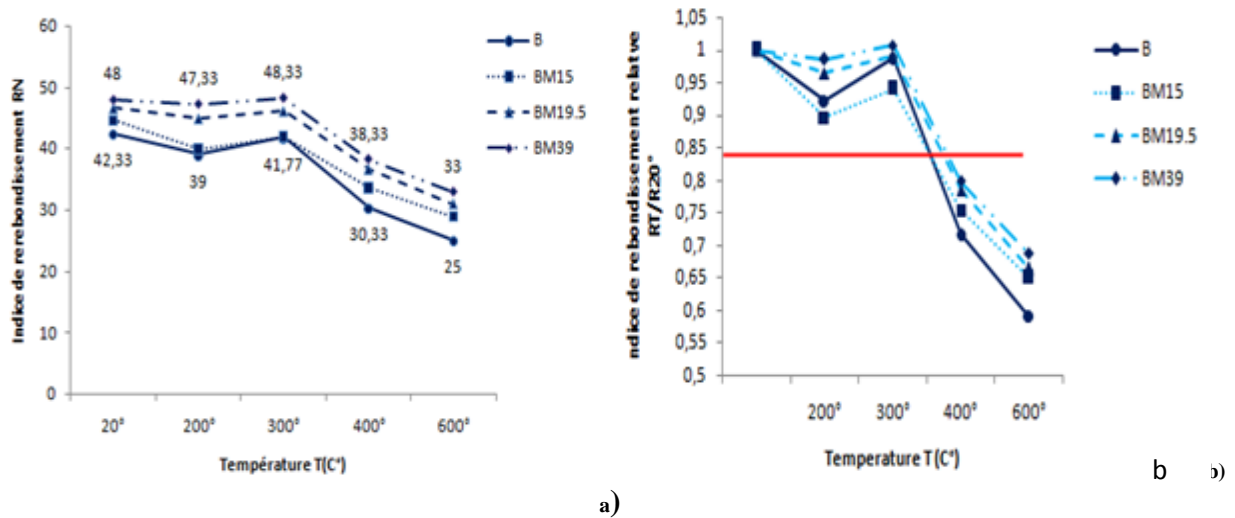


Figure III.9 Evolution de l'indice de rebondissement (a) résiduel et (b) relatif (RN/RN20°) pour le béton sans fibres B et des bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.35) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

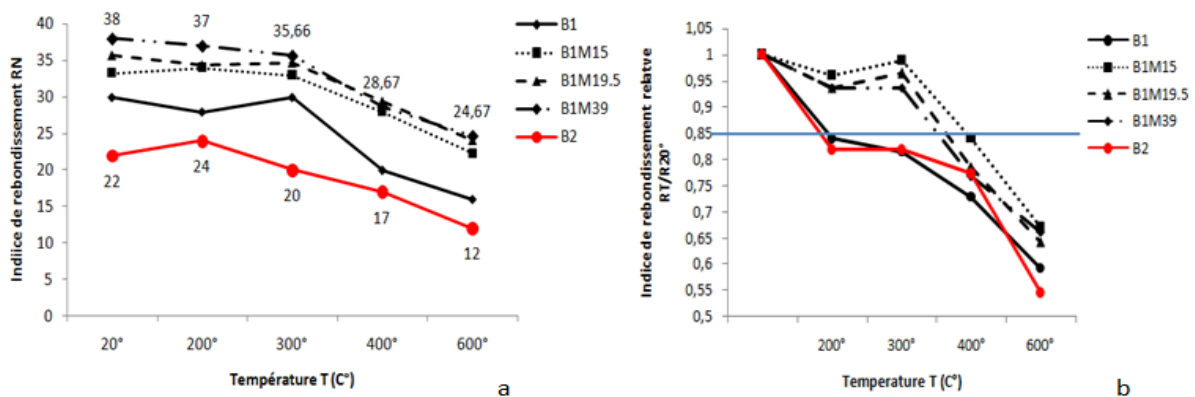


Figure III.10 Evolution de l'indice de rebondissement (a) résiduel et (b) relatif des bétons sans fibres E/C=0.45 E/C=0.65 et des bétons avec des fibres métalliques E/C=0.45 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Les figures précédentes montrent que les mesures de l'indice de rebondissement pour tous les bétons diminuent avec l'augmentation de la température.

Selon l'auteur [Annerel, 2013] l'indice de rebondissement relatif égale à 0.85 qui est spécifiée comme une valeur de comparaison pour évaluer l'état de l'endommagement du béton :

$RN_T/RN_{20^{\circ}C} > 0.85$  Elément de béton avec un endommagement superficiele.

$0.85 \geq RN_T/RN_{20^{\circ}C}$  Elément de béton doit être objet d'une enquête profonde.

De la température ambiante à la température 300°C, on remarque que le béton de haute performance sans fibres B (E/C=0,35) présente une bonne qualité et un endommagent superficiele avec un indice relatif supérieure à 0.85. Alors que les bétons sans fibres B1 (E/C=0,45) et B2 (E/C=0,65) perdent leur performances au-delà la température 200°C par des valeurs de l'indice de rebondissement relative inferieure à 0.85. On observe également que de la température ambiante à la température 300°C, les bétons avec les fibres métalliques quelque soit le rapport E/C présente une bonne qualité avec un indice relatif supérieure à 0.85.

Au-delà de 400°C les bétons présentent une forte diminution de l'indice de rebondissement relatif ce qui demande une enquête plus approfondie pour évaluer la qualité de béton.

Remarquant aussi que l'indice de rebondissement est influencé par l'état de surface des éprouvettes, puisque à 200°C et 300C° les indices de rebondissement sont élevés et proches à l'état de béton sain ou non échauffé. On peut expliquer cette situation par séchage et le durcissement de la couche de surface conformément aux travaux de [Logothetos, 1981] comme montrés sur les figures III.11 et III.12.

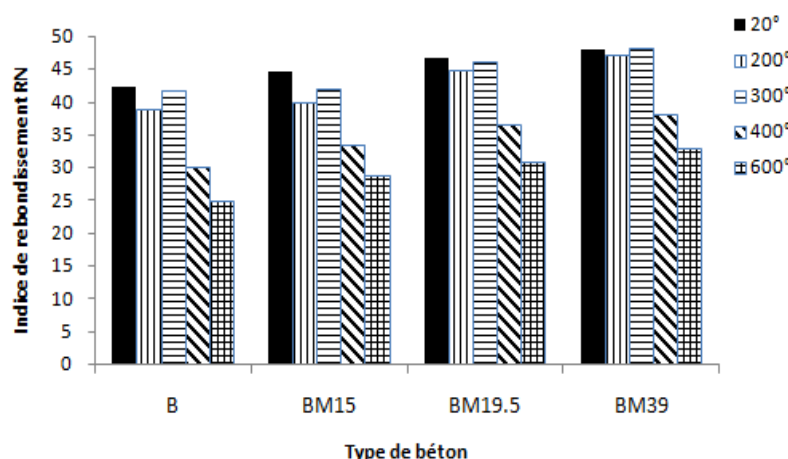


Figure III.11 Evolution d'indice de rebondissement résiduel des bétons sans fibres et avec des fibres métalliques pour E/C=0.35.

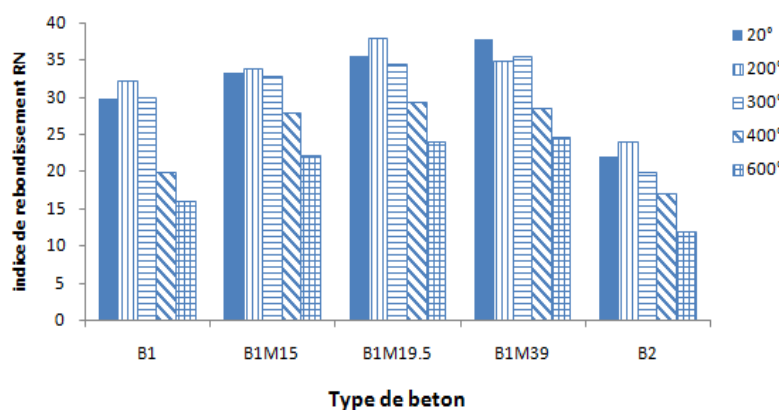


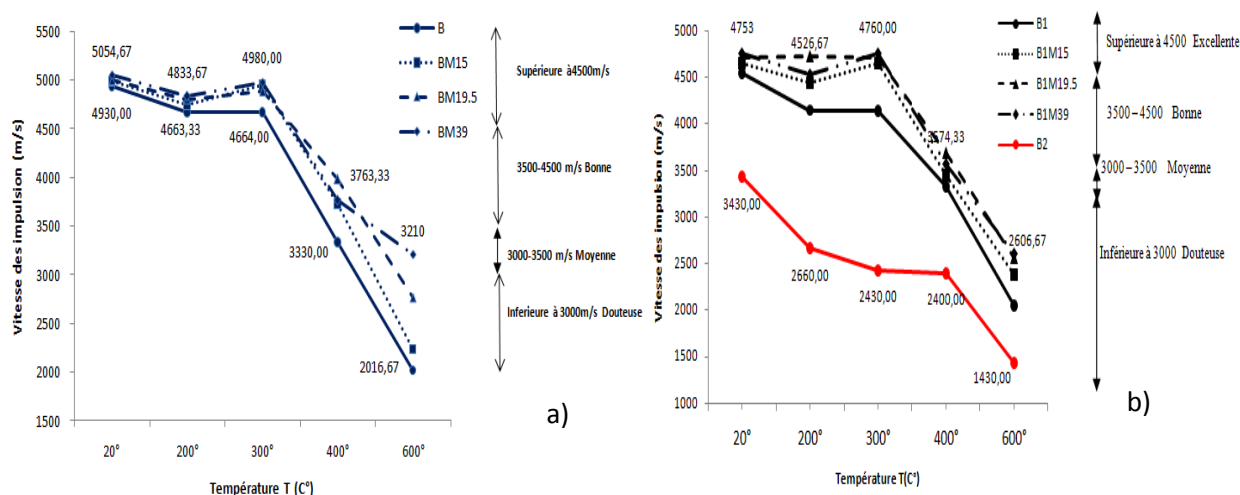
Figure III.12 Evolution d'indice de rebondissement résiduel des bétons sans fibres (E/C=0.35, E/C=0,65) et les bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.45).

Selon la campagne de mesure de dureté de surface on peut remarquer l'intérêt du scléromètre qui peut donc faciliter la localisation des zones de faible qualité résiduelle de surface et ainsi déterminer rapidement les zones à réparer.

### III.2.3.2 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Cet essai est une méthode véritablement non destructive, car elle est basée sur des ondes ultrasoniques n'ayant aucun dommage pour l'élément examiné du béton.

Les valeurs des vitesses résiduelles et relatives des ondes soniques avant et après l'exposition des bétons aux hautes températures sont présentées sur les figures suivantes :



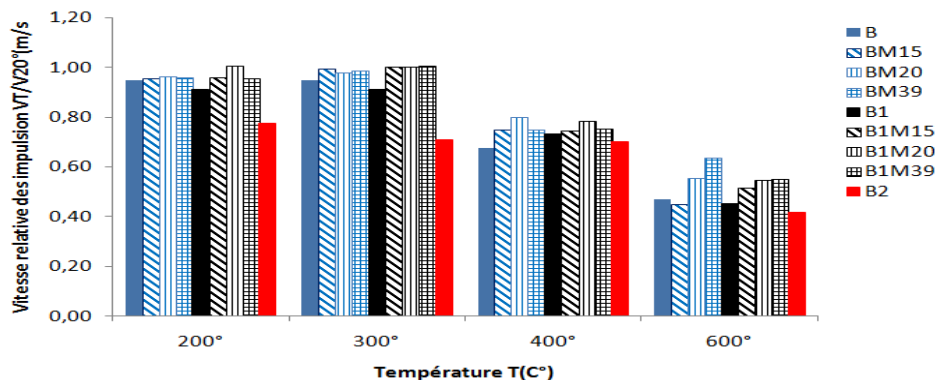
**Figure III.13** (a) Evolution de la vitesse des ondes soniques de béton sans fibres et des bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.35) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. (b) Evolution de la vitesse des ondes soniques de béton sans fibres (E/C=0.45 et 0.65) et des bétons avec des fibres métalliques (E/C=0.45) en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Les résultats de cette étude mettent en évidence la grande sensibilité de la vitesse des ondes face à une sollicitation thermique. En effet, cette dernière diminue de manière continue avec l'élévation de la température. Ces résultats corroborent des résultats publiés par [Chiang, 2005]; [Sofren, 2006], [Uysal, 2012] et bien d'autres auteurs dans la littérature.

D'après le tableau qui donne la relation entre propagation des impulsions et la qualité de béton [Feidman, 2005] décrit dans la paragraphe I.6.4 et redessiné sur la figures III.13, les bétons sans fibres et les bétons avec fibres métalliques quel que soit leurs rapport E/C montrent une excellente et bonne qualité jusqu'à la température 300°C supérieure à 3500 m/s, alors que le B1 présente une bonne qualité à 20°C et après échauffement à 200°C tandis que le béton ordinaire B2 présente à la température 20°C est une moyenne qualité puis perd ces performance avec l'augmentation de la température. Au-delà de 400°C, la vitesse des ondes décroît d'une manière quasi linéaire. Ce décroissement est dû à l'augmentation des volumes poreux et la propagation des fissures.

A travers l'ensemble des résultats, nous pouvons regrouper le comportement de la vitesse des ondes soniques selon deux domaines Le premier domaine allant de la température ambiante à la

température 300°C caractérisé par une faible baisse et/ou amélioration de la vitesse des ondes soniques et le second domaine au-delà de 300°C présente une importante diminution de résistance quel que soit le type de béton.



**Figure III.14** Evolution de la vitesse des ondes soniques relative à différents températures du cycle de chauffage-refroidissement des bétons sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$  et  $0.65$ ) et les bétons avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$  et  $0.45$ ).

On peut remarquer l'intérêt des essais non destructifs tel l'ultrason qui peut nous donner des informations rapides et pratiques sur l'état de béton.

### III.2.4 Les corrélations

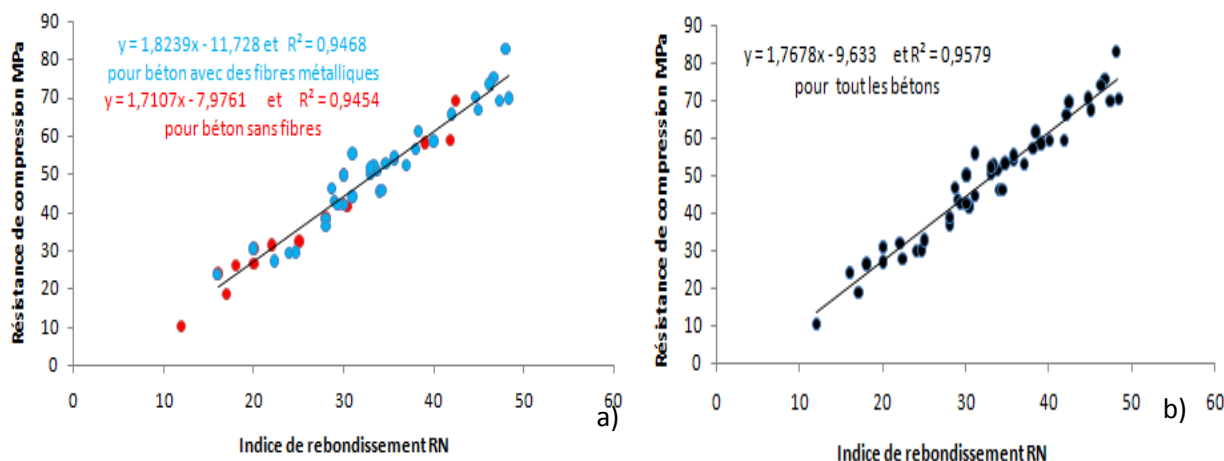
La corrélation est une notion couramment utilisée dans toutes les applications statistiques. Elle permet d'étudier la liaison que l'on rencontre fréquemment entre deux variables dans toutes les sciences humaines ou appliquées. Toutefois, la définition statistique de la corrélation est plus précise que le sens courant du terme : elle ne concerne que des variables statistiques quantitatives, c'est-à-dire dont on peut calculer les moyennes.

#### III.2.4.1 Relation de corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement

Pour la relations de corrélation entre les résultats des essais destructive (essai de compression) des éprouvettes et celles issues du contrôle non destructif (scléromètre) le choix est une fonction linéaire de forme :

$$f_{cT} = A.RN_T - B \quad \text{ou } A, B \text{ sont des constants}$$

Les régressions sont présentés sont la figures III.15.



**Figure III.15** Corrélation entre l'indice de rebondissement  $RN_T$  et résistance compression  $F_{cT}$ . (a) béton sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$  et  $0.65$ ) et pour béton avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$  et  $0.45$ ) séparément (b) béton sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$  et  $0.65$ ) et pour béton avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$  et  $0.45$ ) groupées.

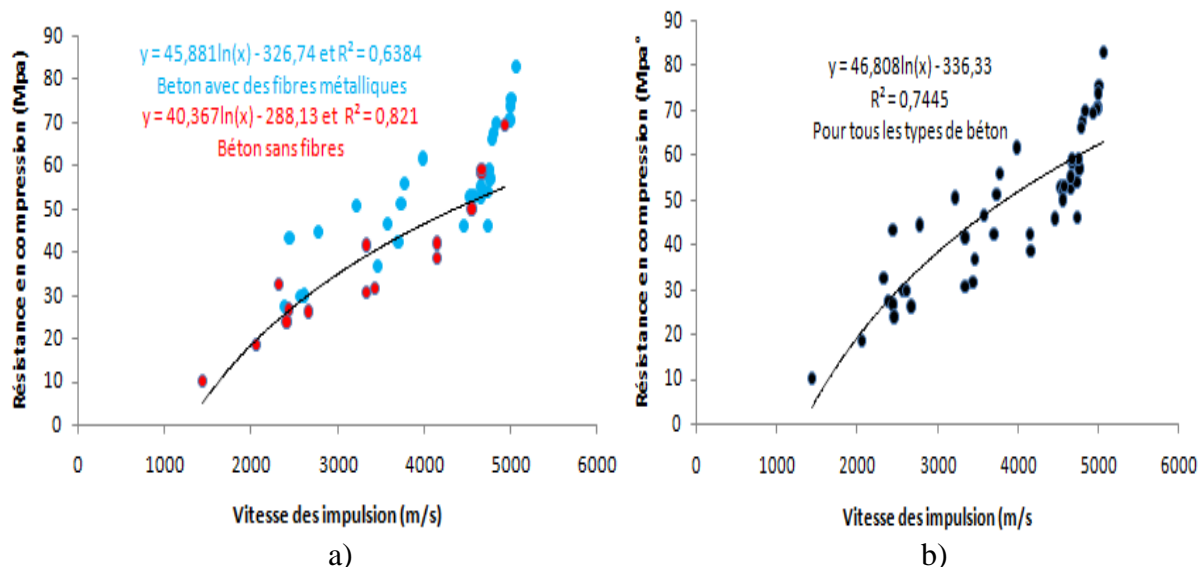
On peut remarquer que :

Le scléromètre est un essai qui pourra donner une bonne corrélation entre les résultats de l'essai destructif des éprouvettes et ceux issus du essai de non destructifs comme notre cas puisque le coefficient de corrélation  $R^2$  est  $>0.95$  pour tous les types de béton assemblés ou corrélés séparément.

On a constaté que le scléromètre est un essai fiable pour l'appréciation et la prédiction de la résistance à la compression du béton ce qui corrobore avec d'autre chercheurs comme [Hager and al, 2015] et [Mróz, 2017] qui a conseillé aussi de fournir des courbes de régression individuelle pour évaluer le degré de dommages thermiques des bétons fabriqués.

### III.2.4.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse ultrasonore

Une corrélation importante des propriétés des matériaux, qui est souvent appliquée afin de mettre une relation entre la résistance à la compression du béton ( $f_c$ ) et la vitesse de l'impulsion ultrasonique (UPV). Pour la plupart des travaux de recherche rapportés sur ce sujet, il a été estimé que la relation  $f_c$ -UPV, pour les bétons suivait une fonction exponentielle, bien que dans certains cas elle fût considérée comme linéaire, parabolique ou potentielle. Selon [Lizancos,2016] le problème est que cette fonction dépend d'une multitude de facteurs, fondamentalement: sur la densité des granulats; la taille maximale de l'agrégat; le type et la quantité du ciment; la teneur en cendres volantes; le rapport eau / ciment et les conditions de durcissement.



**Figure III.16** Corrélation entre la vitesse des ondes soniques et résistance compression  $F_{cT}$ . (a) béton sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$  et  $0.65$ ) et pour béton avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$  et  $0.45$ ) séparés (b) béton sans fibres ( $E/C=0.35, 0.45$  et  $0.65$ ) et pour béton avec des fibres métalliques ( $E/C=0.35$  et  $0.45$ ) groupés.

L'utilisation de la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) pour l'évaluation du résidu de béton est l'une des méthodes d'essai non destructif les plus fréquemment utilisées pour le béton exposé à de hautes températures.

Il apparait que l'utilisation de la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) donne une bonne corrélation et en ce sens contribue à rendre l'évaluation de la résistance du béton plus fiable.

Il faut souligner que concernant les modèles empiriques, qu'il a été confirmé, par la recherche bibliographique, qu'il n'y'a pas une relation " universelle " donnant l'estimation de la résistance du béton par les essais non destructifs.

### **III.3 Caractérisation du comportement de bétons haute performance avec des fibres polypropylène et de bétons haute performance avec fibres de carbone**

#### **III.3.1 Introduction**

L'influence des fibres de polypropylène, les fibres de carbone ainsi que les fibres métalliques, sur le comportement du béton porté à haute température fait l'objet de cette deuxième partie.

Pour chaque type de béton de haute performance (rapport E/C=0.35). On ajoute trois dosages de fibres de polypropylène : 0.5, 1 et 1.5 kg/m<sup>3</sup> (correspondant à une fraction volumique respective de 0.05, 0.11 et 0.17%). Pour les fibres de carbones trois dosages 2, 4 et 8 kg/m<sup>3</sup> (correspondant à une fraction volumique respective de 0.13, 0.25 et 0.5%) ont été utilisés. Les mêmes dosages des fibres métalliques décrites auparavant (15, 19.5 et 39 kg/m<sup>3</sup>) ont été ajoutés au béton afin de les comparer avec les deux autres types de béton.

Ces bétons sont soumis à un traitement thermique de chauffage – refroidissement de différentes amplitudes, allant de la température ambiante jusqu'à 200, 300, 400, et 600 °C, la vitesse de chauffage a été fixée à 10°C/min. On cherche à déterminer l'influence de la nature et le pourcentage des fibres sur les performances mécaniques résiduelles et les propriétés physiques des bétons en fonction de la température.

La présentation de résultats commence par présenter les bétons des fibres polypropylène, les bétons de fibres de carbones (il faut rappeler que ces bétons sont comparés automatiquement avec le béton de haute performance sans fibres B).

#### **III.3.2 Caractérisation des fibres polypropylène et des fibres de carbone en fonction de la température**

Pour réaliser cet essai, nous avons fixé deux objectifs : mesurer les masses des fibres polypropylène et de carbone avant et après échauffement et, d'autre part, observer l'état des fibres au cours de cette élévation afin d'identifier la température de fusion et changement de texture des fibres. Pour atteindre ces objectifs, nous avons élaboré le protocole expérimental suivant :

1. mettre une quantité de fibres dont la masse fixe à 3 g dans un récipient en acier.
2. chauffage des échantillons selon les températures suivantes: 200°C, 300°C, 400°C, et 600°C, avec une vitesse de chauffage : 10°C/min et durée du palier : 1h puis laisser l'échantillon dans le four jusqu'à refroidissement.
3. pesée de l'échantillon après échauffement.
4. Photographie les échantillons.

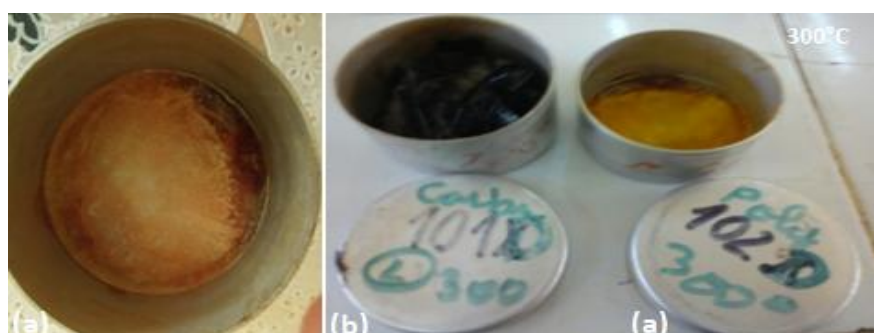
Notant que selon [Missemer, 2011] qui conclut que la masse choisie pour effectuer ces essais sur les fibres n'influence pas sur la température de fusion des fibres. Mais, elle peut jouer un rôle sur la vitesse de perte de masse alors c'est pour cela on a choisi une masse fixe.

Les quatre figures III.17 à la figure III.20 montrent le changement de couleurs et des textures des échantillons de fibres polypropylène et de carbone à différentes températures d'échauffement.



**Figure III.17** (a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle d'échauffement- refroidissement à la température 200°C.

On remarque à la température 200°C que les fibres polypropylène ont fondu et forment une plaque (une sorte de film) de couleur blanche alors que les fibres de carbone gardent leur masse et la texture.



**Figure III.18** (a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle d'échauffement- refroidissement à la température 300°C.

A la température 300°C on observe la fusion des fibres polypropylène de couleur orange tandis que les fibres de carbone ont une texture douce.



Figure III.19 (a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle d'échauffement- refroidissement à la température 400°C.

A 400°C les fibres polypropylène brûlent et prennent une couleur noire alors que les fibres de carbone on une texture plus douce.

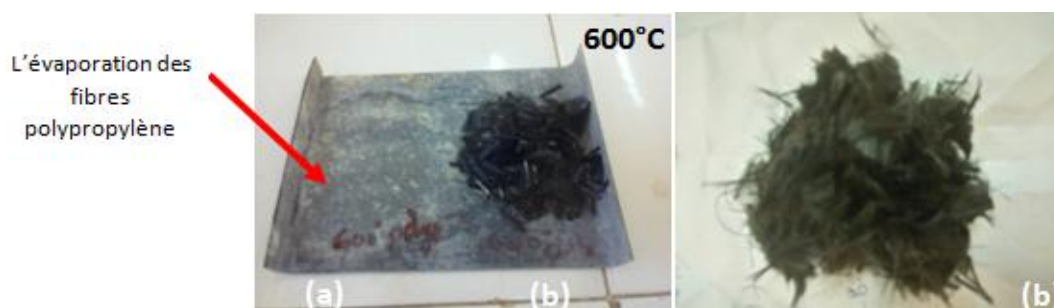


Figure III.20 (a) Échantillon de fibres polypropylène et (b) Échantillon de fibres de carbone après le cycle à la température 600°C.

Enfin à 600°C, on remarque la disparition complète des fibres polypropylène alors que les fibres de carbone on une texture très douce.

L'évolution de la perte de masse avec la température des fibres polypropylène est des fibres de carbone est présentée sur la figure III.21.

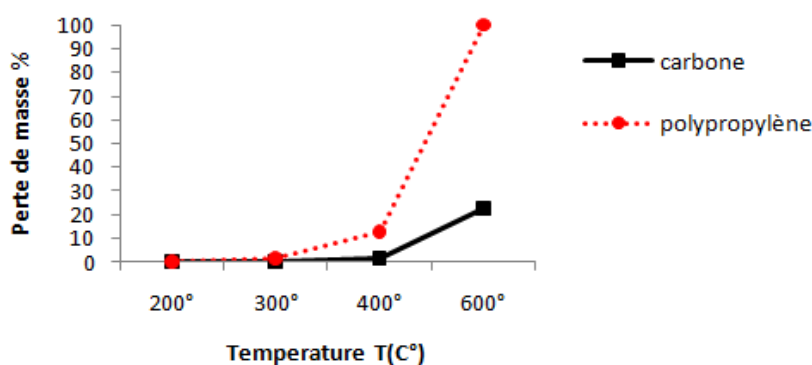


Figure III.21 Perte de masse des fibres en fonction de température.

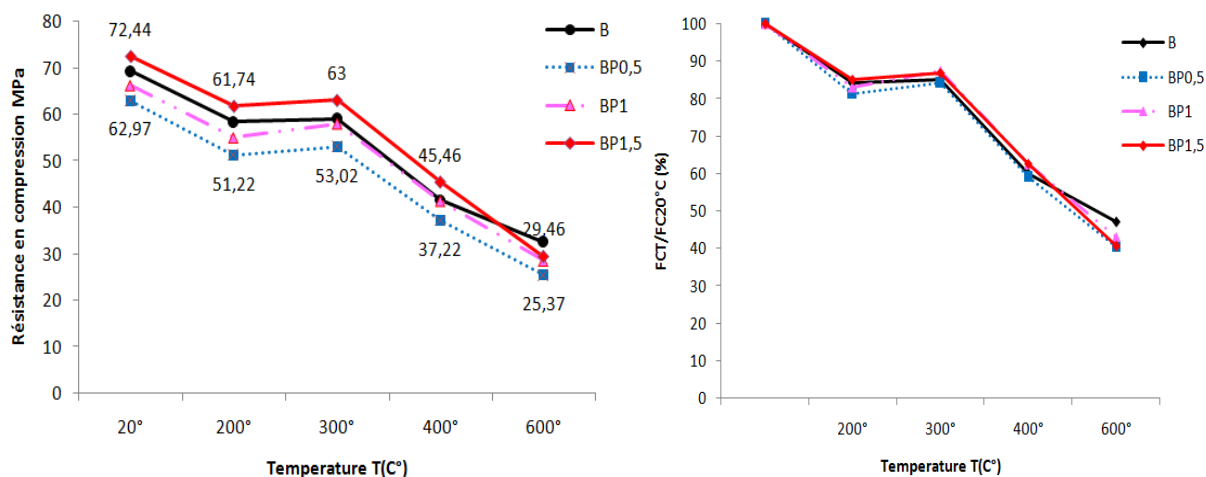
On remarque que les fibres de carbone garde leur masse jusqu'à 400° C puis une perte de masse d'environ 22% à 600°C de la masse initiale (c'à d la masse à la température ambiante). Concernant les fibres de polypropylène elles commencent par perdre leur masse progressivement jusqu'à la disparition complète des fibres et cela à la température 600°C.



### III.3.3 Mesures des propriétés mécaniques des bétons

#### III.3.3.1 Résistance en compression

L'évolution de la résistance en compression résiduelle et relative des différents bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température présentés sur la figure III.22.



**Figure III.22** Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons sans fibres B et les bétons avec fibres polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

La résistance en compression des bétons avec les fibres polypropylène diminue avec la température, selon la même cinétique que pour les bétons étudiés précédemment (sans fibres et avec fibres métalliques).

La baisse de résistance en compression des bétons BHP contenant ou non des fibres de polypropylène a été aussi notée par [Noumowé, 2005], [Suhandi, 2006] et [Pilya, 2010]. Nous observons les deux domaines caractérisant le comportement en compression après chauffage.

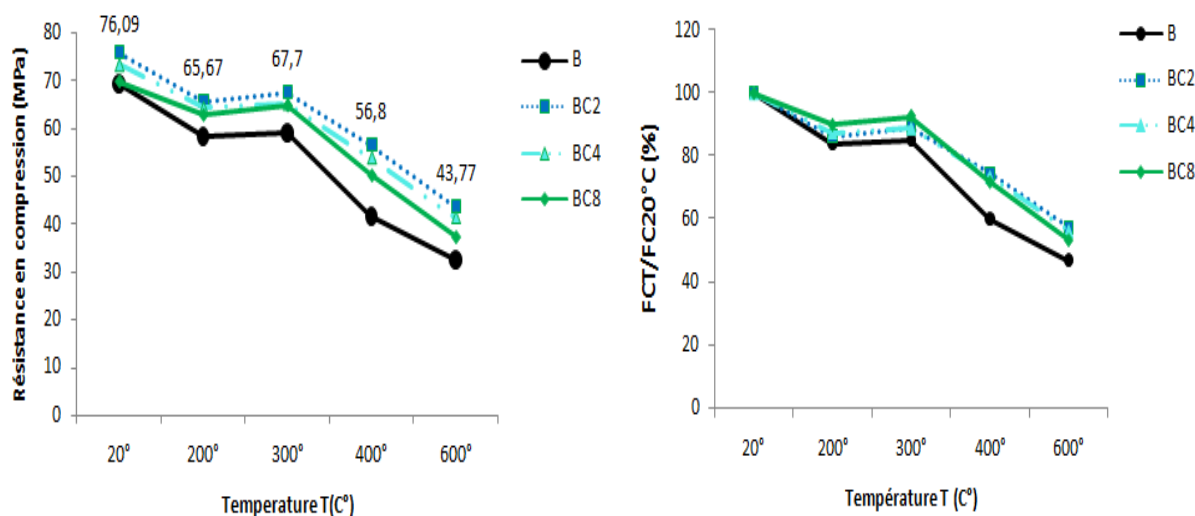
On peut noter que pour des températures allant jusqu'à 300°C, une légère baisse et/ou amélioration de résistance est remarquée puisque on note à la température 200°C la résistance relative en compression est entre 18% et 14% plus faible que celle obtenue à 20°C pour les quatre bétons B, BP0,5, BP1 et BP1.5 respectivement.

Au delà de 300°C, la résistance baisse considérablement. A 600°C, les résistances des bétons décroissent de façon plus ou moins régulière et perdent 60% de leur résistance initiale, et leurs valeurs sont très proches et ne dépendent pas du dosage en fibres.

Selon [Pilya, 2010] la perte de la résistance en compression avec l'élévation de température est due à l'augmentation de porosité générée par la fusion/vaporisation du polypropylène ainsi que l'apparition de microfissures [Hachemi, 2015].

Une amélioration de résistance est constatée avec l'addition de 1.5 kg/m<sup>3</sup> de fibres polypropylène. Comme rencontré couramment dans la littérature [Chen, 2004], [Xiao, 2006] et [Pilya, 2010] des améliorations de résistance en compression de bétons contenant des fibres de polypropylène ont été observées.

La figure III.23.présentent respectivement les valeurs relatives de résistances résiduelles en compression (en pourcentage de la résistance initiale à 20°C) de quatre bétons sans et avec des fibres de carbone B, BC2, BC4 et BC8.



**Figure III.23** Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons avec fibres carbone en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

On constate une amélioration de la résistance en compression des bétons de fibres de carbone pour tous les cycles de chauffage-refroidissement. Les résistances résiduelles de béton sans fibres B restent toujours inférieures à celles des bétons avec des fibres carbone puisque ces fibres gardent leur effet favorable sur la résistance en compression tout comme les fibres métalliques.

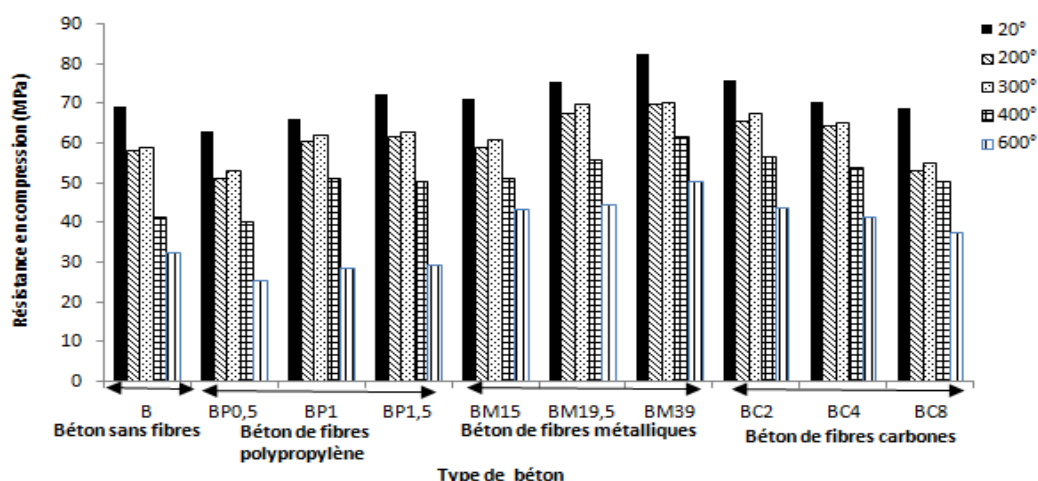
A la température ambiante les bétons de fibres carbone présentent de meilleures résistances résiduelles en compression par rapport aux le béton sans fibres.

A la température 400°C, La résistance résiduelle relative moyenne des bétons de fibres de carbone est de l'ordre de 72% ce qui est traduit par une perte de résistance à la compression de l'ordre de 30%

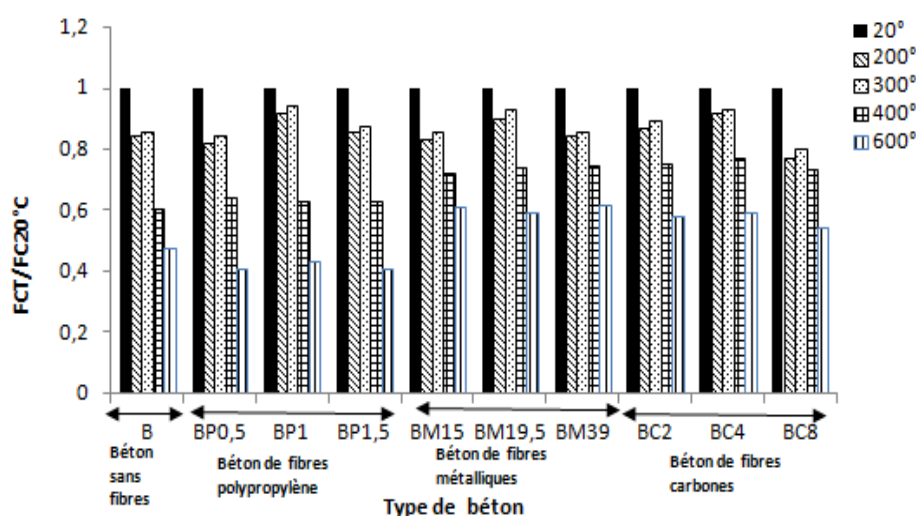
Après chauffage à 600°C, la résistance relative des bétons carbone est respectivement entre 57% et 53% alors et celle de bétons sans fibres B est de 47%.

On note que la résistance résiduelle diminue avec le dosage en fibres ce qui coïncide avec les recherches de [Tanyildizi ,2008].

D'après la figure III.24 qui regroupe l'évolution de la résistance résiduelle en compression des bétons sans et avec différents types de fibres en fonction de la température, on remarque que toutes les courbes de résistance à la compression sont composées de deux domaines et la présence des fibres ou le type n'influe pas l'allure de la courbe de résistance en compression.



a)



b)

**Figure III.24** Evolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression de bétons sans et avec différents types de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Dans le premier domaine, s'étalant de la température ambiante à la température 300°C on constate une diminution et parfois une amélioration des résistances à la compression. Au-delà de ce seuil, toutes les compositions de bétons voient leurs résistances diminuer ce qui coïncide avec de la littérature.

Le comportement de béton avec des fibres métallique et carbone concernant la résistance en compression du béton en fonction du cycle de chauffage-refroidissement semble plus similaire.

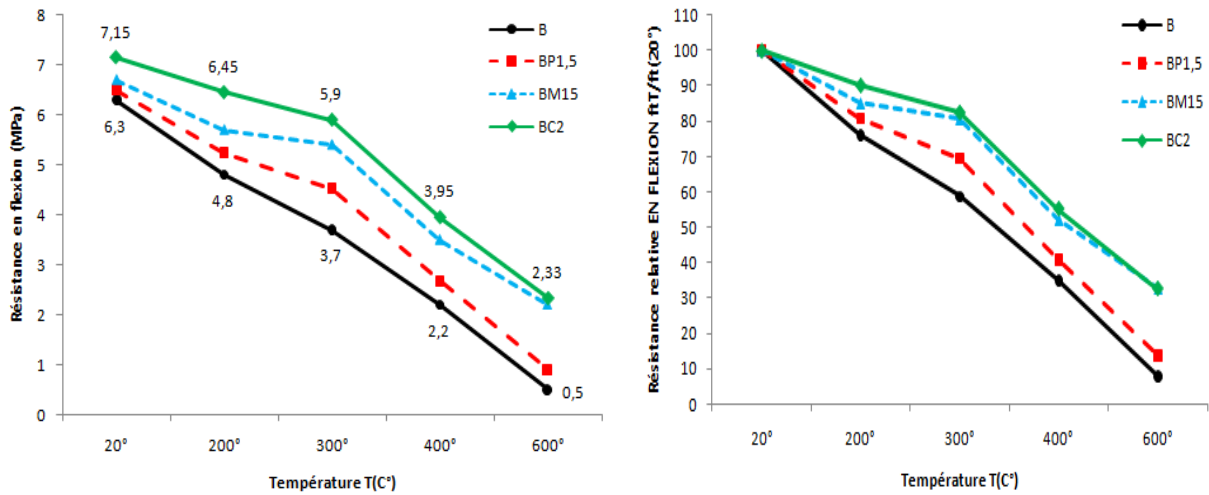
La résistance en compression du béton semble plus liée à la teneur en fibres.

On a constaté la même remarque faite par Gallé [Gallé et al, 2003] que les résistances résiduelles des bétons de notre études chauffé avec la vitesse de 10°C/min sont supérieures que celles d'un béton chauffé avec une vitesse de 1°C/min de celle de l'étude de [Pilya, 2010]. Il apparait que l'application d'une vitesse lente permet une transformation chimique plus complète dans le béton et donc une réduction plus significative des résistances [Kanema, 2007].

### III.3.3.2 Résistance en flexion

A la température ambiante, il est bien connu que, le béton présente une meilleure résistance à la compression qu'à la traction, la présence des fibres améliore la résistance en traction.

Les essais ont porté sur les bétons (B, BP1.5, BPC2, et BM15). Le choix de ces quatre bétons est fait selon le mélange de fibres qui fait l'objet de quatrième chapitre de cette étude. Les même conditions sont appliquées les bétons sont soumis à quatre cycles de chauffage – refroidissement composés d'une rampe de montée en température fixée à 10°C/min, d'un palier de stabilisation d'une heure aux températures cibles suivantes 200°C, 300°C, 400°C et 600°C.



**Figure III.25** Evolution de la résistance résiduelle et relative des bétons sans et avec différents types de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

La figure III.25 présente l'évolution de la résistance à la flexion résiduelle et relative en fonction de la température de chauffage. Nous observons que les valeurs de la résistance à la flexion diminuent de manière continue avec l'augmentation de la température pour tous les bétons B, BP1.5, BC2, et BM15.

Nous distinguerons d'une manière générale, dans l'évolution de la résistance en traction avec le température, deux zones de comportement, qui s'étendent de la température ambiante à 400°C pour la première zone et de 400°C à 600°C pour la seconde et l'allure de la courbe ne change pas avec la présence des fibres.

De 20°C à 400°C, on observe une baisse de la résistance à la flexion d'environ 10% pour le BC2, tandis que le BM15 perd environ 12 % alors que B, BP1.5 perd environ 23% et 19% de leurs résistances initiales.

Au-delà de 400°C, les quatre bétons engendrent une perte importante de la résistance en flexion puisque le béton avec des fibres de carbone BC2 et celui des fibres métalliques perd plus que 45% tandis que Les bétons B sans fibres, et le béton avec 1.5 de fibres polypropylène BP1.5 perdent plus de 60% de leur résistance initiale.

À 600°C, le béton avec des fibres de carbone et celui des fibres métalliques perdent moins que les deux bétons le béton sans fibres B et le béton avec les fibres polypropylène.

La perte de résistance à la flexion des bétons au rapport E/C faible, caractérisés par un matériau de faible perméabilité ainsi que l'affaiblissement du gel de C-S-H plus important dans la zone de transition pâte-granulats [Kanema, 2007].

L'utilisation des fibres métalliques ou de carbone dans le béton permet de rendre le matériau plus ductile. Les différents essais de flexion de la température ambiante jusqu'au cycle de chauffage-refroidissement de 600°C montrent une conservation de la ductilité des bétons de fibres métalliques et de carbone [Pliya 2010], [Haniche, 2012] et [chen 2004].

### III.3.4 Mesure des propriétés physiques

#### III.3.4.1 Perte de masse

Le béton exposé à de hautes températures entraîne, au niveau microstructural une dégradation qui conduit à une perte de masse du matériau. Cette perte de masse du béton est essentiellement due au départ de l'eau libre et de l'eau liée, ainsi que d'autres phénomènes comme la décomposition du gypse (150-300°C), la deshydroxylation de la Portlandite (300 - 600°C).

La valeur de perte de masse des bétons étudiés est illustrée Figure III.26.

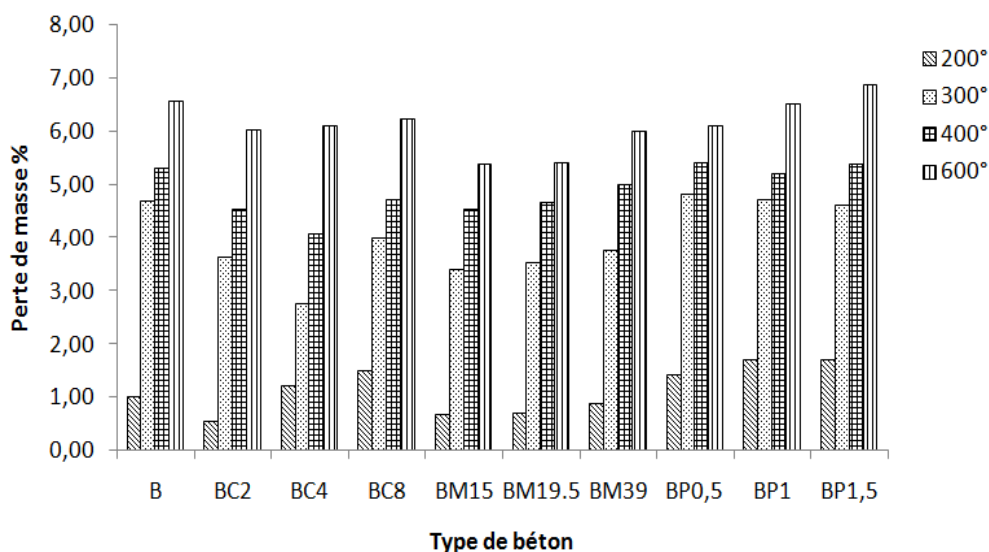


Figure III.26 Évolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement de différents types de béton.

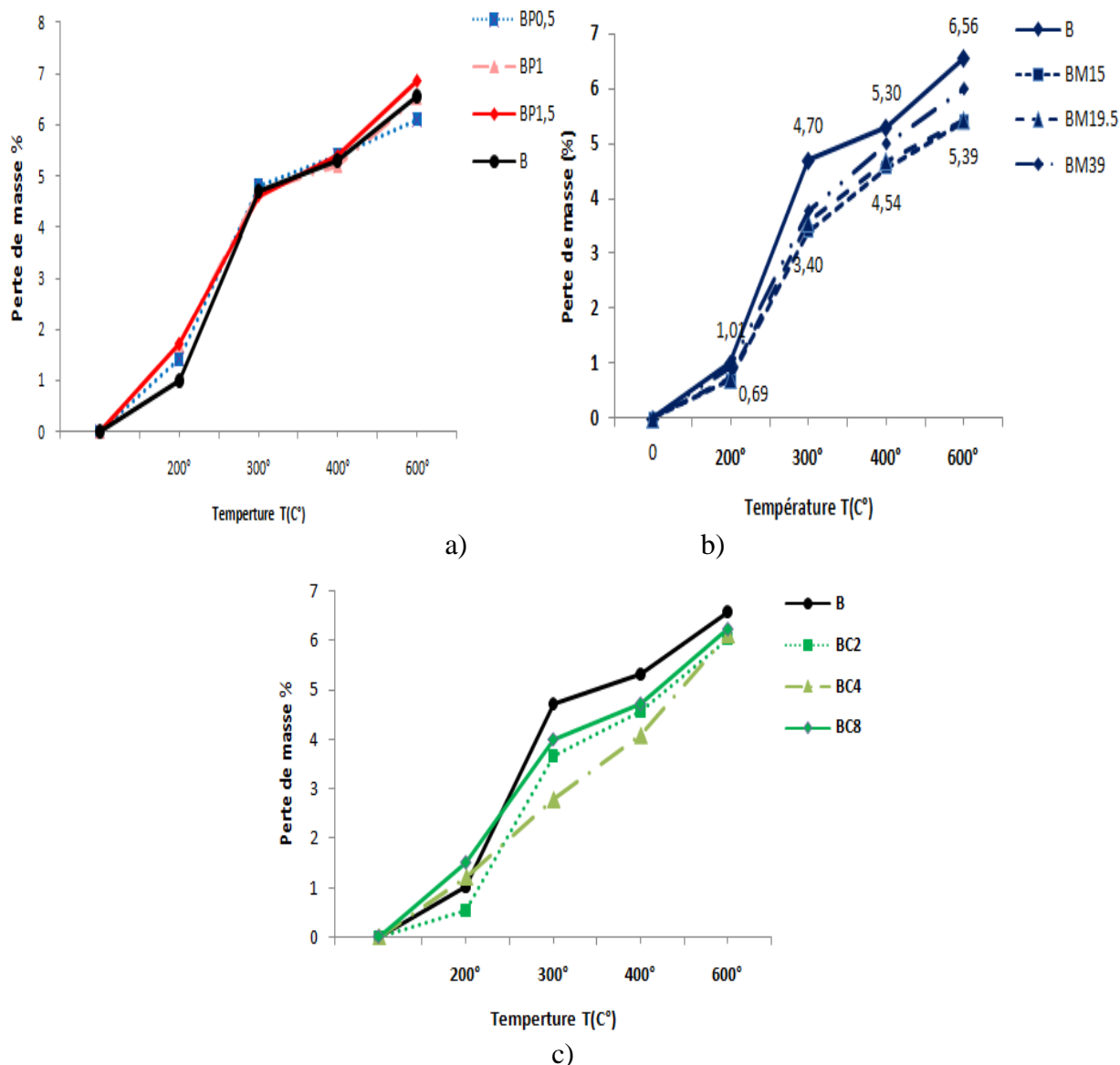
La présence des fibres dans le béton ne modifie pas l'allure de la courbe de la perte de masse du matériau. On distingue sur la courbe trois domaines différents : une faible perte de masse entre 20°C et 200°C et entre 300°C et 600°C, une perte de masse importante entre 200°C et 300°C. La perte de masse augmente avec l'augmentation de la température. Une augmentation de la cinétique de perte de masse des bétons fibrés a donc été constatée par l'auteur [Hager, 2004] et [Pilya, 2010]. Nous remarquons pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de

la perte de masse légèrement supérieure à celle des bétons sans fibres ou des bétons avec des fibres métalliques ou des bétons avec des fibres de carbone.

La variation de perte de masse entre les bétons dépend du type de fibres.

Avec l'ajout de fibres métalliques ou de carbone, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres.

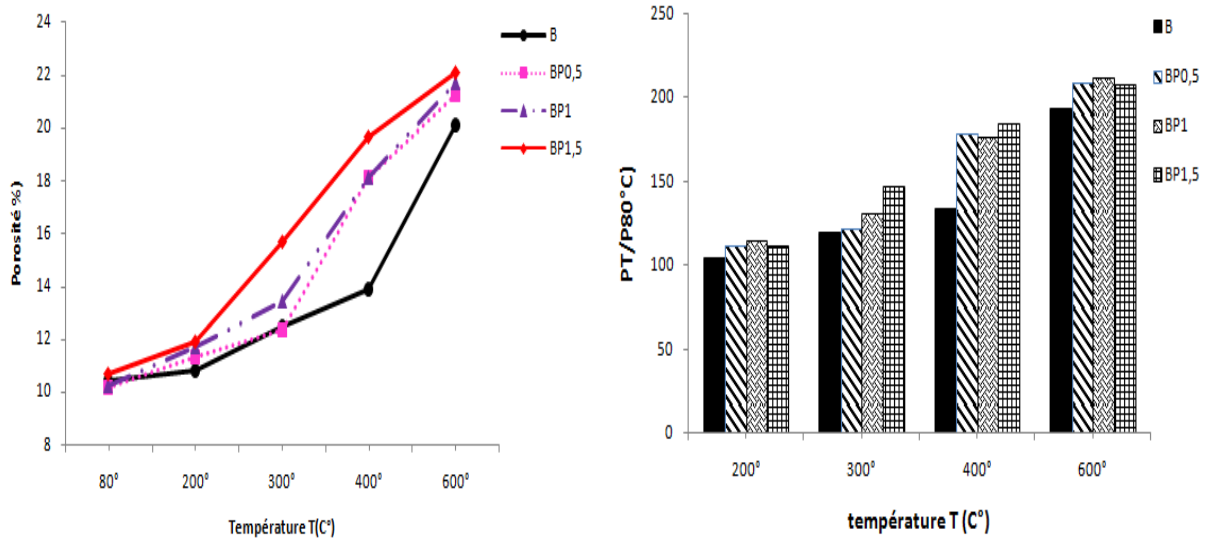
Nous remarquons pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des bétons sans fibres.



**Figure III.27** Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons  
 (a) Béton avec différents proportions de fibres polypropylènes.  
 (b) Béton avec différents proportions de fibres métalliques.  
 (c) Béton avec différents proportions de fibres carbonées.

### III.3.4.2 La porosité à l'eau

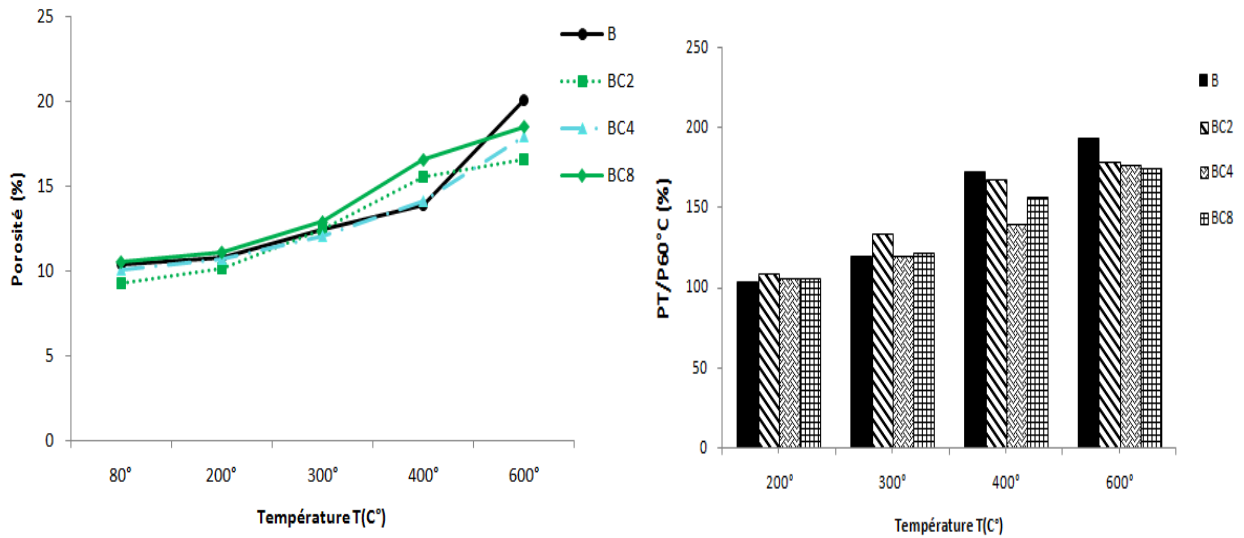
Les porosités obtenues par pesée hydrostatique pour tous les bétons de notre étude sont illustrées sur les figures III.28, III.29 qui représentent respectivement la porosité des bétons avec des fibres de polypropylène, et les bétons avec des fibres de carbone en fonction de la température de chauffage.



**Figure III.28** Évolution de la porosité résiduelle et relative des bétons avec différentes proportions de fibres polypropylènes en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

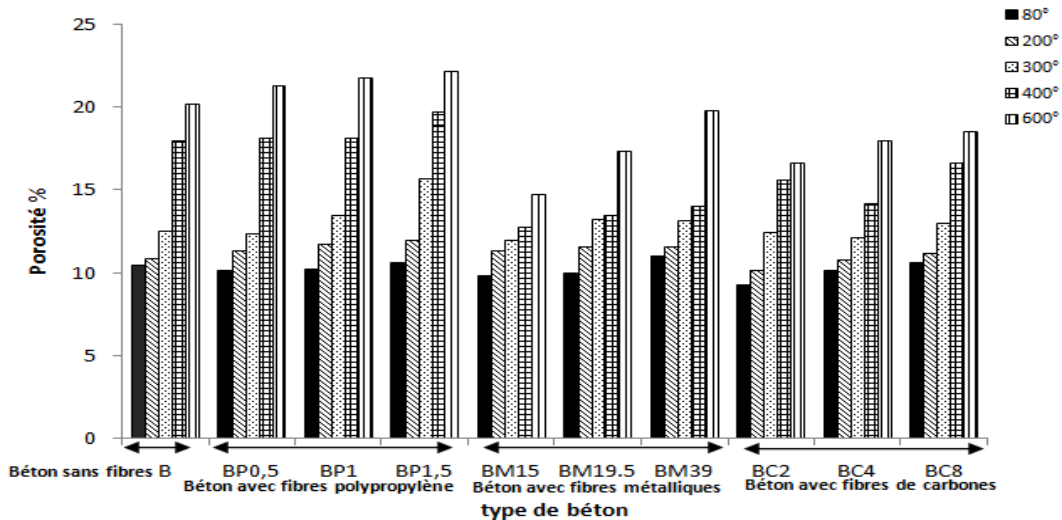
A la température 80°C, la porosité du béton sans fibres B est de 10.4% alors que Les bétons BP0.5, BP1 et BP1.5 avec des fibres de polypropylène, ont des porosités respectives de 10.15% 10,23 et 10.64%. A cette température la porosité varie peu avec l'ajout des fibres de polypropylène. Avec l'augmentation de la température, la porosité des bétons de fibres de polypropylène augmente plus vite que celle des bétons sans fibres.

Dans le cas du béton chauffé l'ajout de fibres de polypropylène entraine une augmentation de la porosité. Plus le dosage en fibres augmente, plus il y a des vides qui seront créés lors du chauffage et l'apparition d'une porosité supplémentaire. Ces résultats sont en accord avec les études effectuées par d'autres auteurs comme [Noumowé, 2002], [Hager, 2004],[Mindégua, 2009] et [Pilya, 2010]. L'augmentation de la porosité des bétons contenant des fibres polypropylène est liée à la microfissuration générée par la dilatation du polypropylène et aussi aux canaux formés après la fusion des fibres.



**Figure III.29** Évolution de la porosité résiduelle et relative en fonction de la température pour les bétons avec différents proportions de fibres de carbone en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

A la température 80°C, la porosité du béton sans fibres B est de 10.4% alors que les bétons avec des fibres de carbone BC2, BC4 et BC8 ont des porosités respectives de 9.29% 10,13 et 10.59%. A cette température les valeurs de la porosité sont très proches. Avec l'augmentation de la température, la porosité des bétons de fibres de carbone augmente moins vite que celle des bétons sans fibres. La présence des fibres de carbone limite l'apparition des fissures ce qui traduit cette variation de porosité entre le béton avec ajout et sans ajout de ce type de fibre. Toutefois il faut noter l'augmentation de la porosité avec l'augmentation des proportions de fibres.



**Figure III.30** Évolution de la porosité à l'eau en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement de différents types de béton.

La figure III.30 montre que la porosité des bétons augmente avec la montée en température quelque soit le type de béton. Pour tous les bétons à la température 200°C, les porosités sont très proches l'une de l'autre. Au-delà de cette température, on observe, une augmentation assez régulière de la porosité.



En comparant l'effet des fibres de polypropylène à celui des fibres métalliques ou celui de fibres de carbone, nous constatons que les bétons de fibres de polypropylène sont plus poreux que les bétons de fibres métalliques et les bétons avec des fibres de carbone et même au béton sans fibres avec l'augmentation de température.

### III.3.5 Mesure par essais non destructifs

#### III.3.5.1 Indice de rebondissement

L'intérêt de la campagne de mesure de dureté de surface est de faciliter la localisation des zones de faible qualité résiduelle de surface. Les lectures des valeurs de l'indice de rebondissement résiduelles et relatives sont présentées sur la figure III.31 pour les bétons avec des fibres polypropylène alors que la figure III.32 illustre les valeurs de l'indice de rebondissement résiduelles et relatives pour les bétons avec des fibres de carbone.

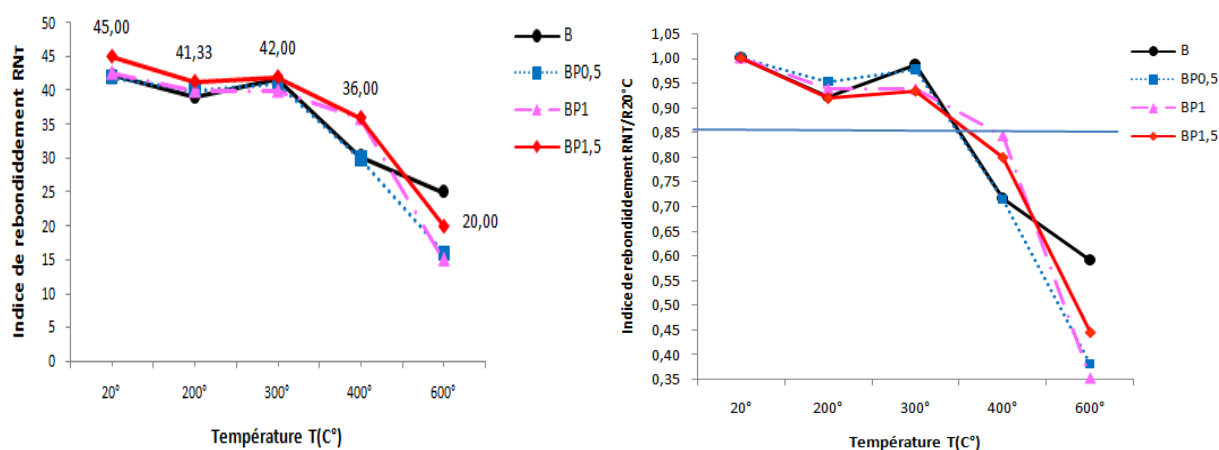


Figure III.31 Evolution d'indice de rebondissement résiduel et relatif (RNT/RN<sub>20°C</sub>) pour le béton sans fibres B et les bétons avec des fibres polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

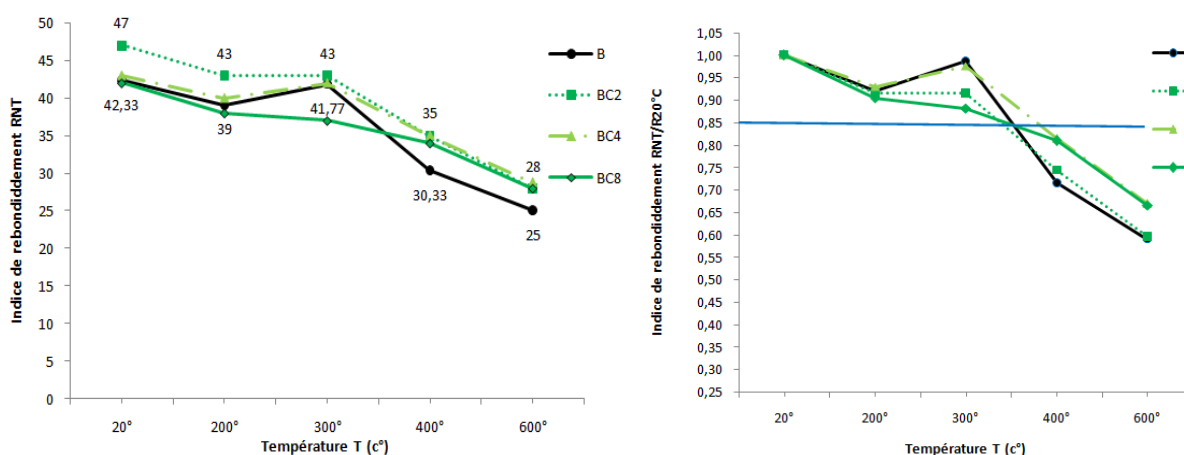


Figure III.32 Evolution d'indice de rebondissement résiduel et relatif (RN/RN<sub>20°C</sub>) pour le béton sans fibres B et les bétons avec des fibres de carbone en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

On constate que l'indice de rebondissement  $RN_T$  diminue sensiblement avec l'augmentation de la température. Toutefois il faut noter que les mesures de rebondissement ne présentent pas de changements significatifs dans l'intervalle de température 20° C – 300° C même si quelques fois

ils montrent une légère augmentation car il est influencé par le séchage et de durcissement de la de surface de béton [Toumi 2010], [Logothetos, 1981]. Ceci s'explique par le fait que les mesures sclérométriques caractérisent l'état de surface du béton [LCPC, 2005].

D'après les figures III.31, III.32 montrent que les bétons sans fibres ou avec des fibres de polypropylène et même avec les fibres de carbone gardent leur qualité jusqu'à la température 300° C. Au-delà le béton enregistre une forte diminution de l'indice de rebondissement relatif ce qui demande une enquête plus approfondie pour évaluer la qualité de béton (inferieure à valeur 0.85) [Annerel, 2013].

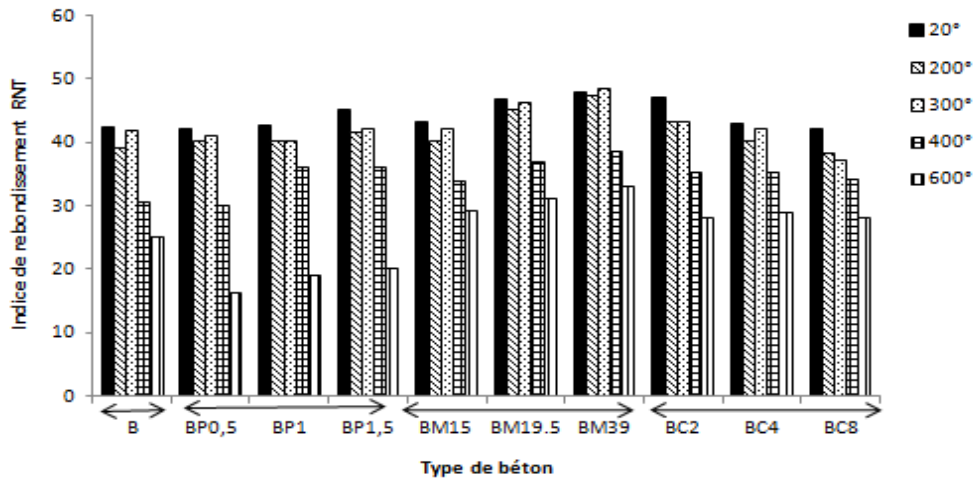


Figure III.33 Evolution d'indice de rebondissement résiduel en fonction de béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différentes températures du cycle de chauffage-refroidissement.

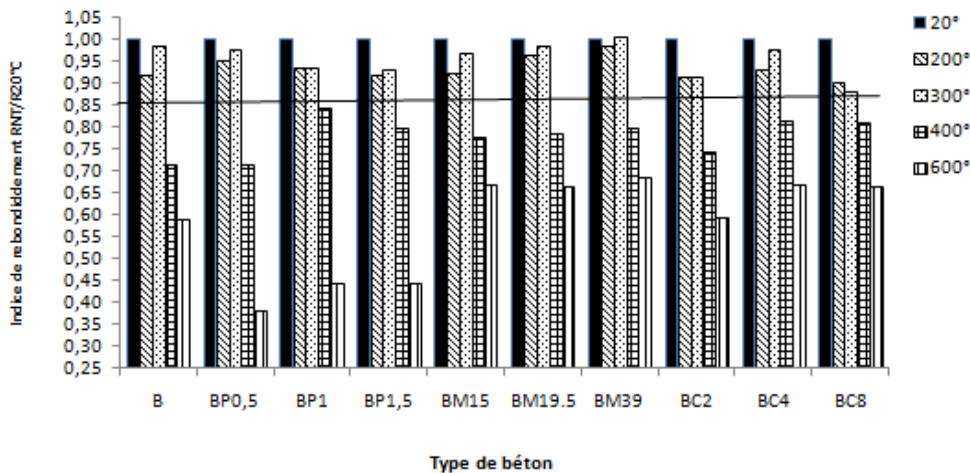
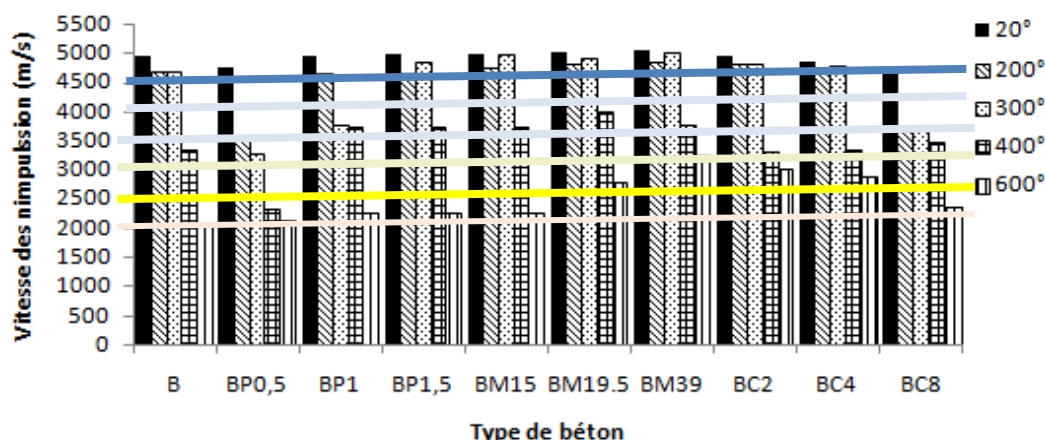


Figure III.34 Evolution d'indice de rebondissement relatif (RN/RN20°) en fonction du béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différentes températures du cycle de chauffage-refroidissement

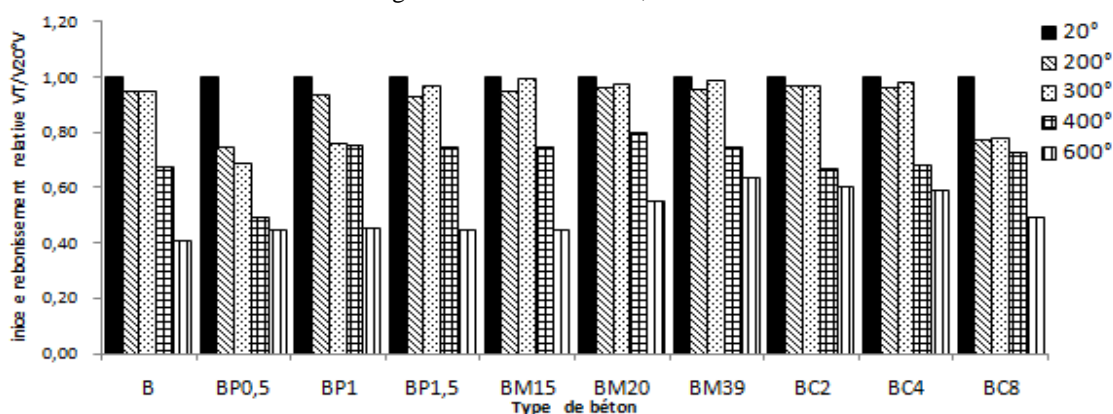
La figure III.33 et la figure III.34 regroupe les résultats des quatre types de béton formulés où on constate que l'indice de rebondissement résiduel et relatif des bétons avec des fibres diminue avec la température selon la même cinétique que le béton sans fibres. Globalement, l'évolution des valeurs de rebondissement en fonction de la température donne un aperçu sur l'état de la surface de béton quelque soit le type de béton. Il n'est pas influencé par les proportions ou le type de béton. Seule la température d'échauffement influe sur l'état de béton et les valeurs de l'indice vont dans le même sens que les résistances à la compression obtenues par écrasement des cubes de béton.

### III.3.5.2 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Les valeurs des vitesses résiduelles et relatives des ondes soniques avant et après l'exposition des bétons aux hautes températures sont présentées sur les figures suivantes :



a) **Figure III.35** a) Evolution de la vitesse des impulsions résiduelles en fonction de béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différents températures du cycle de chauffage-refroidissement b) classification de dégradation selon [LCPC, 2005].



**Figure III.36** Evolution de la vitesse des impulsions relatives en fonction du béton sans fibres B et des bétons avec des fibres de carbone pour différents températures du cycle de chauffage-refroidissement.

On remarque d'après la figure III.35 montre que la vitesse des ondes soniques diminue avec l'augmentation de la température quelque soit le type de béton.

Deux méthodes ont été trouvées pour évaluer la qualité de béton. La première selon la classification de Feidman [Feidman, 2005] ou [Whitehurst, 1966]. La deuxième selon le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC, 2005] qui se base sur la classification de couleur comme présenter sur la figure III.37.

Nos résultats sont interprétés selon la deuxième méthode, où l'on remarque que tous les résultats des vitesses d'impulsions des bétons à la température d'échauffement 300°C se situent dans la zone bleue, c à d elles sont supérieures à 3500 m/s.

Au-delà de cette température les résultats des vitesses des impulsions varient pour le béton avec des fibres métalliques et de carbone et qui se situent dans la zone jaune c.à.d béton noircie sans

dégradation visuelle, alors que les résultats des vitesses des impulsions du béton sans fibres ou avec des fibres polypropylène se situent dans la zone beige ce qui demande la réparation.

A 600°C les plupart des résultats des vitesses des impulsions des bétons sont dans la zone beige. Nous avons remarqué que nous n'avons pas la zone rouge et qui demande que les bétons soient exposés à des températures plus élevées que 600°C.

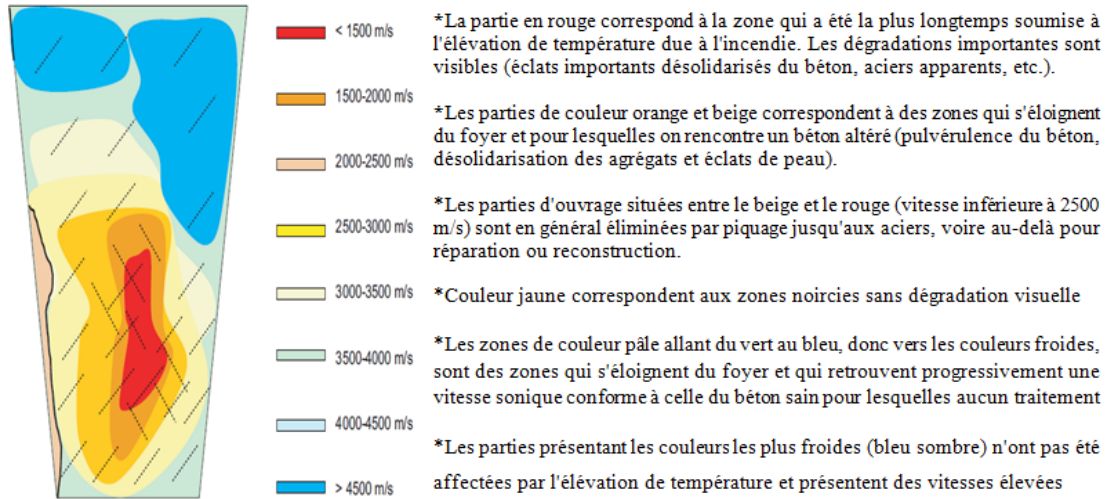


Figure III.37 Profil des dégradations cartographie selon les vitesses des impulsions [LCPC, 2005].

### III.3.6 Les Corrélations

#### III.3.6.1 Relation de corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement

Afin d'étudier la relation  $F_C - RN_T$ , nous avons tracé sur les figures III.38, III.39 la variation de résistance en compression en fonction de l'indice de rebondissement, la fonction de corrélation qui relie la résistance de compression  $F_C - RN_T$  est de forme linéaire :  $f_{c_T} = A.RN_T - B$

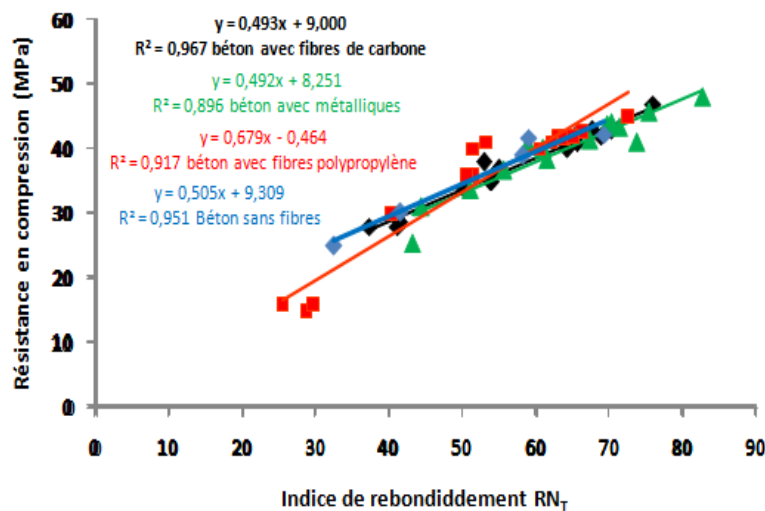


Figure III.38 Corrélation entre résistance compression  $F_{c_T}$  et indice scléromètre  $RN_T$  pour chaque béton séparément : béton avec fibres métalliques, béton sans fibres, béton avec des fibres de carbone et béton avec fibres polypropylène.

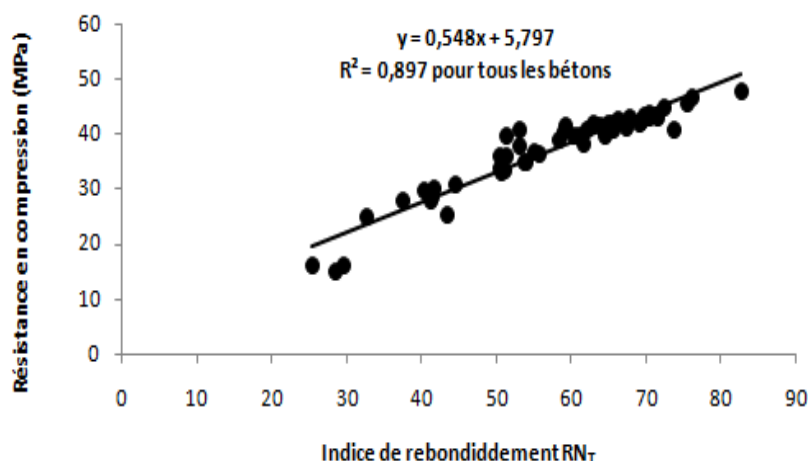


Figure III.39 Corrélation entre résistance compression  $F_{cT}$  et indice scléromètre  $RN_T$  pour chaque béton séparément : Tous les types de bétons.

On remarque qu'on peut établir des relations empiriques possibles entre la résistance du béton et les mesures non destructives comme le scléromètre et d'analyser la qualité de corrélation en prenant comme indicateur statistique le coefficient de détermination «  $r^2$  » qui détermine l'adéquation du modèle de régression pour décrire la distribution des données mesurées.

Les figures de corrélation montrent que le Rebond (scléromètre) offre une qualité de corrélation meilleure (avec des coefficients  $r^2 \geq 0,89$ ). On a constaté qu'il veut mieux fournir une courbe de régression individuelle pour évaluer le degré de dommages thermiques des bétons fabriqués qu'une courbe de corrélation pour tous les bétons assemblées.

### III.3.6.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse des impulsions

L'évaluation de la résistance à la compression est habituellement basée sur des corrélations empiriques établies entre la résistance à la compression par écrasement et les vitesses des impulsions correspondantes mesurées par ultrason, la fonction entre  $FC_T$  et UPV est de forme logarithmique tracée sur les figures III.40 et III.41.

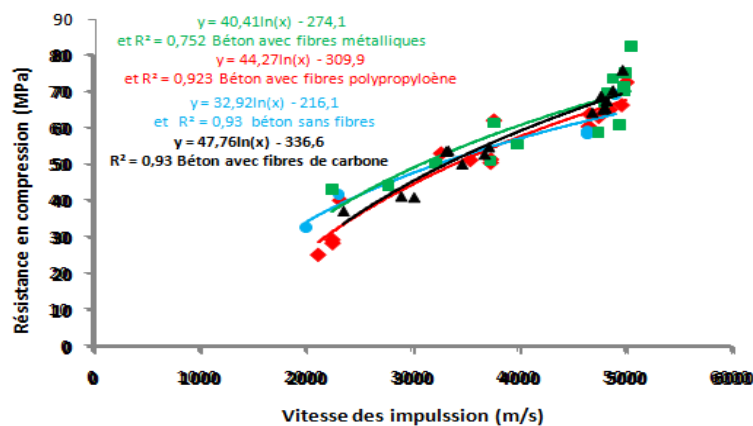
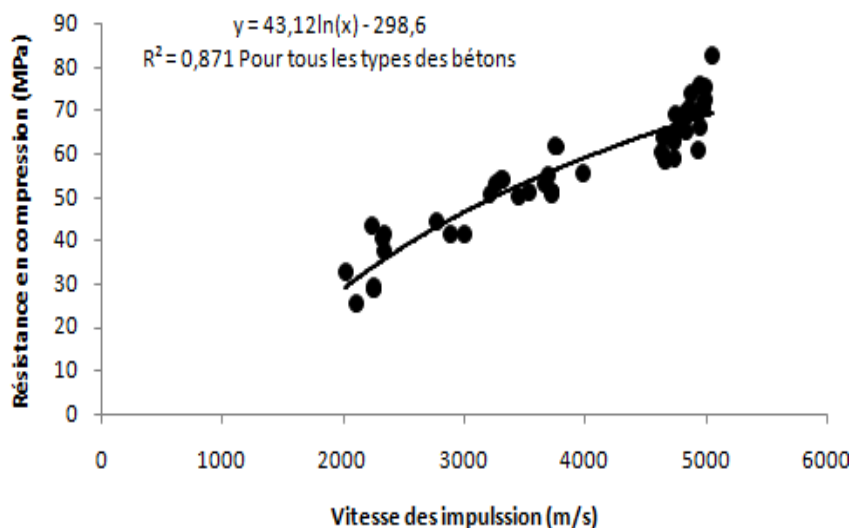


Figure III.40 Corrélation entre la résistance en compression  $F_{cT}$  et la vitesse des impulsions UPV pour chaque béton séparément : béton avec fibres métalliques, béton sans fibres, béton avec des fibres de carbone et béton avec fibres polypropylène.



**Figure III.41** Corrélation entre la résistance en compression  $F_{cT}$  et la vitesse des impulsions UPV pour chaque béton séparément : Tous les types de bétons.

La corrélation entre la résistance en compression  $F_{cT}$  et la vitesse des impulsions UPV obtenus dans ce cas montre que le coefficient  $r^2$  est quasiment identique pour les trois formes mathématiques du modèle pour les bétons sans fibres, béton avec fibres de carbone et béton avec fibres de polypropylène alors que pour le béton avec fibres métallique  $r^2 = 0,75$ . Toute fois on peut considérer la corrélation entre  $F_{cT}$  et UPV est fiable pour estimer la résistance en compression de béton avec différent types de fibres exposées à de hautes températures. Notre étude rejoint ceux de [Mróz, 2017], [Suhaendi, 2006] qui ont utilisé les essais non destructifs pour l'évaluation de la résistance en compression des bétons à haute température.

### III.4 Conclusion

Cette partie a mis en évidence dans quelle mesure l'utilisation des différents types de fibres influence sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons à haute température.

D'une manière globale, nous avons remarqué la baisse des performances mécaniques résiduelles des bétons avec la montée en température. L'ajout des fibres métalliques et de carbone a induit une amélioration des propriétés mécaniques résiduelles par rapport au béton sans fibres à la température ambiante et jusqu'au dernier cycle testé 600°C.

La résistance résiduelle en compression augmente avec l'ajout de fibres de polypropylène, ou nous remarquons que le dosage de  $1.5 \text{ kg/m}^3$  conduit à de meilleures performances mécaniques résiduelles. Et le dosage de  $2 \text{ kg/m}^3$  conduit à de meilleures performances mécaniques résiduelles pour le béton avec fibres de carbone.

L'augmentation de pourcentage des fibres de carbone apporte un effet néfaste sur la maniabilité de béton et la résistance en compression.

Pour les propriétés physiques l'ajout des fibres n'entraîne pas de modification de la cinétique de perte de masse avec la température. La perte de masse des bétons augmente avec la température

selon trois domaines de pentes différentes. Nous remarquons une perte de masse supplémentaire sur les bétons de fibres de polypropylène. La perte de masse, comme dans le cas des bétons sans fibres, dépend du rapport E/C. Avec l'ajout de fibres métalliques ou de carbone la perte masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres ou de béton polypropylène.

En comparant l'effet des fibres de polypropylène à celui des fibres métalliques ou de carbonées, nous constatons que les bétons de fibres de polypropylène sont plus poreux que les trois types de bétons après le chauffage.

De plus il apparait que l'utilisation des techniques non destructive donne une meilleure corrélation et en ce sens contribue à rendre l'évaluation de la résistance du béton plus fiable.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons l'effet combiné des fibres (métalliques – polypropylène, polypropylène - carbone et carbone - métalliques) sur les propriétés mécaniques résiduelles et physiques des bétons.

## *CHAPITRE IV*

*ANALYSE ET COMPARAISON DES RESULTATS DU  
COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE PERFORMANCE  
AVEC MÉLANGE DE FIBRES SOUMIS A HAUTE  
TEMPERATURE*



## IV.1 Introduction

Souhaitant approfondir la connaissance du comportement du béton avec les fibres exposées à des hautes températures, nous avons entrepris la même démarche précédente sur de nouvelles familles de bétons avec un mélange de fibres en ayant subi des cycles de chauffage - refroidissement dans le four. Notre but est de comparer le comportement à haute température du béton contenant à la fois des fibres métalliques et des fibres de polypropylène, nommé BPM(1x15), un béton contenant à la fois des fibres de polypropylène et des fibres de carbone, nommé BPC(1.5x2) et enfin une autre famille de béton contenant à la fois des fibres de carbone et des fibres métalliques, nommé BMC(15x2) à ceux du béton sans fibres B, un béton avec fibres de polypropylène BP1.5 et un béton avec fibres métalliques BM15 et un béton avec fibres de carbone BC2.

Les propriétés mécaniques et les propriétés physiques des bétons avant et après les sollicitations thermiques ont été déterminées. Les essais non destructifs sont appliqués aussi sur les familles de ces bétons. Enfin, il nous paraît également nécessaire de consacrer aux observations de dégradations des bétons en fonction de la température de chauffage par la méthode de traitement d'images ainsi qu'aux observations macroscopiques et microscopiques. Ce chapitre est une étude de caractérisation et de comparaison.

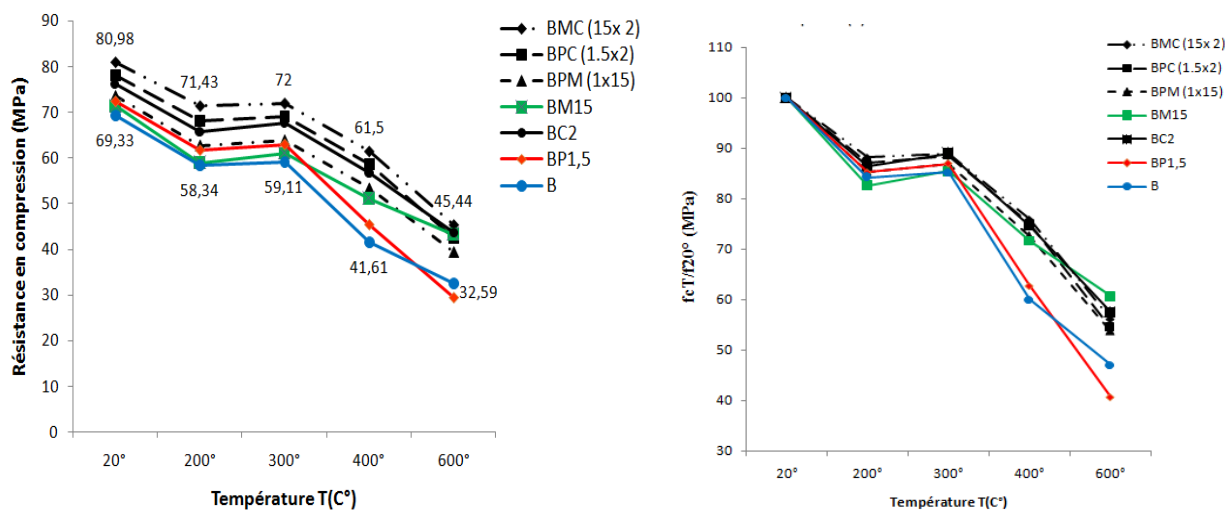
## IV.2 Les mesures des propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des bétons avant et après les sollicitations thermiques ont été déterminées grâce aux essais de compression, et de flexion.

Les bétons de ce chapitre présentés sur les figures sont comme suit B, BPM(1x15), BPC(1.5x2), BMC(15x2), BP1.5, BM15 et BC2. En rappelant que la désignation retenue pour nos bétons correspond à la nomenclature suivante : pour chaque matériau par sa première lettre, c'est à dire «B» pour le béton, puis la deuxième lettre désigne « M » pour les fibres métalliques, ou « P » pour les fibres polypropylène ou « C » pour les fibres de carbone. Le nombre venant tout de suite après indique la quantité des fibres en Kg, pour le mélange de fibres on ajoute une troisième lettre désignant les fibres ajoutées au mélange, ainsi que le signe «fois» puis la deuxième quantité des fibres en Kg et les deux chiffres sont entre deux parenthèses.

### IV.2.1 Résistance en compression

La figure IV.1 présente les résultats de résistances à la compression résiduelles et relatives (normalisée par rapport à la valeur initiale mesurée à 20°C) des bétons avec le rapport E/C=0.35 après des sollicitations thermiques dont la rampe de montée en température est fixée à 10°C/min et le palier de stabilisation dure une heure.



**Figure IV.1** Évolution de la résistance résiduelle et relative en compression du béton sans fibres B et des différents types de bétons de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.

Toutes les courbes de la résistance à la compression sont composées de deux zones qui caractérisent le comportement des bétons à haute température. Une légère diminution de la résistance, puis des maintiens, ou des augmentations de résistance mais dans tous les cas de faible ampleur à 300°C et ensuite une diminution continue avec l'augmentation de la température. Cette constatation a également été faite par d'autres chercheurs comme [Chen, 2004], [Kanema, 2007], [Farés, 2009], [Mindeguia, 2009], [Pilya, 2010] et [Hachemi, 2015].

Nous avons constaté que pour les bétons BMC (15x2) et BPC (1.5x2), une amélioration de la résistance en compression résiduelle par rapport aux autres bétons, cette amélioration est constatée dans le domaine de température de 20°C jusqu'au 600°C.

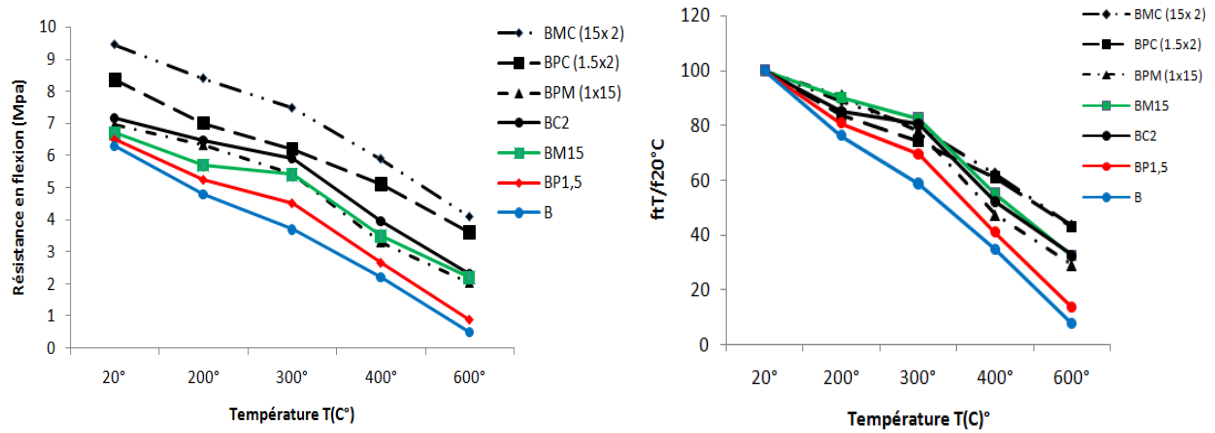
Dans la première zone qui varie de la température ambiante à 300°C, le béton sans fibres B perd 16% de sa résistance initiale tandis que les bétons BMC (15x2) et BPC (1.5x2) n'en perdent en moyenne que 12% alors que les autres bétons BP1.5, BM15, BC2, BPM (1x15) perdent en moyenne environ 14% de leur résistance initiale. Les bétons de mélange de fibres contenant les fibres de carbone additionné soient aux fibres polypropylènes ou aux fibres métalliques perdent moins rapidement de résistance que les bétons sans fibres.

Dans la deuxième zone, au-delà de 300°C, la baisse de résistance devient plus forte et à 600°C, la baisse de résistance résiduelle relative des bétons B et BP1.5 sont plus de 50%. Par contre pour les autres bétons leurs pertes de résistance est de moins de 45% de leurs résistance initiale.

La résistance des bétons de mélange de fibres est beaucoup plus proche de celle des bétons de fibres de carbone et fibres métalliques que celle des bétons de fibres de polypropylène. Les résultats issus du présent travail corroborent ceux de la littérature. D'après [Chen et al, 2004], [Poon et al, 2004] et [Suhaendi et al, 2006] [Pilya, 2010] [Cavdar, 2012] et [Yermak, 2015] qui ont observé un gain de résistance des bétons de mélange de fibres par rapport au béton sans fibres.

### IV.2.2 Résistance en flexion

La figure IV.2 montre l'évolution de la résistance résiduelle et relative en flexion des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température de chauffage.



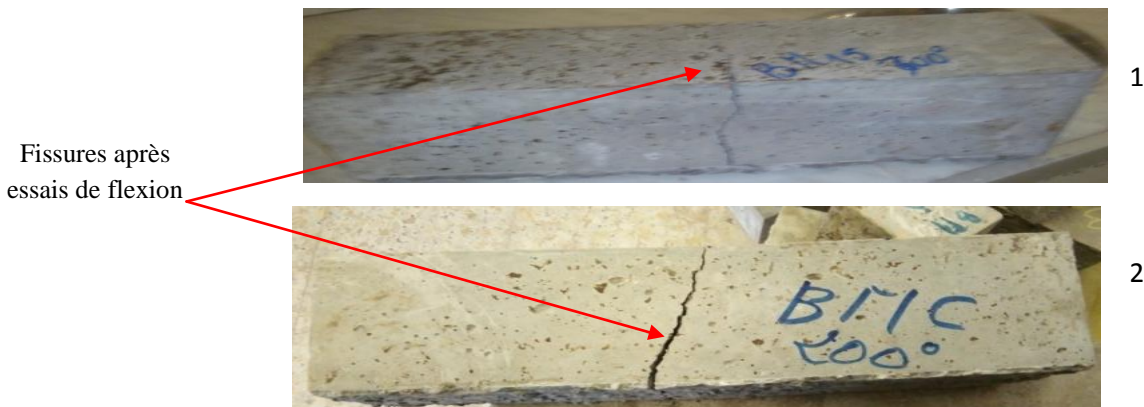
**Figure IV.2** Évolution de la résistance résiduelle et relative en flexion de béton sans fibres B et des différents types de bétons de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.

La résistance à flexion des bétons diminue avec la température quel que soit le type de béton.

D'une manière générale, les performances mécaniques des bétons avec les fibres sont meilleures que celle du béton sans fibres.

L'apport de mélange de fibres BMC ou BPC est remarqué dès la température ambiante. Le gain de résistance à la traction à 20°C est de 50 % par rapport au béton non fibré, 32 % par rapport au béton avec des fibres de carbone et plus de 40% par rapport au béton avec des fibres métallique ou fibres polypropylène. Ce gain est observé jusqu'au chauffage à 600°C.

Les fibres métalliques tout comme les fibres de carbones sont utilisées dans le béton pour améliorer sa ductilité à température ambiante. Un bon comportement ductile du béton contenant le mélange de fibres est observé non seulement à température ambiante mais aussi à la suite des différents cycles de chauffage refroidissement. Ce comportement de résistance à la traction a déjà été observé par plusieurs auteurs [Chen et al,2004], [Tanyildizi,2008],[Pilya,2010] et [Yermak,2015].



Fissures après essais de flexion

1

2

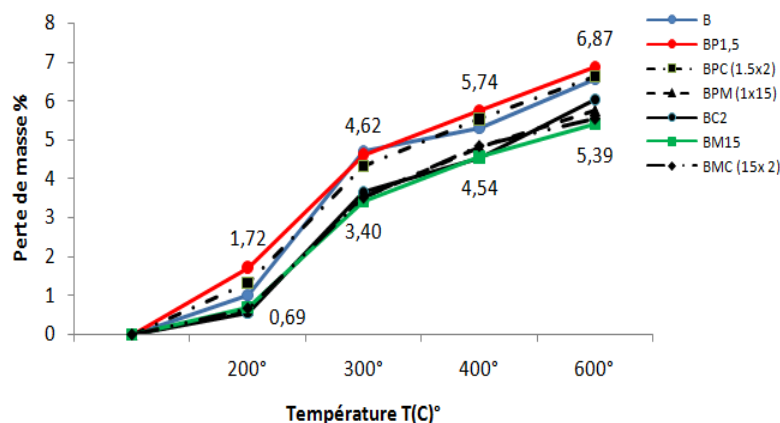


**Figure IV.3** Des éprouvettes de bétons avec 1) fibres métalliques 2) mélange fibres métalliques et carbone 3) béton avec fibre de carbone et béton sans fibres après essai de flexion.

## IV.3 Mesure des propriétés physiques

### IV.3.1 Perte de masse

Durant le chauffage le béton perd une masse liée au départ de l'eau libre contenue dans les capillaires, de l'eau liée présente dans les hydrates, ainsi que d'autres phénomènes qui se produisent comme la décarbonatation.



**Figure IV.4.** Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les différents bétons.

La figure IV.4 illustre l'évolution de la perte de masse des différents types de bétons. Un béton sans fibres B et le béton avec fibre polypropylène BP1.5, béton avec fibres métalliques BM15 et un béton avec des fibres de carbone BC2 ainsi que l'ensemble des bétons avec mélange de fibres BPM (1x15), BMC (15x2) et BPC (1.5x2).

L'analyse des résultats a mis en évidence la diminution de masse suite à la sollicitation thermique. Les trois domaines pour les bétons étudiés précédemment sont observés.

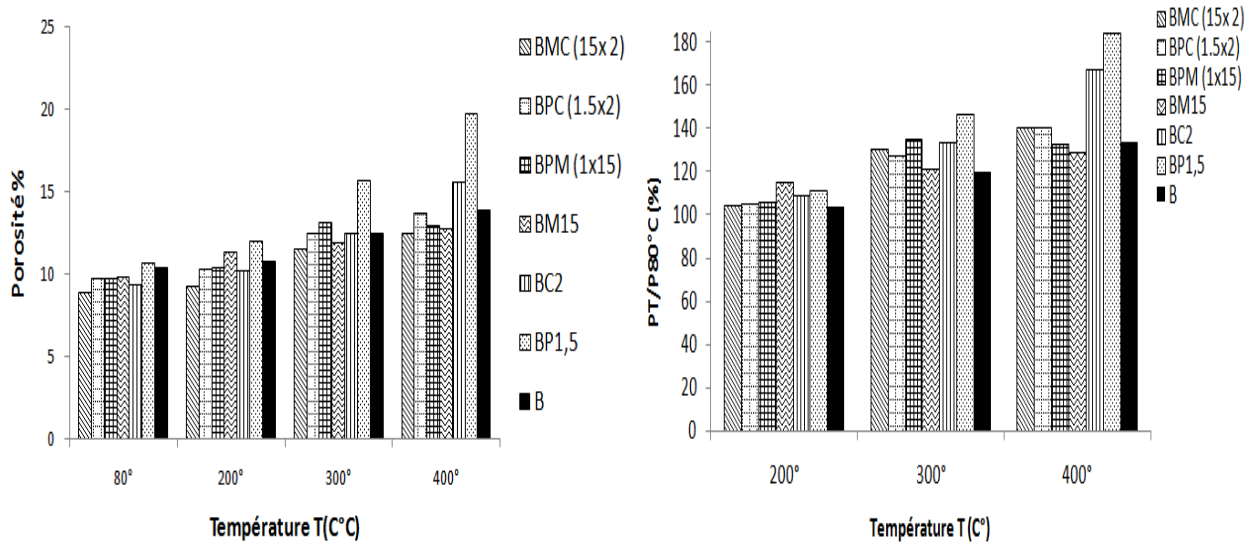
Nous remarquons pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des autres bétons. Les bétons de fibres métalliques subissent une perte de masse moins que les autres bétons ; il en est de même que celle des bétons avec mélange de fibres contenant des fibres métalliques.

Après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C, la perte moyenne de masse des bétons BP1.5, les bétons sans fibres B et le béton BPC (1.5x2) dépassent 6.50% , tandis que les bétons avec fibres métalliques BM15 et le béton avec des fibres de carbone BC2 ainsi que l'ensemble des bétons avec mélange de fibres BPM (1x15), BMC (15x2) et BPC (1.5x2) leurs pertes ne dépassent pas 6% .

On peut conclure que les pertes de masse des bétons de mélange de fibres sont inférieures à celles des bétons sans fibres après chauffage. Cette observation rejoint celle faite par [Pilya, 2010] et [Yermak, 2015].

### IV.3.1 La porosité

Les mêmes étapes sont suivies pour déterminer la porosité par peser hydrostatique pour le mélange de fibres. La mesure de la porosité permet de caractériser la microstructure poreuse du béton, et sa variation en fonction de la température, cette variation est présentée sur la figure IV.5. Nous présentons les résultats de porosité pour les températures 80°C, 200°C, 300°C et 400°C.



**Figure IV.5.** Évolution de la porosité absolue et porosité relative pour les différents bétons en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.

La figure IV.5 illustre l'évolution de la porosité des bétons de mélange de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques et de carbone. Comme attendu, la porosité des bétons augmente en fonction de la température de chauffage.

Entre 80°C à 300°C on n'observe pas ou très peu d'évolution de la porosité accessible à l'eau pour tous les types de béton, tous ont remarqué une légère baisse de porosité des bétons de mélange de fibres par rapport aux autres types de béton. Ceci s'explique par le fait que la porosité est liée à la dégradation microstructurale (les fissures et leurs ouvertures) or on a remarqué qu'il n'y a quasiment pas d'endommagement des éprouvettes jusqu'à la température 300°C. La porosité du béton sans ou avec des fibres diffère à la température 300°C de celle du béton de fibres de polypropylène.

À 400°C, la porosité augmente mais elle diffère d'un béton à l'autre. Les fibres polypropylène engendrent de la porosité dans les bétons, cette dernière est liée à la microfissuration générée par la dilatation du polypropylène et aussi aux canaux formés après la fusion des fibres [Pilya, 2010]. Alors que la présence des fibres métalliques limite l'apparition de porosité supplémentaire induite par les fibres de polypropylène à cette température.

## IV.4 Mesure par essais non destructifs

### IV.4.1 Indice de rebondissement

L'objectif est d'observer l'évolution de l'indice de rebondissement des bétons après des sollicitations thermiques, ces résultats sont comparés entre eux. Ils permettent d'observer l'incidence de l'indice de rebondissement qui diminue plus rapidement au-delà de la température de 300°C. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures IV.6.

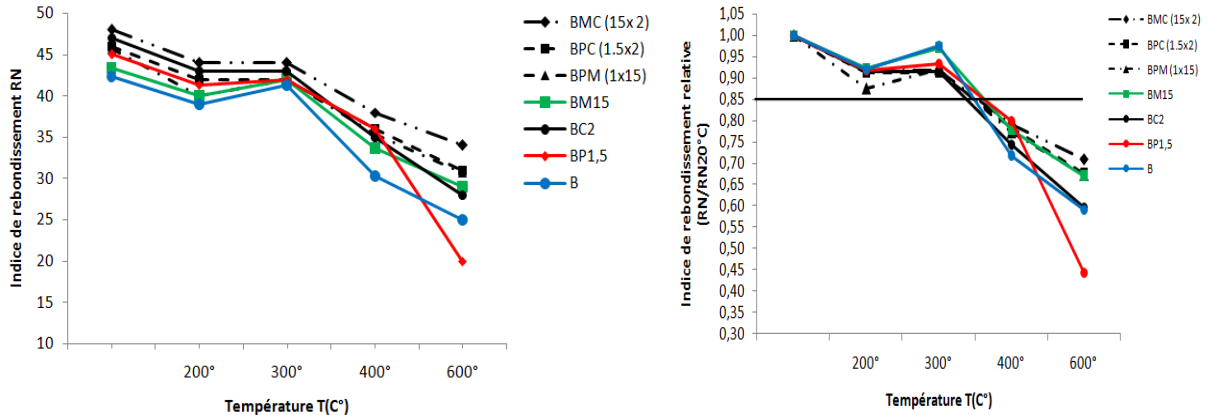


Figure IV.6 Évolution de l'indice de rebondissement absolu et relatif en fonction de la température pour les différents bétons.

Toutes les courbes de l'indice de rebondissement sont composées de deux domaines. Dans le premier domaine, s'étalant de la température ambiante au seuil de changement de comportement, on observe un palier, une diminution et parfois une amélioration de l'indice de rebond. Au-delà de ce seuil, toutes les compositions de bétons voient leur indice de rebond diminuer.

On peut remarque que l'indice de rebondissement relatif pour tous les bétons est inférieure à 0.85 après la température 400°C quel que soit le type de béton.

### IV.4.2 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Selon les valeurs obtenues de UPV présentées dans de la Figure IV.7, il est clair que les vitesses des impulsions baisse avec l'augmentation de la température Ces résultats corroborent ceux de [Chung et al, 1985], [Suhaendi, 2006], [Hachemi, 2015], [Morz et al, 2017]

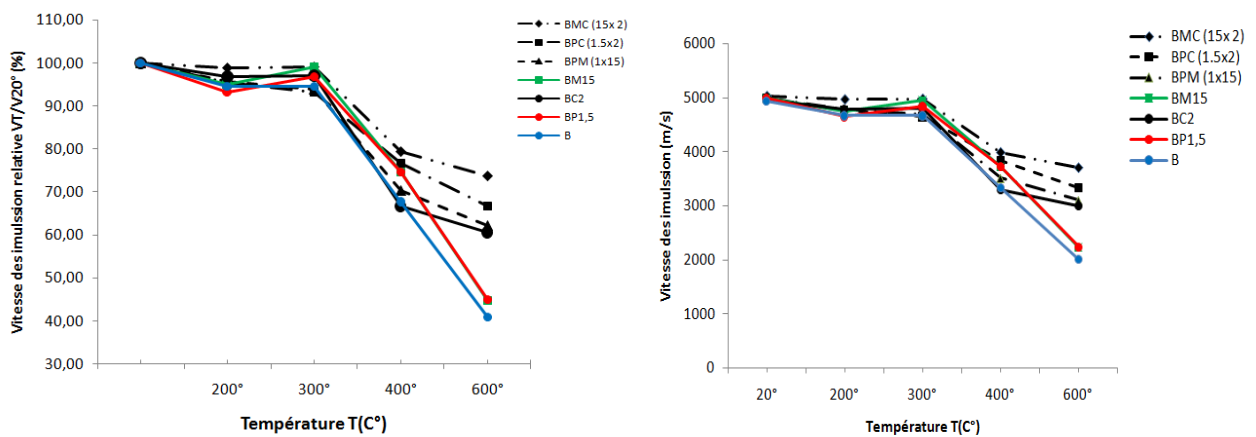


Figure IV.7 Évolution de la vitesse des impulsions absolues et relatives en fonction de la température pour les différents bétons.

On remarque que ces essais interprètent le comportement des bétons soumis à haute température puisque la vitesse des ondes soniques diminue avec l'augmentation de la température.

En observant l'ensemble des résultats de la vitesse des ondes sonores résiduelles, il est possible de scinder son évolution en deux grands domaines. Le premier domaine situé entre la température ambiante à 300°C voit une diminution légère de la vitesse des ondes sonores comme les bétons de mélange de fibres BMC(15x2), BPC(1.5x2) et BPM(1x15) ainsi que BC2 et BM15 leurs perte de vitesse relative ne dépasse pas approximativement 4.9 % de leurs vitesses initiales alors que le béton sans fibres B et le béton avec le polypropylène BP1.5 leurs pertes sont respectivement 5.4% et 6.8%. Ce phénomène peut être expliqué par l'apparition des fissures et la fusion des fibres polypropylène.

Le second domaine, situé après 300°C, montre une diminution de la vitesse des ondes sonores avec l'élévation de la température. Celle-ci est due à la fois à la dégradation de la matrice cimentaire et des granulats. Elle montre également l'importance de la coalescence des fissures sur la baisse de la vitesse des ondes sonores des bétons. La perte des vitesses des ondes sonores diffère d'un béton à l'autre comme le béton de mélange de fibres leurs pertes ne dépassent pas 37% alors que les autres bétons leurs perte dépassent 40%.

## IV.5 Les Corrélations

### IV.5.1 Relation de corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement

Le rebond a été considéré comme un observable de contrôle non destructif qui est lié à la dureté de la surface du béton. On peut donc estimer la résistance mécanique par le modèle empirique. La forme linéaire a été choisie pour le rebond. La figure IV.8 présente les courbes d'intersection entre la résistance en compression résiduelles  $f_{cT}$  et les valeurs du rebond mesurées  $RN_T$  des bétons formulées avec le mélange de fibres BMC, BMP et BPC ainsi que le béton sans fibres.

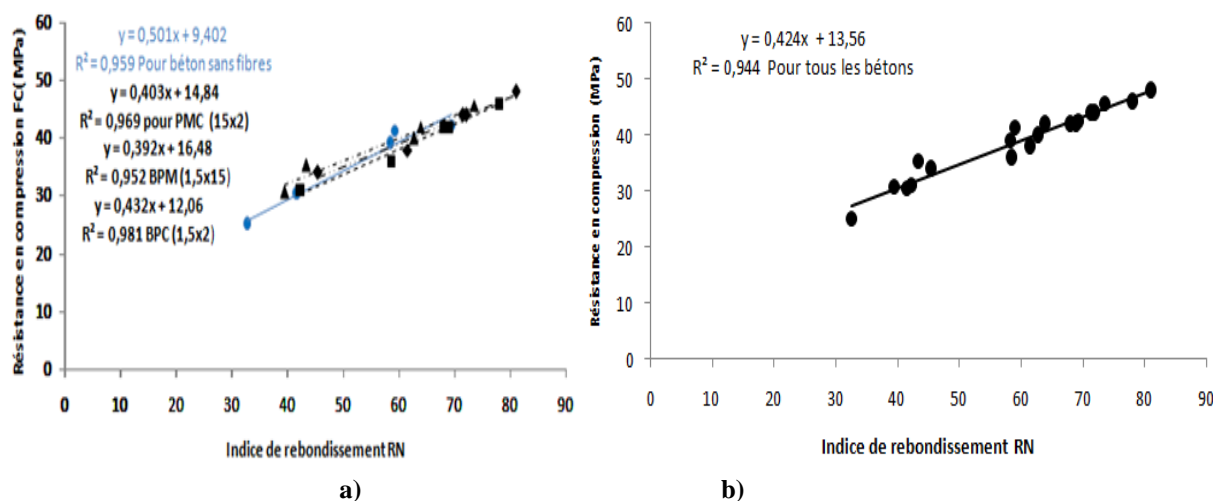


Figure IV.8 a) Corrélation entre résistance compression  $F_{cT}$  et indice scléromètre  $RN_T$  pour chaque béton séparément  
b) Corrélation entre résistance compression  $F_{cT}$  et indice scléromètre  $RN_T$  pour tous les types des bétons rassemblés.

Les figures de corrélation montrent que le Rebond (scéliromètre) offre une qualité de corrélation meilleure pour tous les types de bétons. Puisque l'indicateur statistique «  $r^2$  » qui détermine l'adéquation du modèle de régression pour décrire la distribution des données mesurées est supérieur à  $r^2 \geq 0,95$  quel que soit le type de béton. Toujours la même remarque décrite par [Morz et al, 2017] et [Abdulkadirou, 2017] où ils ont constaté qu'il fournit mieux une courbe de régression individuelle pour évaluer le degré de dommages thermiques des bétons fabriqués qu'une courbe de corrélation pour tous les bétons assemblés ou  $R^2 > 0,94$ .

#### IV.5.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse des impulsions

Les corrélations empiriques de forme logarithmiques établies entre la résistance à la compression pour le béton sans fibres B, le béton BPC (1.5x2), le béton BMC(15x2) et le béton BPM(1x15) et la vitesse des impulsions y correspondant sont mesurées par l'ultrason, sont tracées sur la figure IV.9.

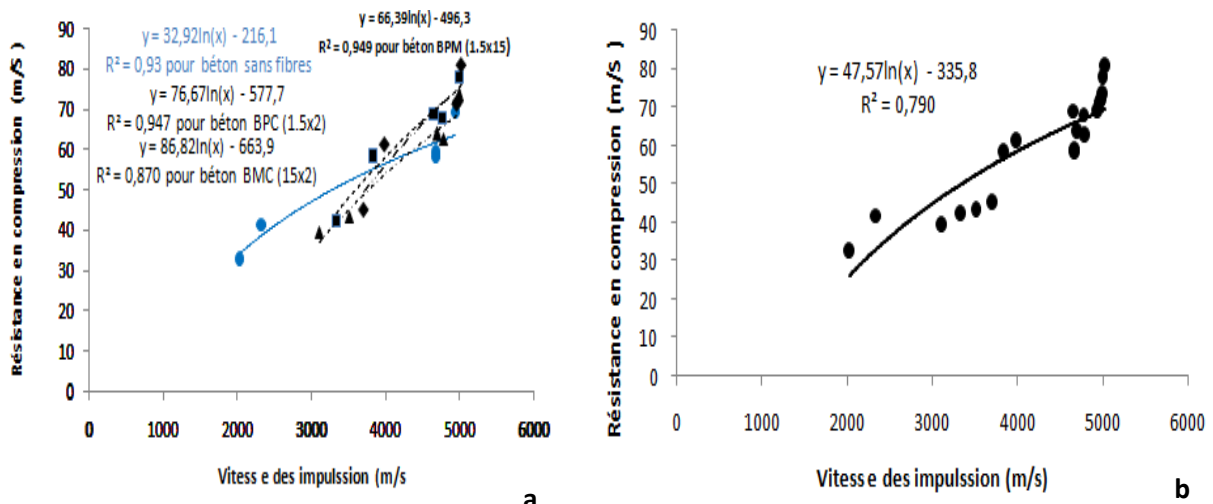


Figure IV.9 a) Corrélation entre la résistance en compression  $F_{cT}$  et la vitesse des impulsions UPV pour chaque béton séparément b) Corrélation entre la résistance en compression  $F_{cT}$  et la vitesse des impulsions UPV pour tous les types des bétons assemblés.

On constate que la méthode ultrasonore a été utilisée pour mesurer les vitesses des impulsions ultrasonores afin de déterminer la qualité des bétons de fibres et elle peut permettre aussi d'identifier un modèle empirique entre la résistance à la compression du béton et les mesures UPV.

#### IV.6 OBSERVATION DE LA DÉGRADATION DES BÉTONS

Le contrôle visuel est probablement le plus important de tous les essais non destructifs dans le cas des incendies ou à des températures élevées puisqu'il peut souvent fournir des informations pour donner une indication préliminaire de l'état de la structure et de permettre la formulation d'un programme de tests ultérieurs.

D'une manière générale, on constate sur l'ensemble des bétons testés que :

- ✓ Après un échauffement et refroidissement à la température 200°C et 300°C, on remarque qu'aucun endommagement n'est visible à l'œil nu pour tous les bétons testés.



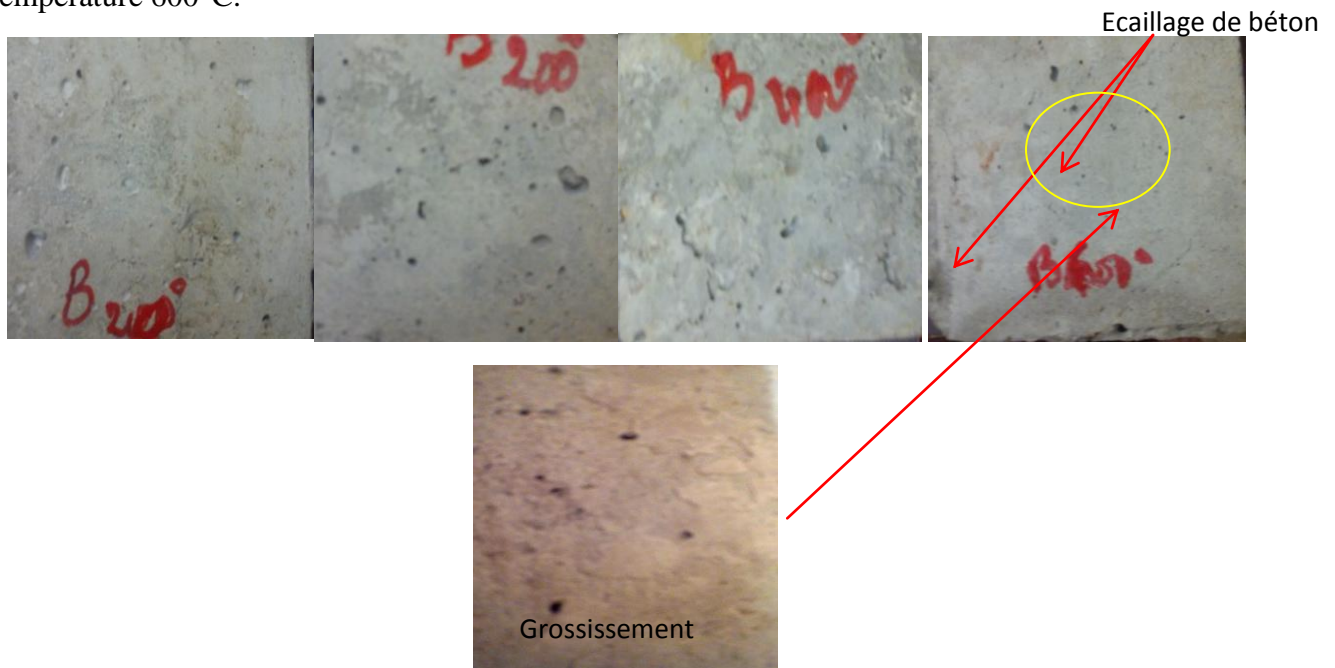
- ✓ Après un chauffage à la température 400°C apparaissent des microfissures difficilement à repérer à l'œil nu, mais clairement visibles par microscope optique ou loupe binoculaire.
- ✓ Après échauffement à la température 600°C, nous avons noté un endommagement très important, les fissures sont visible à l'œil nu, en plus de l'augmentation du nombre de fissures ainsi que l'importance de l'ouverture.
- ✓ L'endommagement du béton diffère par la densité et l'ouverture des fissures ; les informations sur la densité des fissures sont utiles pour déterminer la température d'exposition (Toumi, 2010)

#### IV.6.1 Les observations visuelles

Les observations visuelles des différents bétons sont présentées sur les figures IV.10 et IV.15, on remarque qu'après échauffement et refroidissement à la température 200°C et 400°C, on remarque qu'aucun endommagement n'est visible à l'œil nu pour les pluparts des types de béton.

On remarque à la température 600° C, les fibres métalliques s'arrachent et ne rompent pas. Pour la même température les fibres de polypropylène n'apparaissent pas, par contre les fibres de carbone sont dispersées à la température 600° et apparaissent au cœur des éprouvettes et même en surface.

Il est également important de noter qu'aucun éclatement n'a été observé pour tout les types de bétons sauf pour le béton sans fibres on remarque un écaillage de surface (surface gratter) à la température 600°C.



**Figure IV. 10** Observation visuelle de béton sans fibres à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 20°C, 200°C et 400°C, et 600°C



**Figure IV. 11** Observation visuelle de béton de fibres métalliques à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C et 300°C, et 600°C



**Figure IV.12** Observation visuel de béton de fibres polypropylène à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C et 300°C, 400°C et 600°C



**Figure IV.13** Observation visuel de béton de fibres carbone C2 à la température ambiante et après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C, et 600°C



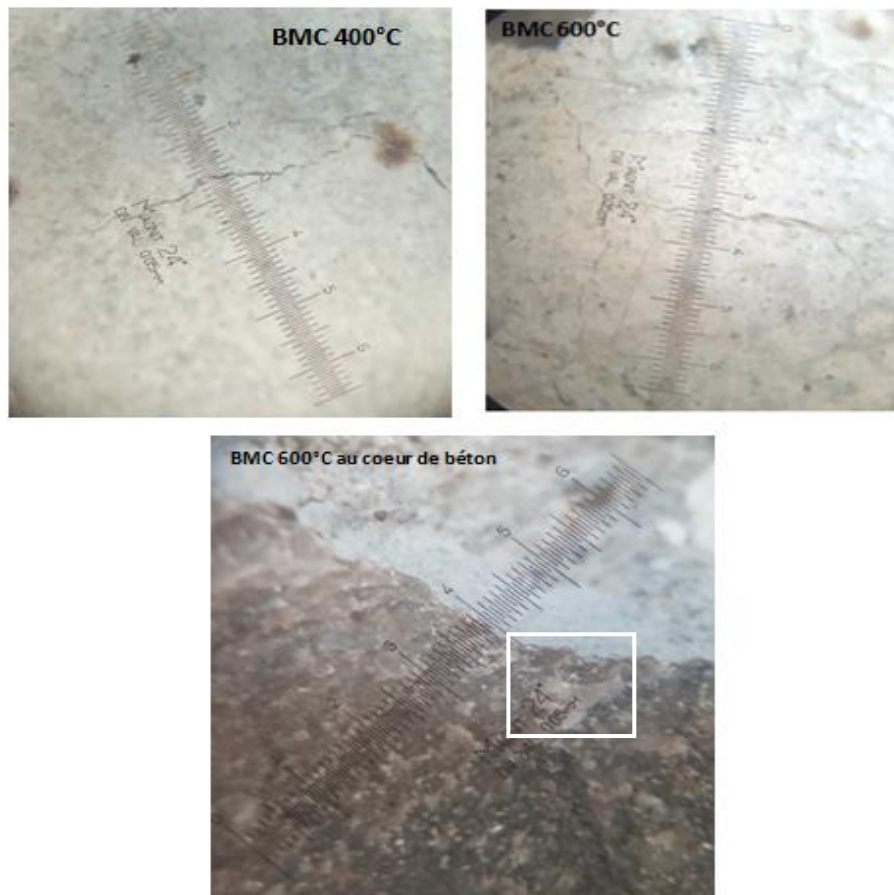
**Figure IV.14** Observation visuelle de béton de mélange de fibres à la température 600°C (BMC, BPC, BMP) respectivement après les cycles de chauffage-refroidissement.



**Figure IV.15** Observation visuel de béton après essais d'écrasement des éprouvette pour béton de fibres polypropylène, béton de fibres métalliques , béton de fibres de carbone et béton sans fibres après les cycles de chauffage-refroidissement à 200°C.

#### IV.6.2 Observation au microscope optique des fissures

Le microscope optique (Magnit 24x MPB-2) permet de visualiser des détails invisibles pour nos yeux par un agrandissement d'environ 24x. À cette échelle, nous pouvons évaluer la largeur de l'ouverture des fissures et à quelle température d'exposition se manifestent ces fissures. Dans cette série d'essai à titre présentatif :\* Béton avec mélange fibres polypropylène et métallique \* Béton avec mélange fibres polypropylène et carbone \* Béton de fibres de carbone \*Béton de fibres métalliques \* Béton de fibres de polypropylène et \* béton sans fibres. L'ensemble des résultats est présenté sur le tableau IV.1.



**Figure IV.16** Observation au microscope optique de béton de fibres mélangé de fibres métalliques et de fibres de carbone chauffé à 400°C et 600°C

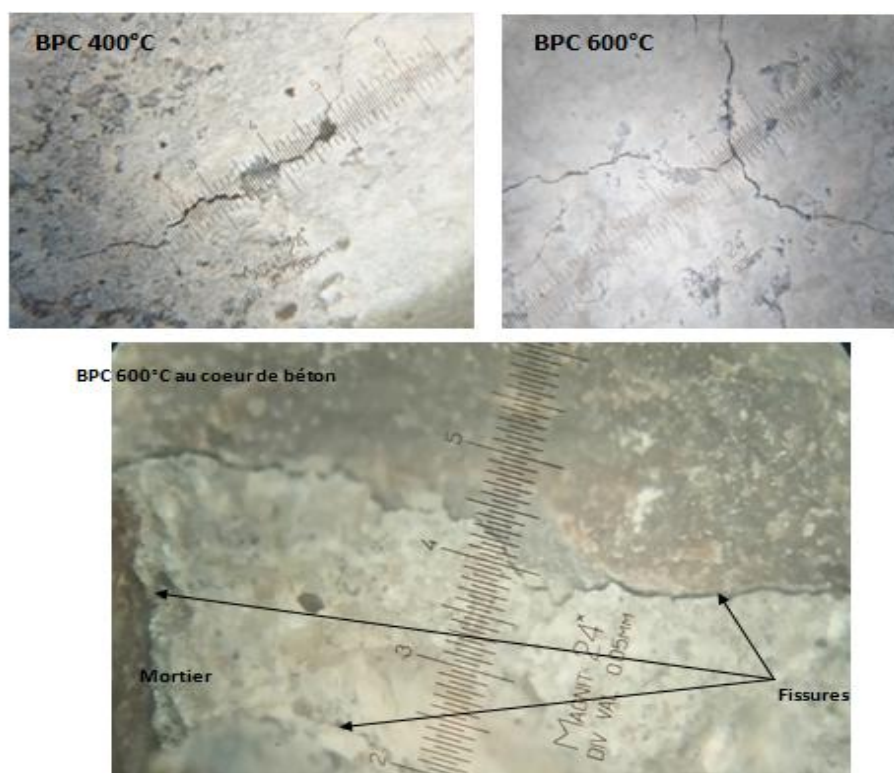


Figure IV.17 Observation microscope optique de béton de fibres mélange polypropylène et carbone chauffé à 400°C et 600°C.

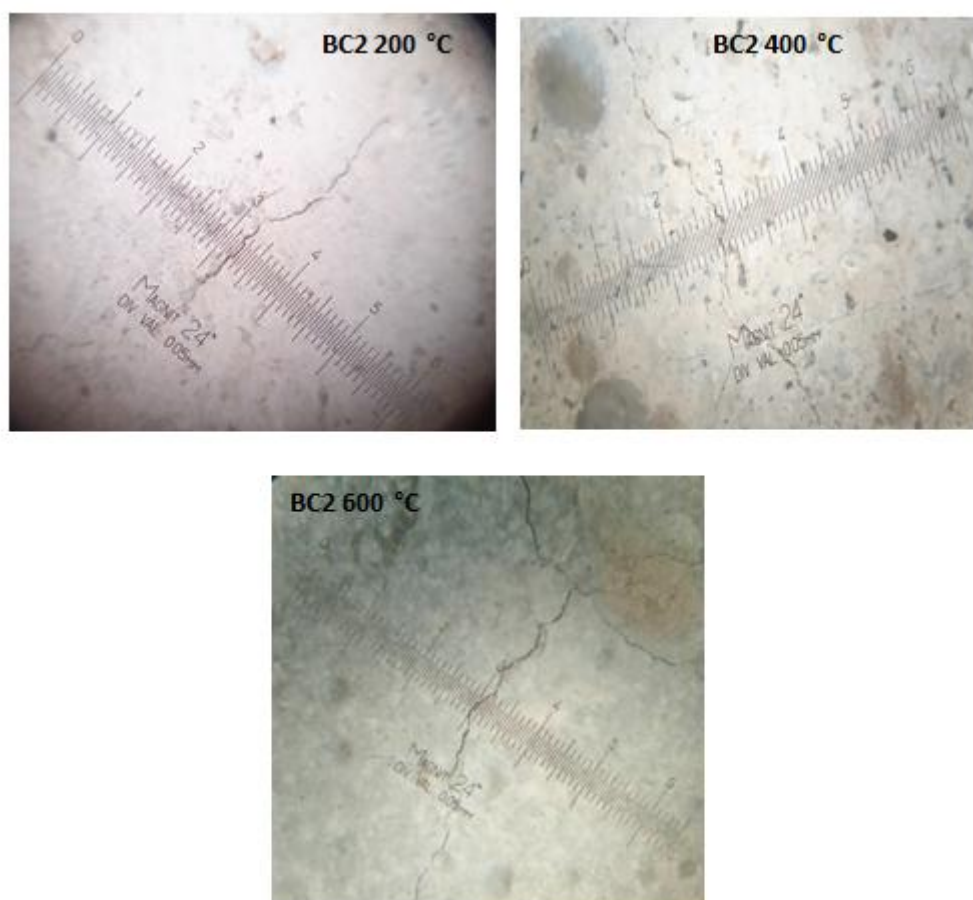


Figure IV.18 Observation microscope optique de béton de fibres carbone chauffé à 400°C et 600°C



Figure IV.19 Observation microscope optique de béton de fibres métalliques chauffé à 200°, 400°C et 600°C.

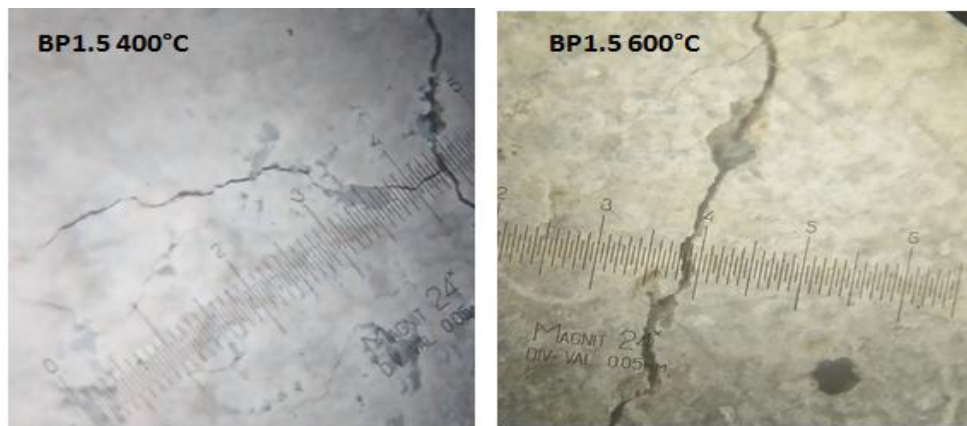


Figure IV. 20 Observation microscope optique de béton de fibres polypropylène chauffé à 400°C et 600°C.

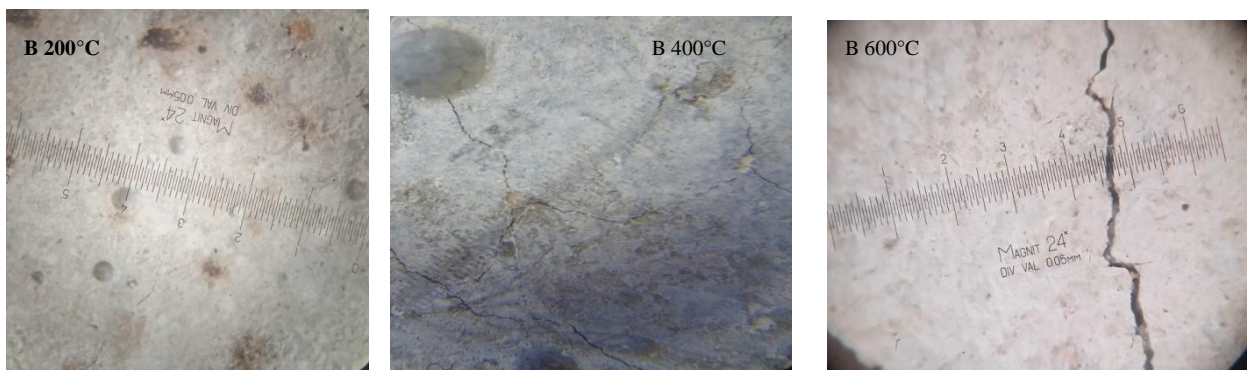


Figure IV. 21 Observation microscope optique de béton sans fibres chauffé à 200°C ,400°C et 600°C.

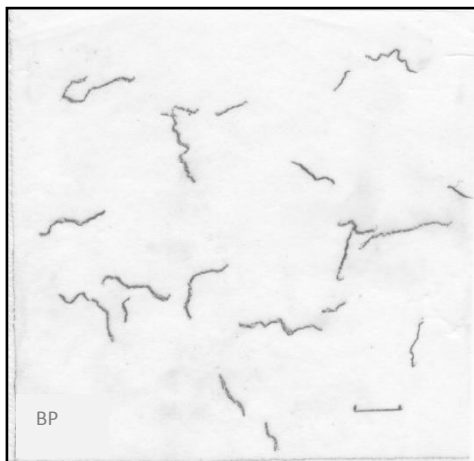
D'après les figures précédentes concernant les observations de dégradation visuelle ou par microscope optique on peut constater que les fissures sont importantes avec l'élévation de la température.

D'après les figures photographiques au cœur du béton après écrasement ou coupure par scie le développement de deux types de fissuration sur les bétons testés des fissures au niveau de l'interface de la pâte du ciment-granulats nommé fissure radiale, et des fissures à travers le mortier, ces observations sont faites par d'autres auteurs [Razafinjato, 2015] et [Hachemi, 2015]. une faible fissuration des bétons contenant des fibres métalliques ou carbone est observée puisque celle-ci est conçue à relier les fissures et limite leurs ouverture. Par contre, les bétons contenant des fibres polypropylène sont plus sensibles à se fissurer puisque ces dernières se vaporisent et laissent des vides.

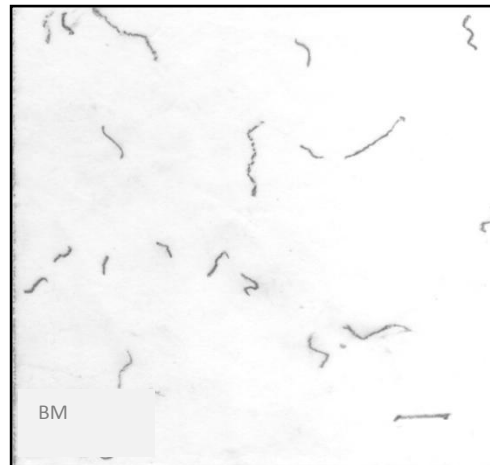
#### IV.6.3 Traitement d'image pour déterminer la densité des fissures et des longueurs

L'étude de la fissuration est menée en trois étapes : premièrement, l'étude de l'ouverture des fissures comme décrites auparavant ou faite par microscope optique qui nous permet de limiter l'ouverture de fissures entre une limite minimale et maximale. La deuxième étape est exportée les images vers Autocad, un logiciel de dessin vectoriel qui détermine approximativement la longueur totale et moyenne des fissures ou les fissures sont retracées visuellement. Les figures de fissures exportées sur logiciel Image J logiciel de traitement d'image qui nous donne la densité de fissuration par rapport à la surface observée. (Le logiciel Image J calcule aussi les longueurs des fibres ; les résultats des deux logiciels sont très proches les uns des autres).

L'ensemble des résultats sont faits sur des éprouvettes de 10x10X10 cm et 7x7x7 cm



**Béton BP1.5**



**Béton BM15**

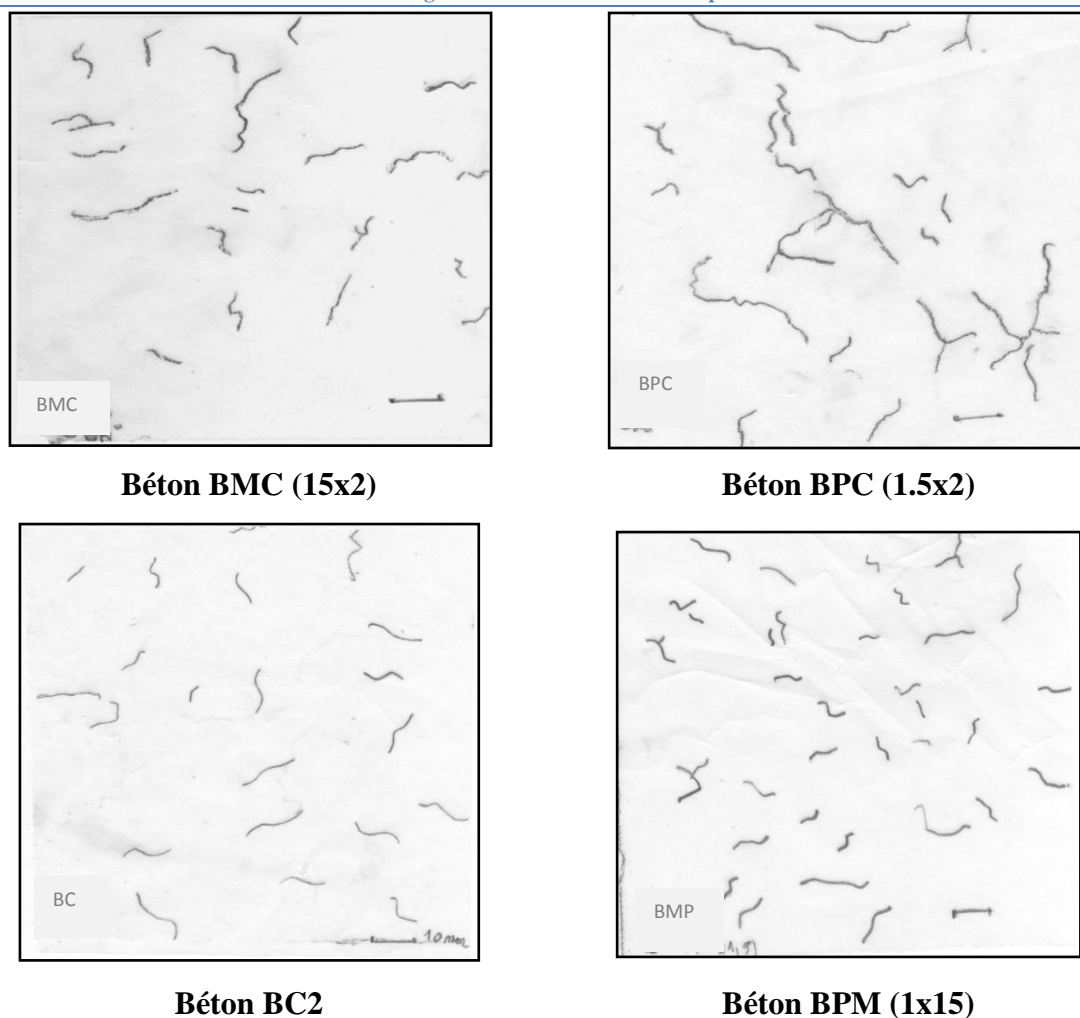


Figure IV.22 fissurations après chauffage de 600°C

Tous les résultats sont présentés sur le tableau IV.1

Tableau IV.1. Largeurs des macro-fissures après chauffage à 400 et 600°C.

Compositions	Largeur des fissures (mm)		Largeur des fissures (mm)		Densité des fissures (%)	longueur moyenne des fissures (mm)
	400°C		600°C		600°C	600°C
	Min	Max	Min	Max		
<b>B</b>	< 0.05	0.07	< 0.05	0,10	/	/
<b>BM39</b>	< 0.05	0.05	< 0.05	0.08	/	/
<b>BM15</b>	< 0.05	0.05	< 0.05	0.08	0.75	7.12
<b>BP1.5</b>	< 0.04	0.08	< 0.05	0.10	1.94	9.13
<b>BC2</b>	< 0.04	0.05	< 0.05	0.05	0.99	9.52
<b>BPM (1x15)</b>	< 0.05	0.05	< 0.05	0.05	2,30	9,64
<b>BMC (15x2)</b>	< 0.04	0.05	< 0.05	0.05	1,17	9.17
<b>BPC (1.5 x 2)</b>	< 0.05	0.05	< 0.05	0.08	1,92	9,06

Après un échauffement à la température de 400°C des fissures ouvertes apparaissent à la surface des éprouvettes, l'ouverture des fissures varie de 0,04 mm à 0,1 mm selon le type de béton. Ces résultats sont confirmés par plusieurs chercheurs [Joongwon, 2009], [Toumi, 2010] [Hachemi,



2015], qui confirme que les fissures commencent à apparaître après la température d'échauffement en dépassant les 400°C.

Après un échauffement à la température de 600°C, la densité et l'ouverture des fissures deviennent plus importantes et visibles à l'œil nu.

Les résultats du tableau IV.1 montrent que les longueurs moyennes calculées ne montrent que la longueur des fissures qui sont très proches l'une de l'autre mais la densité des fissures qui diffèrent et montrent la différence entre les bétons formulés.

La figure IV.23 présente les valeurs statistiques de l'aire totale des fissures pour chaque formulation du béton de fibres.

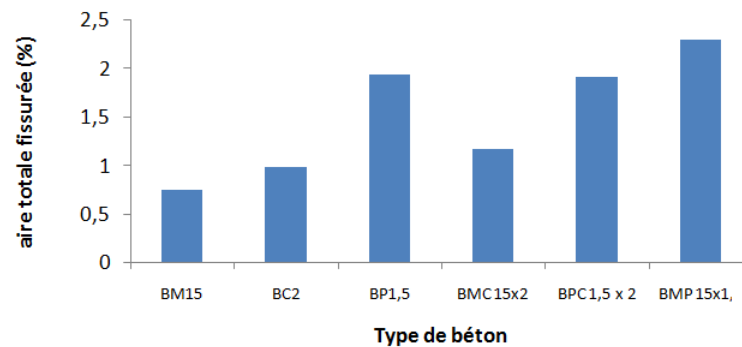


Figure IV.23 Les valeurs statistiques de l'aire totale des fissures pour des bétons de fibres à 600°C.

Ces résultats sont ajoutés afin de confirmer l'observation faite à l'œil nu selon laquelle l'ajout de fibres métalliques et de carbone au béton induit moins de fissurations, et présente des fissures plus courtes que les bétons avec des mélange de fibres.

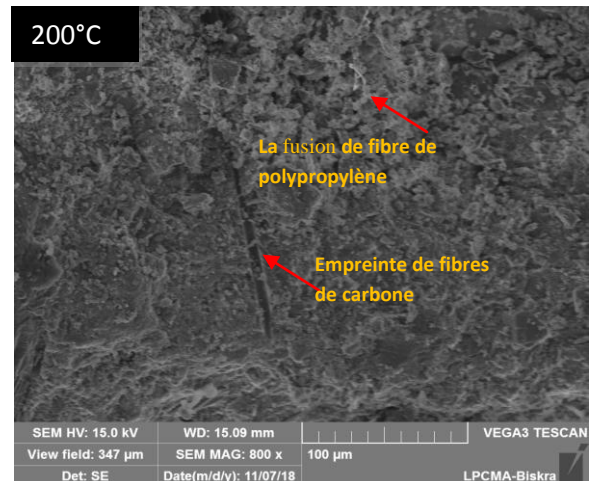
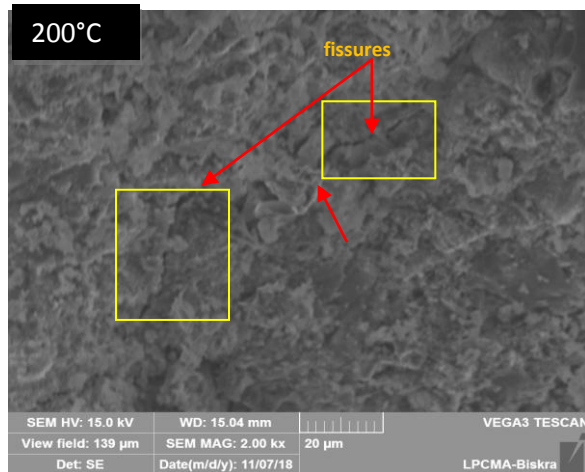
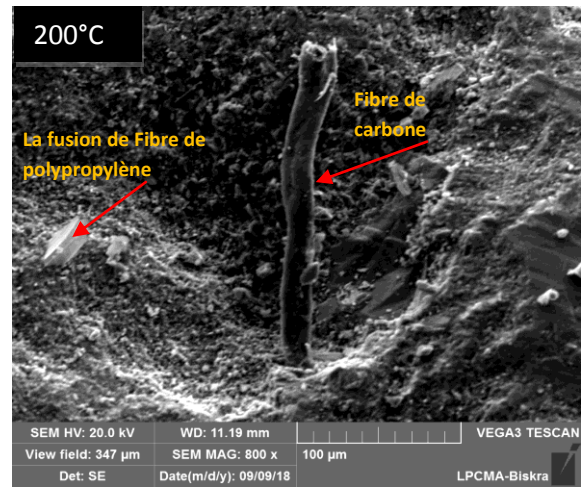
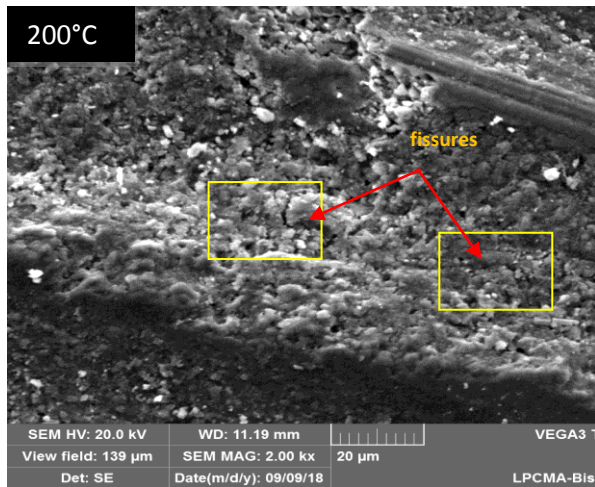
La faible fissuration des bétons avec l'ajout des fibres métalliques ou des fibres de carbone est dû à la présence de ces fibres, qui reprennent les efforts de traction et limitent l'ouverture de fissures [Yermak, 2015]. Alors que les fibres polypropylène disparaissent et laissent des vides qui favorisent l'apparition des fissures [Hager, 2004] (figure IV.24). Notre observation rejoint celle de [Hachemi, 2015] qui a conclu qu'avec l'augmentation de la température, les pores de différentes dimensions facilitent le développement et le passage des microfissures. On remarque l'effet des fibres polypropylène à 600°C puisque la densité des fissures augmente là où se trouve ce type de fibre quel que soit le type de fibres combinées avec lui mais toutefois les bétons contenant les fibres polypropylènes n'éclatent pas tandis que les bétons sans fibres on n'a remarqué que le détachement de morceaux de béton mais sans éclatement. Pour mieux comprendre l'aspect de la fissuration des bétons c'est l'essai en compression qui différencie la caractérisation de la fissuration par rupture des bétons aux différentes températures de chauffage (figures IV.15)

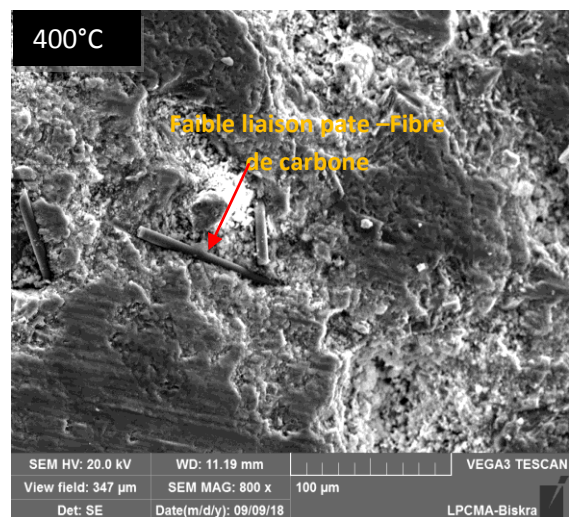
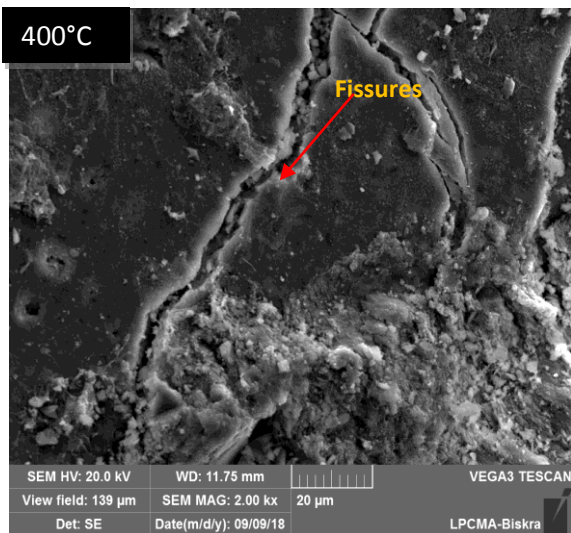
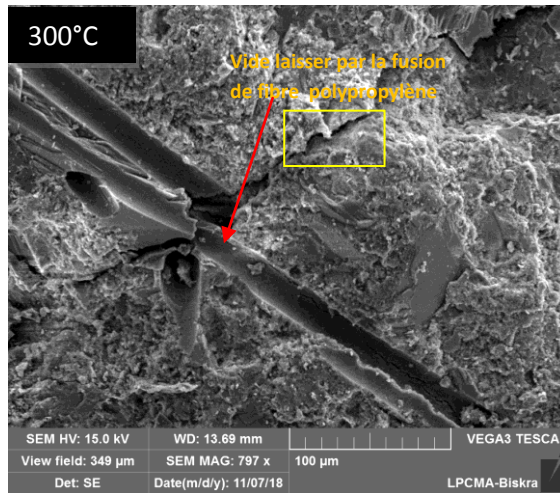
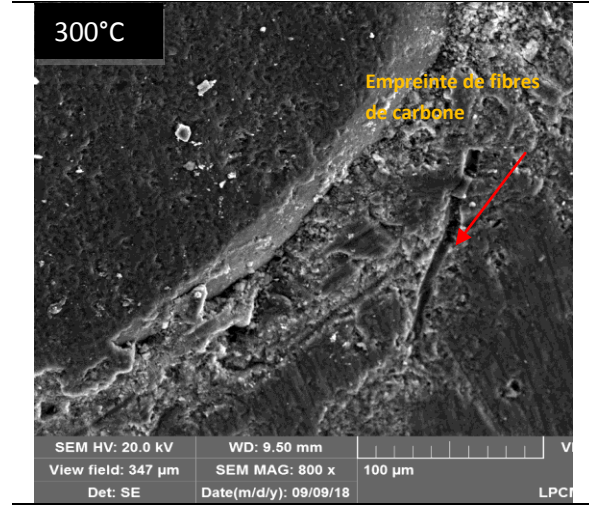
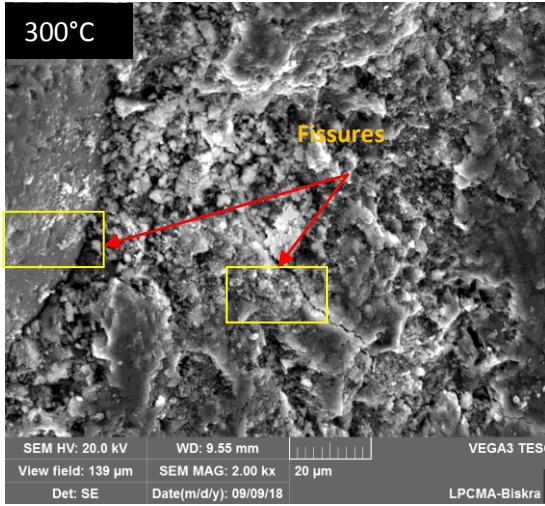


Figure IV.24 Développement des fissures à la surface autour des pores des éprouvettes en béton après traitement thermique à 600°C.

#### IV.6.4 Observations au Microscope Électronique à Balayage

Des observations au Microscope Électronique à Balayage MEB de fissures dans les bétons BPC(1.5x2) chauffés à différentes températures qui représentent le béton qui contient deux types de fibres (polypropylène et carbone) ont été réalisées sur surface polie et métallisés, avec un grossissement de 800 et 2000 présentées sur la figure IV.25 après exposition à 200°C, 300°C, 400°C et 600°C.





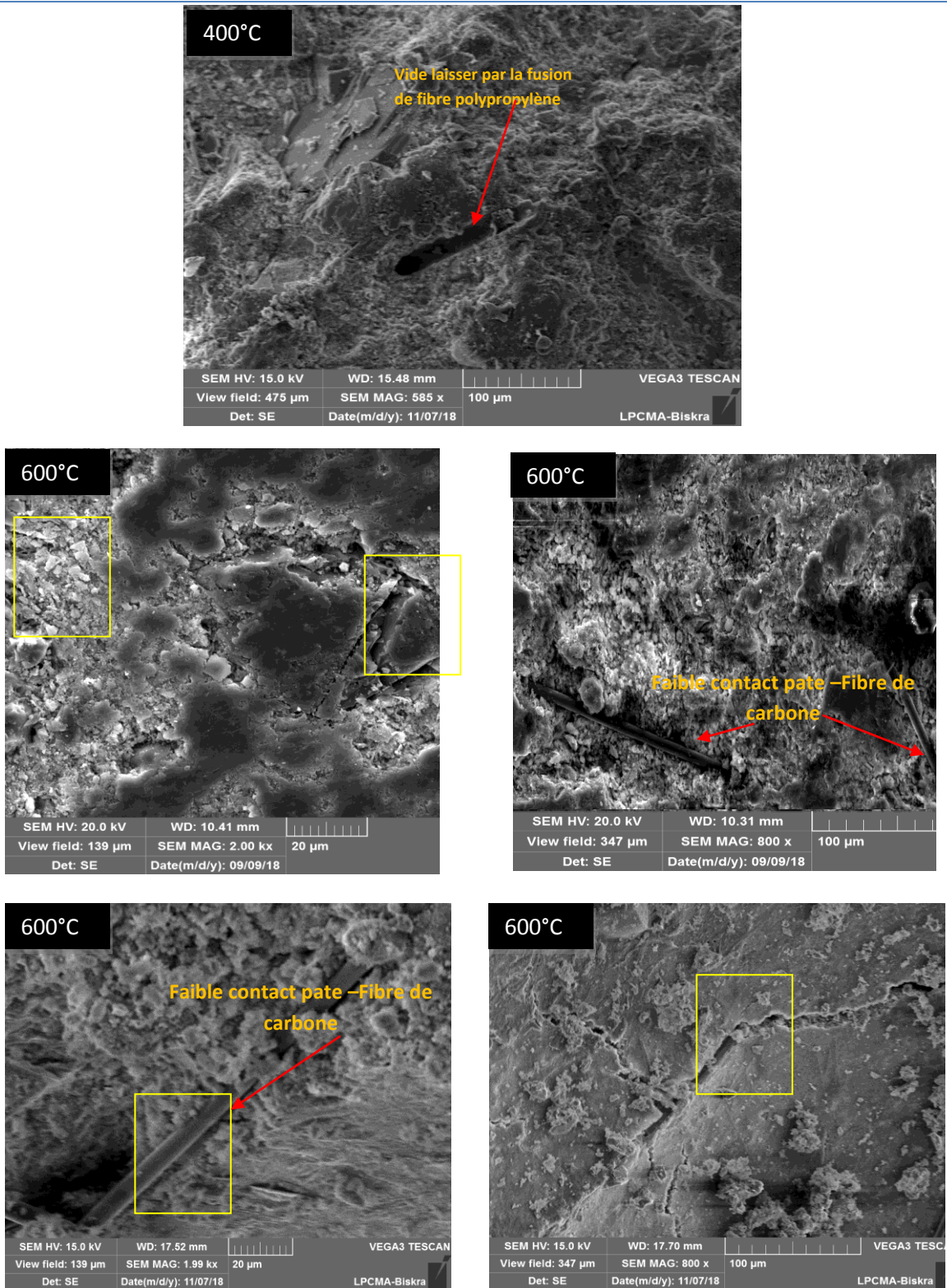


Figure IV.25 Observations au MEB d'échantillons de BPC chauffés à 200C, 300°C, 400°C, et 600°C.

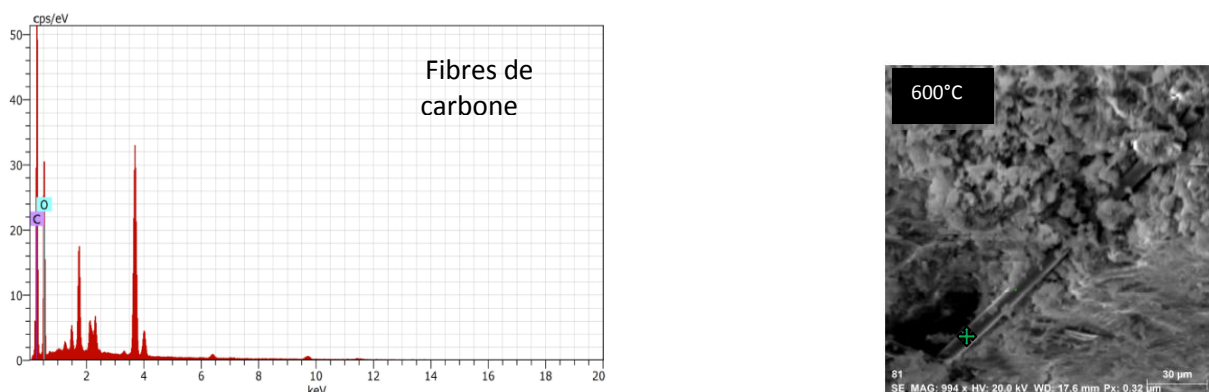


Figure IV.26 Observations au MEB et EDX d'échantillons de BPC chauffés à 600°C.

Les observations ont été réalisées sur la surface ou au cœur (à l'intérieure) des échantillons du béton montrent que les fibres de carbone ont une géométrie cylindrique et elles apparaissent jusqu'à la température 600°C. Avec l'augmentation de la température le contact pâte- fibre s'affaiblie. L'observation microscopique réalisée sur les échantillons chauffés confirme les observations visuelles et avec microscope optique où l'ouverture de fissures augmente avec l'augmentation de la température de chauffage. Pour les fibres de polypropylène, elles fondent et laissent des lits de vides et qui forment ainsi un réseau poreux puisque ces fibres se dilatent d'environ 10% en fondant [Hager,2004], ce qui peut générer des contraintes et par suite la formation des microfissures.

#### IV.7 Conclusion

La première partie de ce chapitre présente l'effet du mélange des fibres sur le comportement du béton porté à une température élevée ; ce qui nous a permis de comparer ce groupe des bétons aux bétons sans fibres et aux bétons contenant uniquement l'un des trois types de fibres. L'ajout de fibres dans le béton ne modifie pas l'allure des courbes des propriétés physiques et des propriétés mécaniques résiduelles et même les courbes des essais non destructives influencés par l'évolution de la température.

D'une manière globale, nous avons remarqué la baisse des performances mécaniques résiduelles des bétons avec la montée en température. L'ajout des fibres métalliques et des fibres de carbone a induit une amélioration des propriétés mécaniques résiduelles par rapport aux autres bétons avec l'une des fibres ou sans fibres.

La perte de masse des bétons du mélange des fibres augmente aussi avec la montée en température. Cependant, il est à noter que les pertes de masse des bétons de mélange de fibres BMC et BMP sont inférieures à celles des bétons avec et sans fibres de polypropylène mais supérieures à celles des bétons de fibres métalliques. Alors que la perte de masse de béton avec mélange de fibres polypropylène et carbone est moins que les bétons de fibres polypropylène et supérieures aux autres bétons. On peut l'expliquer par le rôle que joue la composition des bétons de fibres métalliques qui est obtenue par substitution volumique d'une partie des granulats.

Les résultats de porosité ont montré que les fibres métalliques ou de carbone ne génèrent pas une grande porosité supplémentaire dans le béton contrairement aux fibres de polypropylène. Donc le béton qui contient des fibres métalliques limite l'apparition de porosité alors que les fibres de polypropylène induisent une porosité supplémentaire. Avec la montée de température, on a constaté que le mélange de fibres BMC est moins poreux

Les essais non destructifs (scléromètre et ultrason) sont des essais fiable pour évaluer la qualité du béton quel que soit les fibres utilisées et peut interpréter le comportement du béton avec l'élévation de températures

L'étude approfondie de la fissuration des bétons formulés a montré que la majeure partie de la fissuration intervient aux interfaces pâte-granulat et les valeurs d'ouverture et une longueur de fissure moins que les autres bétons alors que les densités des bétons sont très proches les uns des autres.

Les observations au MEB ont montré que les fibres de carbone ont une géométrie cylindrique et elles apparaissent jusqu'à la température 600°C. Avec l'augmentation de la température le contact pâte- fibre s'affaiblit. L'observation microscopique a confirmé que la densité et l'ouverture de fissures augmentent avec l'augmentation de la température de chauffage. Pour les fibres de polypropylène, elles fondent et laissent des lits de vides et qui forment ainsi un réseau poreux. Alors que les fibres de carbone apparaissent dans le béton quelque soit la température d'échauffement toute fois il faut mentionner que la liaison pâte fibres s'affaiblit avec l'augmentation de la température.

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES***

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le premier objectif de la présente étude était de présenter une meilleure compréhension de la connaissance du comportement du béton soumis à une température élevée. L'étude a consisté à analyser l'influence de la nature des fibres et la variation de fraction volumique pour différentes formulations de béton, par l'utilisation de fibres de polypropylène, de fibres métalliques et de fibres de carbone, puis l'influence couplée de deux types de fibres.

Le deuxième objectif est de faire une connaissance sur les essais non destructifs et leurs applications sur le béton exposé à haute température et leurs intérêts pour tester la qualité du béton.

Des essais destructifs ont été pratiqués pour déterminer les propriétés mécaniques comme la résistance en compression, la résistance en traction par flexion, et les propriétés physiques comme la perte de masse, et la porosité. Des essais non destructifs pour déterminer la vitesse des impulsions ultrasoniques et l'indice de rebondissement. Ces propriétés ont été déterminées à la température ambiante et quatre cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante à 200°C – 300°C -400°C ou 600°C. La vitesse de chauffage était de 10°C/min.

### **Les points importants à retenir de cette phase de caractérisation sont :**

- ✓ Pour les bétons sans fibres testés dans cette étude de rapport E/C variant de 0.35 et 0.65 et un rapport intermédiaire 0.45, on remarque que, suite au traitement thermique, les résultats des propriétés mécaniques et physiques diminuent avec l'augmentation de la température. La perte de masse est plus importante pour le béton ordinaire que pour le béton à hautes performances. Concernant les résultats de mesures de porosité confirment que les bétons à hautes performances sont plus poreux, et plus endommagés que les bétons ordinaires.
- ✓ L'ajout des fibres métalliques dans le béton entraîne d'une façon générale une amélioration des propriétés mécaniques à la température ambiante et jusqu'au dernier cycle testé 600°C que le béton sans fibres. Ce gain est influencé par la variation de la proportion de fibres. Le gain sur la résistance en traction est meilleur que celui de la résistance en compression. La perte de masse relative est moins importante pour les bétons formulés avec un faible rapport E/C puisqu'ils contiennent moins d'eau. Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres. La porosité des bétons de fibres métalliques augmente avec la montée en température. L'ajout de fibres métalliques ne modifier pas l'allure de courbe de la porosité en fonction de la température. La porosité des bétons de fibres métalliques varie peu par rapport aux bétons sans fibres jusqu'à un chauffage à 300°C. Puis, une



augmentation de la porosité jusqu'à 600°C. Les mesures de porosité montrent une faible porosité des bétons de fibres métalliques par rapport au béton sans fibres puisque les fibres retardent et empêchent l'ouverture et la propagation des fissures.

On s'est basé sur un béton de haute performance BHP caractérisé par un faible rapport  $E/C=0.35$ , qui présente un plus grand risque d'éclatement. Une comparaison du comportement du béton à haute température entre un béton sans fibres B, des bétons avec fibres de polypropylène «BP», des bétons avec fibres métalliques «BM», des bétons avec des fibres de carbone «BC», sans oublier de les comparer avec les bétons contenant à la fois : \*des fibres de polypropylène et des fibres métalliques, \* des fibres de carbone et des fibres métalliques, \*des fibres carbone et des fibres polypropylène.

**Les points importants à retenir de cette phase de caractérisation et comparaison sont :**

- ✓ On remarque que toutes les courbes de résistance à la compression sont composées de deux domaines: dans le premier domaine, s'étalant de la température ambiante à la température 300°C on constate une diminution et parfois une amélioration des résistances à la compression. Au-delà de ce seuil, toutes les compositions de bétons voient leurs résistances diminuer et la présence des fibres ou le type n'influe pas l'allure de la courbe de résistance en compression.
- ✓ La résistance en compression du béton semble plus liée à la teneur en fibres.
- ✓ L'ajout de fibres métalliques a induit une amélioration des propriétés mécaniques résiduelles par rapport au béton sans fibres à la température ambiante et jusqu'au dernier cycle testé 600°C.
- ✓ La résistance résiduelle en compression augmente avec l'ajout de fibres de polypropylène ainsi que les fibres métalliques. Avec les fibres de polypropylène, pour des dosages de 0.5, 1 et 1.5 kg/m<sup>3</sup>, nous remarquons que le dosage de 1.5 kg/m<sup>3</sup> conduit à de meilleures performances mécaniques résiduelles. Contrairement avec les fibres carbonées la résistance résiduelle en compression diminue avec l'ajout de fibres, pour des dosages de 2, 4 et 8 kg/m<sup>3</sup>, le dosage de 2 kg/m<sup>3</sup> conduit à de meilleures performances mécaniques résiduelles.
- ✓ Les fibres sont ajoutées aux bétons pour augmenter la résistance à la traction et apporter un caractère ductile aux bétons fragiles par nature. Les différents essais de flexion de la température ambiante jusqu'au cycle de chauffage-refroidissement de 600°C montrent une conservation de la ductilité des bétons de fibres métalliques et de carbone.

- ✓ Les résistances mécaniques des bétons de mélange des fibres métalliques et de carbone BMC présentent une amélioration de la résistance initiale ou résiduelle par rapport aux autres formulations sans fibres ou avec d'autres fibres.
- ✓ La variation de perte de masse entre les bétons dépend du type de fibres. La perte de masse augmente avec l'augmentation de température. Nous avons remarqué pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des bétons sans fibres ou des bétons avec des fibres métalliques ou des bétons avec des fibres de carbone.
- ✓ Nous avons vu pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des autres bétons. Les bétons de fibres métalliques ou de fibres carbonées subissent une perte de masse moindre. Pour le mélange de fibres, ils sont limités entre ces deux types de fibres (moins que le béton avec polypropylène et reste toutefois supérieure que le béton avec les fibres métalliques).
- ✓ la porosité des bétons augmente avec la montée en température quel que soit le type de béton. En comparant l'effet des fibres de polypropylène à celui des fibres métalliques ou celui des fibres de carbone, nous constatons que les bétons de fibres de polypropylène sont plus poreux que les bétons de fibres métalliques ou des fibres de carbone et même au béton sans fibres après le chauffage.
- ✓ La porosité ne change pas l'allure une augmentation avec la température quel que soit le type de béton. Le mélange de fibres dépend de leur mélange de fibres exemple pour le béton BMP et BPC la porosité est supplémentaire par rapport au béton BMC puisque cette porosité est liée à la microfissuration générée par la dilatation du polypropylène et aussi aux canaux formés après la fusion des fibres.
- ✓ La valeur de la vitesse des ondes soniques et l'indice de rebondissement diminue de manière continue avec l'élévation de la température pour tous les bétons. On note que ces essais peuvent donner une réponse significative sur le comportement des bétons à haute température quel que soit l'ajout de fibres. Une corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation ultrasonique UPV et l'indice de rebondissement RN peut être établie et fiable par une analyse basée sur le coefficient  $R^2$  comme indicateur de l'estimation de la qualité. Il faut souligner concernant les modèles empiriques qu'il a été confirmé par la recherche bibliographique qu'il n'y a pas une relation " universelle " donnant l'estimation de la résistance du béton par les essais non destructifs.
- ✓ En générale, nous remarquons que les fibres améliorent le comportement au feu des bétons à hautes résistances et mieux encore si elles sont combinées entre elles (fibres de carbone avec des fibres métalliques ou fibres de polypropylène). Mais toutefois l'étude de coût et

d'économie de ces mélanges doit être étudiée puisque les fibres de carbone sont connues par leurs prix chers.

- ✓ Au cours des différents cycles de chauffage-refroidissement, aucun éclatement explosif n'a été observé pour tous les compositions de bétons étudiées.
- ✓ Sur l'évolution de la fissuration, une étude de la fissuration à chaque cycle de chauffage-refroidissement, On a remarqué que les fissures se divisent celles qui apparaissent à l'œil nu à 600°C et des microfissures qui apparaissent à des températures de chauffage inférieures à 400°C qui ne sont visibles qu'à l'aide d'un microscope optique ou le MEB. L'étude a montré que le béton qui contient les fibres de polypropylène seules ou mélangé avec un autre type de fibres est plus fissuré et le type de fibres joue un grand rôle dans la densité et l'ouverture de fissures alors que le béton qui ne contient pas ce type de fibre est moins fissuré mais il ne faut oublier le rôle conçu pour les fibres polypropylène si la prévention contre l'écaillage et l'éclatement de béton exposée à des hautes températures.

### PERSPECTIVES

A travers cette étude, nous avons montré comment les fibres de peuvent améliorer le comportement des éléments en béton soumis à une température élevée.

*Pour compléter ce travail nous recommandons de:*

- Test avec un chauffage rapide (ISO, HCM).
- Comportement des nouveaux bétons avec d'autres types de fibres (fibres naturelle ou artificielle).
- Une étude complémentaire sur le comportement de ces bétons avec des ajouts (cendre volante, laitier,.....etc.) à haute température.
- Elargir la recherche sur les compositions de mélange de fibres.
- Simulation numérique des bétons de mélange de fibres.

## REFERENCES

### A

- [Abdulkadir ,2017] **Abdulkadir Mohamed Raouf**, Destructive and Non Destructive Strength Evaluation of Concrete Exposed to Fire, *Journal of Zankoy Sulaimani, JZS* (2017) 19 – 3-4 (Part-A).
- [ABQ, 2005] **ABQ, 2005**, Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton. Association béton Québec
- [ACI 228.1R, 2003] **ACI 228 1R, 2003**. In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. American concrete Institute, USA.3
- [AFREM, 1997] **AFREM**, Durabilité des bétons – Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons INSA-LMDC, Toulouse, 11-12 décembre 1997.
- [Ahmed et al, 1992] **Ahmed, A.E., Al-Shaikh, A.H. and Arafat, T.I.** (1992) Residual compressive and bond strengths of limestone aggregate concrete subjected to elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 44, 117–125.
- [Akçay et al,2012] **Akçay B, M. Tasdemir**, Mechanical behaviour and fiber dispersion of hybrid steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 28 (1) (2012) 287–293.
- [Alarcon-Ruiz et al,2005] **Alarcon-Ruiz L., Platret, G., Massieu, E., Ehlacher, 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.
- [Anderberg, 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.
- [Annerel, 2012] **Annerel Emmanuel, Greet de schutter and Luc Taerwe**, Diagnostic des structure en béton exposée au feu, colloque 2012, Performance du béton soumis à haute température du matériau à la structure, université de Cergy –Pantoise France.
- [Annerel et al , 2009] **Annerel Emmanuel, Taerwe L**, Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis, *Cement and Concrete Research*, Volume 39, Issue 12, December 2009, Pages 1239-1249.
- [Annerel et al, 2008] **Annerel Emmanuel et L. Taerwe** , Diagnosis of the state of concrete structures after fire, *Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst* (eds) © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8
- [Arioz, 2009] **Arioz Omer**, Retained properties of concrete exposed to high temperatures: Size effect, *FIRE AND MATERIALS, Fire Mater.* 2009; **33**:211–222, DOI: 10.1002/fam.996
- [ASTM C597, 2002] **ASTM C597**, 2002. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Philadelphia: ASTM International.
- [ASTM C805,1997] **ASTM C805**, 1997. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, Philadelphia: ASTM International
- [Atıcı, 2011] **Atıcı U**, 2011, Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network, *Expert Systems with Applications*. 38(8): 9609–9618.
- [Aydin et al, 2008] **Aydin S., Yazici, H., Baradan, B.**, High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials*, Vol.22, 2008, pp. 504-512.

### B

- [Baroghel-Bouny ,1994] **Baroghel-Bouny**, 1994, Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très haute performance. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [Bazant et al, 1982] **Bazant, Z. et Wittmann, F. (1982)**. Creep and shrinkage in concrete structures. John Wiley & Sons, inc.
- [Bazant et al, 1996] **Bazant, Z et Kaplan M**, 1996, Concrete at high temperatures. Material properties and mathematical models. Longman House, Burnt Mill, England.
- [Behnood et al, 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.
- [BHP, 2000] **BHP, 2000**. “Le Comportement Au Feu Des BHP, Synthèse Des Travaux Du Projet National BHP 2000 Sur Les Bétons à Hautes Performances.” Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées 77–124.
- [Beinish , 1999] **Beinish Hervé**, contrôle non destructif des bétons mesure de la dureté de surface, Fiche 37 laboratoire CERIB, France.
- [Benali.R,2010] **Benali Redha** , étude du comportement mécanique et rhéologique de la pâte du ciment, mortier et béton avec différentes fibres, mémoire de magister, soutenu 2010.

- [Berest, 1988] **Berest P, Ph. Weber**, La thermomécanique des roches : manuels et méthodes, BRGM Editions, Orléans (1988)
- [Bessey, 1956] **Bessey, G.E.** (1956) Investigations into Building Fires Part 2: Visible Changes in Concrete and Mortar Exposed to High Temperature. Technical Paper 4. London: BRE, pp. 6–18.
- [Breysse et al, 2005] **Breysse D, Abraham O.** Guide méthodologique de l'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé. Presses ENPC, 2005, Paris, 555 p.
- [Breysse, 2012] **Breysse D**, Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials* 33 (2012) 139-163.
- [Brozovsky et al, 2016] **Brozovsky J and L. Bodnarova**, Contribution to the Issue of Evaluating the Compressive Strength of Concrete Exposed to High Temperatures Using the Schmidt Rebound Hammer, ISSN 1061\_8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 44–52.
- [BS 1881 Part 203, 1986] **BS 1881: Part 203**, 1986. Testing Concrete Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, London: British Standards Institution.
- [BS 6089, 2010] **BS 6089**, 2010. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Complementary guidance to that given in BS EN 13791, British Standard, ISBN 978 0 580 67274 3
- [Bungey, 1996] **Bungey J.H, Millard s;G** , “ Testing of concrete in structure”, Chapman and Hall,1996,
- ## C
- [Cavdar, 2012] **Cavdar Ahmet**, A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites, *Composites: Part B* 43 (2012) 2452-2463.
- [Carino, 2008] **Carino N**, 2008. Nondestructive test methods. In: E. Nawy, ed. *Concrete construction engineering handbook*. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, pp. 21/1-74.
- [Castellote et al, 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
- [Castillo, 1987] **Castillo C. et Durani A.J.**, (1990). "Effect of transient high temperature on high-strength concrete" *ACI Materials Journal*, Jan-Feb, pp 47-53.
- [Chang et al, 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
- [Chen et al, 2004] **Chen, B., and 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.
- [Cheng, 2004] **Cheng F-P., Kodur V.K.R., Wang T-C**, Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 84-94, 2004.
- [Choinska, 2006] **Choinska, M.**, Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [Choumanidis et al,2016] **Choumanidis D, E. Badogiannis , P. Nomikos, A. Sofianos** , The effect of different fibres on the flexural behaviour of concrete exposed to normal and elevated temperatures, *Construction and Building Materials* 129 (2016) 266–277.
- [Chung,1985] **Chung H.W.**, Ultrasonic testing of concrete after exposure to high temperatures, *NDT INTERNATIONAL*. VOL 18. NO 5. OCTOBER 1985
- [Collet, 1977] **Collet Y.**, étude des propriétés du béton soumis à des températures élevés. *Annales des travaux publics belges* (1977)
- [Consolazioet al, 1997] **Consolazio G. R., M. C. Mcvay et J. W. Rish**. "Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature", *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, p. 125-148, 1997
- ## D
- [D'aloia, 2012] **D'aloia Laertia, Fabienne Robert, Patric Rougeau, Bérénice Moreau**, Influence d'agent entraîneur d'air (AEA) sur le comportement au feu du béton : Evaluation d'écaillage, Colloque performance du béton soumis à haute température :Matériau à la structure, université de cergy pontoise, 2012.
- [Dawood et al,2011] **Dawood E.T., M. Ramli**, High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2240–2247,

- [DeCoursey, 2003] **DeCoursey, W. J.**, 2003. Statistics and Probability for Engineering Applications. 1 ed. Saskatoon: Elsevier Science
- [Demirbog et al,2004] **Demirbog R, I Turkmen, Mehmet B. Karakoc**, Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004) 2329–2336
- [Dias et al, 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.
- [Diederichs et al, 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.
- [Diederichs et al, 1992] **Diederichs, U., Jumppanen, U.M.**, High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete, Verlogfürarchitektur undtechn.wissencheften, Ernst &schn, 1992, pp. 191-197.
- [Dilek,2007] **Dilek U.**: Assessment of fire damage to a reinforced concrete structure during construction. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, Vol. 21, pp. 257-263.
- [Ding et al,2012] **Ding Y, C. Azevedo, J. Aguiar, S. Jalali**, Study on residual behaviour and flexural toughness of fiber cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature, Constr. Build. Mater. 26 (1) (2012) 21–31.
- [Dreu, 1998] **Dreux G., Festa J.**, Nouveau guide de béton et de ses constituants, Huitième édition, Eyrolles, 1998
- E**
- [EN 12504-2 , 2003] **EN 12504-2, 2003.** Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement. AFNOR, 9p.
- [EN 12504-4,2005] **EN 12504-4, 2005.** Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son. AFNOR, 17p.
- F**
- [Fares, 2009] **Fares Hanna.** “Propriétés Mécaniques et Physico-chimiques de Bétons Autoplaçants Exposés à une température élevée.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.
- [Feidman,2005] **Feidman R.F.**, 2005. Essais non destructifs du béton. CBD-187-F, 6p.
- [Felicetti , 2004] **Felicetti, R.** (2004) Digital camera colorimetry for the assessment of fire-damaged concrete. In Fire Design of Concrete Structures: What Now? What Next? Proceedings of Workshop, Politecnico di Milano, pp. 211–220.
- [Fiche de qualité, 2013] **Fiche technique:** Caractéristiques physico-mécaniques et composition chimiques, Société des ciments de AinTouta, 2013.
- [Fnine, 2006] **Fnine abedelilah**, 2006, Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonore haute fréquences, Thèse de doctorat. . Université de lille. p 35
- [Fu et al, 2004] **Fu Y.F, Y.L. Wong, C.A. Tang, C.S. Poon**, Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperature – Part I: Thermal cracking around single inclusion, Cement and Concrete Composites, 26, (2004) 99-111.
- G**
- [Gallé et al., 2003] **Gallé C., Pin M., Ranc G., Rodrigues S.**, Effect of the heating rate on residual thermo-hydro-mechanical properties of a high-strength concrete in the context of nuclear waste storage, The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, Paper # H01-1, August 17–22, 2003.
- [Graybeal et al, 2002] **Graybeal b, Phares b, Rolander d, Moore m., Washer g.**, Visual Inspection of Highway Bridges, Journal of Non-destructive Evaluation, vol. 21, Issue 3, pp. 67-83 (September 2002).
- [Gregor et al, 2008] **Gregor T., Franci K., Goran T.**, 2008. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. Ultrasonics, 8p.
- [Grenne,1954] **Greene G W.**, «Test hammer provides new method of evaluating hardened concrete», ACI J.proceeding 51 (3), 249, 1954.
- H**
- [Hachemi, 2015] **Hachemi samya.** Etude du comportement du béton soumis a haute température : influence du type de béton et de la nature des constituants, Thèse doctorat, université Mohamed khider de Biskra, 2015
- [Hager ,2010] **Hager I**; The application of RGB histogram analysis of colour images as a method of

assessing the condition of concrete in structures after fire. In: Proceedings of 6th international conference on structures in fire (SIF2010), June 2–4, 2010, Michigan, USA, pp 841–847

- [Hager ,2014] **Hager I.**, Colour change in heated concrete, *Fire Technology*, 2014, Vol. 50, Iss. 4, P. 945- 958. – doi: 10.1007/s10694-012-0320-7.
- [Hager, 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.
- [Hager, 2015] Hager Izabela, Tomasz Tracz , the relations between the assessed diagnostic parameters and mechanical properties of heated concretes, IFireSS – International Fire Safety Symposium Coimbra, Portugal, 20th-23rd April 2015
- [Hager et al,2013] **I. Hager, H. Carre and K. Krzemien**, “Damage assessment to concrete subjected to high temperature by means of the ultrasonic pulse velocity - UPV method,” *Studies and Researches*, vol. 32, pp. 201-215, 2013.
- [Hannachi 2015] **Hannachi Samia**, Evaluation de la résistance à la compression du béton sur site : application de la méthode combine, Thèse doctorat, université mentouri constantine 1,2015
- [Handoo and al, 2002] **Handoo SK, Agarwal S, Agarwal SK.** Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* 2002; 32:1009–1018.
- [Haniche, 2011] **Haniche R.**, Contribution à l'étude des bétons portés en température :Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [Hermann, 1992] **Hermann, Kurt** , Examen des dégâts dus à l'incendie, *Bulletin du ciment*» no 11, 1992
- [Hertz, 1984] **Hertz, K.**, Heat induced explosion of dense concretes, Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report 166, 1984.
- [Hertz, 2003] **Hertz K.**, limits of spalling of fire – exposed concrete. *Fire Safety Journal*, Vol. 38, 2003, pp. 103-116.

## I

- [IAEA, 2002] **IAEA**, 2002. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Vienna: International Atomic Energy Agency.

## J

- [Joakim et al,2011] **Joakim Albrektsson, Mathias Flansbjer, Jan Erik Lindqvist and Robert Jansson**, Assessment of concrete structures after fire, SP Technical Research Institute of Sweden, *Fire Technology*, SP Report 2011:19
- [Jones 1954,] **Jones R.**, 1954. Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique. *RILEM Int. Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures*. Vol.1
- [Jones et al, 1969] **Jones R., Facaoaru I.**, 1969. Les méthodes non destructives d'essais des bétons: Corrélation entre la vitesse de propagation du son et la résistance du béton à la compression. *Notes d'Information Technique N° 140-27. CEBTP*, pp.148-178.
- [Joongwon,2009] **Joongwon Lee, Kwangho Choi and Kappyo Hong**, Color and Material Property Changes in Concrete Exposed to High Temperatures, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*/May 2009/182.

## K

- [Kalifa et al, 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.
- [Kalifa et al, 2001] **Kalifa P, G. Chene, and C. Galle.** High-temperature behaviour of hpc with polypropylene \_bers from spalling to microstructure. *Cement and concrete research*, Vol. 31:1487-1499, 2001.
- [Kanema, 2007] **Kanéma, M.**, Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.
- [Kaplan,1959] **Kaplan M.F.**, 1959. The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete“, *Mag. Concr. Res.*
- [Kenai et al, 2003] **Kenai, S., Bahar, R.**, 2003. Evaluation and repair of Algiers new airport building. *Cement and Concrete Composites*. 25, 633-641.
- [Khaliq et al, 2011] **Khaliq, W. and V. Kodur.** 2011. “Thermal and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High Performance Self-Consolidating Concrete at Elevated Temperatures.” *Cement and ConcreteResearch* 41(11):1112–22.
- [Khan, 2002] **Khan, A.A**, 2002. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. International AtomicEnergy Agency, Vienna, Austria, 242p.

- [Khouidja,2017] **Khoudj Ali Benyahia**, Contrôle de la Qualité du Béton de Structures par les Essais Non Destructifs, université hassiba ben bouali de chlef, 2017
- [Khoury, 1992] **Khoury G. A.**, Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, pp. 291-309, 1992.
- [Khoury et al, 2003] **Khoury G., Majorana C.**, Thermo-Hydralbehaviour, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- [Kodur et al, 2003] **Kodur V.K.R.; Cheng F.P.; Wang T.C.** "Effect of strength and fiber reinforcement on the fire resistance of high strength concrete columns", ASCE Journal of Structural Engineering, 129(2), pp. 253-259, 2003.
- [Kodur et al, 1998] **Kodur, V. and M. Sultan.** 1998. "Thermal Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures." Pp. 467–80 in CANMET/ACI/JCI Fourth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Tokushima, Japan
- [Kolek, 1969] **Kolek, J.**, «Non-destructive testing of concrete by hardened methods, proc. Symp. On non'destructive testing of concrete and timber, institution of civil engineers, London, June 1969.
- [Kolek,1958 ] **Kolek J.**, «An application on the Schmidt rebound hammer», mag. Concrete MS, London, 10 (28), 27, 1958.
- [Komlos and al, 1996] **Komlos, K., Popovics, S., Nurnbergerova, T., Babal, B., Popovics, J.S.**, 1996. Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards. Cement and Concrete Composites. 18, 357-364.

## L

- [Lafhaj et al, 2009] **Lafhaj Z., Goueygou M.**, « Experimental study on sound and damaged mortar: Variation of ultrasonic parameters with porosity », Construction and Building Materials, vol.23, p. 953 - 958, 2009.
- [Laneyrie, 2015] **Cléo Laneyrie**, Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement à haute température des béton des granulats recyclés,
- [Lau et al, 2006] **Lau, A. and M. Anson.** 2006. "Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete." Cement and Concrete Research 36(9):1698–1707.
- [LCPC, 2005]. **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées**, "Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie", Report ME 62 (in French), 2005.
- [Libre et al, 2011] **Libre N.A, M. Shekarchi, M. Mahoutian, P. Soroushian**, Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice, Constr. Build. Mater. 25 (5) (2011) 2458–2464
- [Likang et al, 2018] **Likang Tiana, Xingyan Shanga, Jiangtao Yu**, Using modified core drilling method to estimate the damage of fire exposed concrete , Procedia Engineering 210 (2017) 3–10, 10.1016/j.proeng.2017.11.041
- [Lizancos ,2016] **Lizancos Mirian Velay, Isabel Martinez-Lage, Miguel Azenha , Pablo Vázquez-Burgo**, Influence of temperature in the evolution of compressive strength and in its correlations with UPV in eco-concretes with recycled materials, Construction and Building Materials 124 (2016) 276–286
- [Logothetis and al, 1981] **Logothetis L and Economou C.** The influence of high temperatures on calibration of non-destructive testing of concrete. Matériaux et Constructions, 1981, Vol. 14, No. 1, pp. 39-43.
- [Luo, 2007] **Luo H.L, Lin DF** (2007) Study the surface color sewage sludge mortar at high temperature. ConstrBuild Mater 21:90–97

## M

- [Malhotra et al, 2004] **Malhotra V.M., Carino N.J.** Handbook on Nondestructive Testing in Concrete, 2nd ed., 2004, CRC Press, Boca Raton, FL, 384 p.
- [Malier, 1992] **Malier Y.**, Les Bétons à hautes performances: caractérisation, durabilité, applications : compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [Menou,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.
- [Mindeguia, 2009] **Mindeguia J.-C.**, Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de Doctorat, l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [Missemer, 2011] **Missemer, L.** 2011. "Etude Du Comportement Sous Très Hautes Températures Des Bétons Fibrés à Ultra Performances : Application Au BCV."
- [Mitsuo et al , 2014] **Mitsuo Ozawa , Hiroaki Morimoto**, Effects of various fibres on high-temperature



spalling in high-performance concrete, *Construction and Building Materials* 71 (2014) 83–92

[Mróz et al, 2017]

**Mróz Katarzyna, Izabela Hager**, Non-Destructive Assessment of Residual Strength of Thermally Damaged Concrete Made with Different Aggregate Types, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **245** (2017) 032034 doi:10.1088/1757-899X/245/3/032034

## N

[Naguyen, 2014]

**Naguyen, 2014**, Évaluation non destructive des structures en béton armé : Étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.

[Naik et al, 2004]

**Naik T.R., Malhotra V.M., Popovics J.S.**, 2004. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Handbook on Non-destructive. Testing of Concrete. CRC Press LLC, 19p

[Neville, 1993]

A.M. Neville, *Properties of concrete*, 3rd ed. UK, Longman House (1993).

[NF. P 18-303]

**AFNOR, P 18-303**. Liants hydrauliques –l'eau de gâchage, Paris, 1990.

[NF P 18-400]

**AFNOR, P 18-400**. Béton –Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, Paris,dec, 1981.

[NF P. 18-406]

**AFNOR, P 18-406**. Béton –Essai de compression, Paris, 1990.

[NF P. 18-407]

**AFNOR, P 18-407**. Béton –Essai de traction par flexion trois points, Paris, 1990.

[NF P 18-418]

**Normalisation française P 18-418**, Béton, Auscultation sonore – mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1989.

[NF. P 18-431]

**AFNOR, P 18-431**. Granulats –Analyse granulométrique par tamisage, Paris, sep, 1990 .

[NF. P 18-433]

**AFNOR ,P 18-433**, Essai pour béton durci – Partie 5: Résistance à la flexion des éprouvettes, Indice de classement: P 18-433, Octobre 2001.

[NF.P 18-451]

**AFNOR, P 18-451**. Béton –Essai d'affaissement, Paris, 1990.

[NF. P 18-555]

**AFNOR,P 18-555**. Granulats - Mesures des Masses Volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des granulats, Paris, dec 1990

[NF. P.18-573]

**AFNOR, P.18-573**. Granulats – Los Angeles, Paris, 1990.

[NF., P 18-598]

**AFNOR, P 18-598**. Granulats –Equivalent de sable, Paris, 1990 ;

[Nonnet et al, 1999]

**Nonnet, E., Lequeux, N. et Boch, P.** (1999). Elastic properties of high alumina cement castables from room temperature to 1600\_C. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 19, pp. 1575–1583.

[Noumowé, 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.

[Noumowé et al, 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.

[Noumowé, 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.

## O

[Ouldnaffa et al, 2002]

**Ould Naffa S., Goueygou M., Piwakowski B., Buyle-Bodin F.**, « Detection of chemical damage in concrete using ultrasound », *Ultrasonics*, vol. 40, p. 247 -251, 2002.

## P

[Panzer et al, 2011]

**Panzer T. H., A. L. Christoforo, F. P. Cota, P. H. R. Borges and C. R. Bowen**, Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials, *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, ISBN 978-953-307-449-8,2011

[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.

[Phan et al, 2001]

**Phan, L.T., Lawson, J.R., Davis, F.L.**, Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and Structures*, Vol. 34, 2001, pp.; 83-91.

[Pilya,2010]

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

[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

[Poon et al, 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.

[Prasopchaichana, 2012]

**Prasopchaichana. K.** Evaluating the Compressive strength of Concrete exposed to elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity and artificial Neural Networks, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring - Poster 17.

[Proceq SA, 2016]

**Proceq SA, 2016.** Operating Instructions - Concrete Test Hammer N/L NR/NL Manual, Schwerzenbach: Proceq.

[Purkiss et al, 2014]

**Purkis John A. s and Long-yuan Li**, Fire Safety Engineering Design of Structures, Third Edition, 2014

## Q

[Qian et al, 2000]

**Qian C.X, P. Stroeven**, Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 63–69, PII: S0008-8846(99)00202-1.

[Quasrawi, 2000]

**Quasrawi, H. Y.**, 2000. "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted". *Cement and Concrete Research*, Volume 30, pp. 739-746, 2000.

## R

[Razafinjato, 2015]

**Razafinjato, Rijiaina Niry**, comportement des bétons à une température élevée – Influence de nature du granulats -, thèse doctorat université de Cergy Pontoise, 2015

[RILEM TC 43-CND, 1983]

**RILEM TC 43-CND, 1983.** Recommendations for testing concrete by hardness methods. *Matériaux et Constructions*, 16(95), pp. 368-376.

[RILEM TC 7- NDT, 1977]

**RILEM TC 7- NDT, 1977.** Recommendations for testing concrete by hardness methods. *Matériaux et Constructions*, 10(59), pp. 313-316.

## S

[Safiuddin et al, 2018]

**Safiuddin Md. , M. Yakhlaf, K.A. Soudki**, Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 164 (2018) 477–488, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.172>

[Sahmaran et al, 2007]

**Sahmaran M, I. Yaman**, Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash, *Constr. Build. Mater.* 21 (1) (2007) 150–156.

[Sakhraoui et al, 2009 ]

**Sakhraoui S., Mouffok L.**, 2009. Application de la méthode ultrasonique pour le calcul prévisionnel des résistances des bétons après traitement thermique. *Technologie du Béton. Séminaire*, Alger, 10p.

[Savva et al, 2005]

**Savva A, Manita P, Sideris KK.** Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites* 2005; 27:239–248.

[Schneider et al, 1982]

**Schneider, U., U. Diederichs, and C. Ehm. 1982.** "Effect of Temperature on Steel and Concrete for PCR V's." *Nuclear Engineering and Design* 67:245–58.

[Schneider, 1988 ]

**Schneider, U.** (1988). "Concrete at high temperatures -- A general review." *Fire Safety Journal* 13(1): 55-68.

[Short, 2001]

**N.R. Short, J.A. Purkiss, S.E. Guise**, Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis, *Constr. Build. Mater.* 15 (2001) 9 –15.

[Suhaendi et al , 2006]

**Suhaendi, S.L., Horiguchi, T.**, Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete after heat exposition, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1672-1678.

[Szallagy, 2013]

**Szilágyi K, 2013.** Rebound surface hardness and related properties of concrete. PhD Thesis. Budapest University, 92p.

[Szilágyi et al, 2009]

**Szilágyi , K. et Borosnyói , A., 2009.** 50 years of experience with the Schmidt rebound hammer. *Concrete Structures*, Volume 10, pp. 46-56.

## T

[Tanyildizi, 2008]

**Tanyildizi Harun.** Effect of temperature, carbon fibers, and silica fume on the mechanical properties of lightweight concretes? *New Carbon Materials*, 2008, 23(4): 339–344.

[Tanyildizi, 2018]

**Tanyildizi Harun**, Prediction of the Strength Properties of Carbon Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Exposed to the High Temperature Using Artificial Neural Network and Support Vector Machine, *Hindawi Advances in Civil Engineering* Volume 2018, Article ID 5140610, 10 pages

- [Tolentino et al ,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.
- [Toumi ,2010] **Toumi B.**"Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton", Thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.
- ## U
- [Ulm et al, 1999] **Ulm, F. J., O. Coussy, and Z. P. Bazant. 1999.** "The Chunnel Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 272–282.
- [Uysal et al, 2012] **Uysal Mucteba, Harun Tanyildizi,** Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network, *Construction and Building Materials* 27 (2012) 404–414, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.028
- ## W
- [Walpole et al ,2012] **Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. & Ye, K., 2012.** *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. 9 ed. Boston: Prentice Hall.
- [Whitehurst, 1966] **Whitehurst E.A.,** Evaluation of concrete properties from sonic Tests, ACI Monograph No. 2, ACT, Detroit (Michigan, USA), 1966.
- ## X
- [Xiao et al, 2006] **Xiao, J., Falkner, H.,** On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, 200, pp. 115-121.
- [Xing et al, 2011] **Xing Z., Beaucour A.-L., Hebert R., Noumowe A., Ledesert B.,** Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 392–402, 2011.
- [Xing, 2011] **Xing Z.,** Influence de la nature minéralogique du granulats sur leurs comportement et celui de béton à une température élevée , Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.
- ## Y
- [Yang et al, 2009] **Yang Hsuanchih, Yiching Lin, Chiamen Hsiao , Jian-You Liu.** Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity, *Fire Safety Journal* 44 (2009) 121– 130, doi:10.1016/j.firesaf.2008.05.003
- [Yazici et al, 2006] **Yazici S., Inan G., Tabak V.** Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025, 2006.
- [Yermak, 2015] **Yermak Nonna.** Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2015

## *RESUME*

La connaissance du comportement du béton soumis à des hautes températures constitue un enjeu de grand intérêt pour les applications en génie civil en cas d'incendies car le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température.

Le premier objectif de ce travail est une contribution à l'amélioration du comportement mécanique des bétons traités thermiquement avec différents types de fibres (métalliques, polypropylène, carbone et la combinaison entre plusieurs types de fibres). Le deuxième but est d'utiliser les essais non destructifs pour évaluer la résistance en compression par des relations empiriques.

Afin d'étudier l'influence de l'introduction des fibres sur le comportement des bétons soumis à des températures élevées, des essais sont effectués afin de caractériser les différentes propriétés physiques et mécaniques des bétons à haute température. De plus, des essais non destructifs ont été réalisés grâce à un ultrason UPV (ultrasonique pulse velocity) et le scléromètre RN (rebound-hammer).

En termes de comportement, les résultats trouvés confirment qu'à haute température l'introduction des fibres mène à l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons. En termes de mesure non destructive, les essais non destructifs qui ont été proposés sont des méthodes d'inspection prometteuse pour le béton endommagé par le feu.

**Mots clés :** *béton, température, fibres de polypropylène, fibres métalliques, fibres de carbone, propriétés mécaniques, essai non destructif, ultrason, scléromètre, régressions.*

## **ABSTRACT**

Knowing of the behaviour of concrete exposed to high temperatures is an issue of great interest for civil engineering applications in the event of fires because the concrete may have thermal instability beyond a certain temperature.

The first objective of this research is to contribute in the improvement of the mechanical behaviour of concretes treated thermally with different types of fibers (steel, polypropylene, carbon and with mixture fibers). The second objective is to use non-destructive testing to estimate the compressive strength the properties of concrete by empirical relationships.

For the sake of studying the influence of the introductory of fibers on the behaviour of concretes in hardening state of the tests used to characterize the various physical and mechanical properties of concretes at high temperatures. Non-destructive tests were performed with using ultrasonic (UPV) and the rebound-hammer.

In terms of mechanical behaviour, the results found confirm that at high temperature the introductory of fibers lead to mechanical properties of concretes improvement. In terms of non-destructive measurement, the tests have been proposed as a promising initial inspection method for fire-damaged concrete.

**Key words:** *concrete, temperature, polypropylene fiber, metal fibers, carbon fibers, mechanical properties, nondestructive, ultrasound, rebound hammer, regressions.*