

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
جامعة حسيبة بن بوعلي- الشلف  
*Université Hassiba Benbouali –Chlef*  
كلية الهندسة المدنية والمعمارية  
*Faculté de Génie Civil et d'Architecture*  
قسم الهندسة المدنية  
*Département de Génie-civil*



## **Mémoire de Master**

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Matériaux en Génie Civil**

**Thème**

***Effet des hautes températures sur le béton à hautes performances à base de fibres de polypropylène***

**Présenté par :**

**GRIBI Mohammed Elhabib**

**KELLA M'hammed**

**Dirigé par :**

**Pr. HAMRAT M**

**Promotion : 2023/2024**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné le courage et la possibilité d'accomplir ce travail.*

*Avant d'introduire ce document, nous aimerions exprimer notre profonde gratitude à tous ceux et celles qui ont accordé un intérêt important envers notre modeste personne.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadrant*

***Pr. Mustapha HAMRAT**, pour avoir dirigé ce travail et de nous avoir donné l'occasion de réaliser ce mémoire dans de bonnes conditions.*

*Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude au président et aux membres de jury de bien vouloir accepter d'évaluer ce travail.*

*Nous manifestons nos honnêtes remerciements à **DR. NADOUR Younes**, pour son aide*

*Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'UHB Chlef, enseignants et personnels administratifs avec qui nous avons eu le plaisir de faire ce mémoire.*

*À tous les étudiants du département de génie civil et surtout notre promotion en spécialité de matériaux 2023 – 2024*

**Merci à tous**

## *Dédicace 1*

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah de m'avoir donné la force et le courage de mener À bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à :*

*Ma tendre mère **Sabiha** et mon très cher père **Abdelkader***

*Mes précieuse sœurs : **Khawla, Meriem, Khadidja et israa***

*Mes frères : **Ahmed, Abdelkarime, M'hamed, Azzedine et Mohamed***

*Mon binôme **KELLA M'hammed***

*Mes meilleurs amis*

*Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.*

*Tous ceux qui m'aiment et que j'aime*

**GRIBI Mohammd elhbib**

## Dédicace 2

Ce modeste travail est dédié spécialement

*A la mémoire de mon PaPa*

*Ce travail est dédié à mon père , décédé trop tôt , qui ma toujours soutenu et motivé dans mes études , que dieu le tout puissant l'accueille en son vaste paradis*

*A ma chère Maman*

*Ma raison de vivre , en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience , son amour et ses sacrifices .*

*A ma 2 éme maman chérie*

*A celle qui représente pour moi l'exemple du courage et de volonté , je vous dois ma chère **maman** ce que je suis aujourd'hui grâce a votre amour , patience et à vos innombrables sacrifices , aucune dédicace ne serait exprimée assez profondément à ce que je ressens envers vous, que dieu vos garde pour moi.*

*A mes chers frères et soeur*

*Belkacem , Ahmed & Nour El Iman je vous remercie pour votre soutiens moral .  
Je sais bien que ma réussite est très importante pour vous, que dieu vous garde mes chérs bien aimés*

*A mes grands-parents*

*A qui je souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé .*

*A mes chère tantes & ancles*

*Mes **tantes** et **ancles** paternrl s et maternel s , je vous souhaite que du bonheur , de joie et de prospérité .*

*A mon binôme*

*Mohamed El habib , pour sa sympathie , merci mon frère .*

*A mes professeurs*

*A ceux qui m'ont enseignes le savoir saire et qui m'ont donné de l'aide un jour , merci à vos .*

*A mes amis et collègues*

*A toute la promo GC spécialement filière Matériaux 2024 .*

*M'hammed KELLA*

## Résumé

À température ambiante (20°C), les bétons à hautes performances (BHP) présentent des caractéristiques mécaniques très satisfaisantes par rapport aux bétons ordinaires. Cependant, lorsque ces BHP sont soumis à des hautes températures (Incendies) reste une question posée.

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier et mieux comprendre l'effet de fibres de polypropylène et d'ajout de deux types d'additions minérales (Fumée de silice (FS)/Laitier de haut fourneau(L)) sur le comportement des BHP soumis à une température élevée. Dans ce contexte, deux séries de BHP ont été formulés : BHP à base de Fumée de silice sans et avec de fibres de polypropylène et BHP à base de laitier sans et avec de fibres de polypropylène. Ces deux types de BHP ont été soumis à des cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante (20°C) à température de 150°C, 400°C et 700°C.

À travers cette étude, le comportement à hautes températures des BHP fibrés fabriqués avec fumée de silice s'est avéré légèrement meilleur que celui des BHP fibrés avec laitier en termes de perte de masse, résistance résiduelle en compression et de résistance résiduelle à la traction par flexion. À 700°C, la perte de masse est de l'ordre de 10% pour le BHP fibré à base de fumée de silice (**BHPFS-2.2**) et de 11% pour le BHP fibrés avec laitier (**BHPL-2.2**). À la même température, les **BHPFS-2.2** et **BHPL-2.2** ont des pertes de résistances à la compression de 72 % et 75 % de leur résistance initiale, respectivement.

Enfin, l'ajout des fibres de polypropylène dans les BHP améliore sa stabilité thermique. En effet, aucun éclatement et aucun écaillage n'ont été enregistrés, et quelques fissures ont été observées sur la surface des éprouvettes.

**Mots clés** : Béton à hautes performances, Fibre de polypropylène, Haute température, Propriétés physico-mécaniques

## ملخص

عند درجة حرارة الغرفة (20 درجة مئوية)، تتمتع الخرسانة عالية الأداء بخصائص ميكانيكية مرضية للغاية مقارنة بالخرسانة العادية. ومع ذلك، عندما تتعرض الخرسانة عالية الأداء لدرجات حرارة عالية (حرائق)، يبقى السؤال مطروحاً.

يهدف هذا العمل البحثي إلى دراسة وفهم أفضل لتأثير ألياف البولي بروبيلين وإضافة نوعين من الإضافات المعدنية (دخان السيليكا /خبث الفرن العالي) على سلوك الخرسانة عالية الأداء عند تعرضها لدرجة حرارة مرتفعة. في هذا السياق، تم صياغة سلسلتين من الخرسانة عالية الأداء: الخرسانة عالية الأداء القائمة على دخان السيليكا بدون ومع ألياف البولي بروبيلين والخرسانة عالية الأداء القائمة على الخبث بدون ومع ألياف البولي بروبيلين. تعرض هذين النوعين من الخرسانة عالية الأداء لدورات من التسخين والتبريد من درجة حرارة الغرفة (20 درجة مئوية) إلى درجات حرارة 150 درجة مئوية، 400 درجة مئوية و700 درجة مئوية.

من خلال هذه الدراسة، تبين أن سلوك الخرسانة عالية الأداء المدعمة بألياف المصنعة من دخان السيليكا عند درجات الحرارة العالية أفضل قليلاً من سلوك الخرسانة عالية الأداء المدعمة بالخبث من حيث فقدان الكتلة، المقاومة المتبقية للضغط والمقاومة المتبقية للشد عن طريق الانحناء. عند 700 درجة مئوية، يكون فقدان الكتلة في حدود 10٪ للخرسانة عالية الأداء المدعمة بدخان السيليكا (BHPFS-2.2) و11٪ للخرسانة عالية الأداء المدعمة بالخبث (BHPL-2.2) عند نفس درجة الحرارة، كانت نسبة ضياع المقاومة للضغط 72٪ و75٪ لكل من BHPFS-2.2 و BHPL-2.2 من مقاومتها الأصلية، على التوالي.

أخيراً، تحسن إضافة ألياف البولي بروبيلين في الخرسانة عالية الأداء استقراره الحراري. في الواقع، لم يتم تسجيل أي تقننت، وتم ملاحظة بعض التشققات على سطح العينات.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة عالية الأداء، ألياف البولي بروبيلين، درجة حرارة عالية، خصائص فيزيائية ميكانيكية

## Abstract

At room temperature (20°C), high-performance concretes (HPC) have very satisfactory mechanical properties compared to ordinary concretes. However, when these HPC are subjected to high temperatures (Fire) remains a question asked.

The objective of this research work is to study and better understand the effect of polypropylene fibers and the addition of two types of mineral additions (silica fume (SF)/blast furnace slag (S)) on the behavior of HPC subjected to high temperature. In this context, two series of HPC were formulated: HPC based on silica fume without and with polypropylene fibers and HPC based on slag without and with polypropylene fibers. These two types of HPC were subjected to heating-cooling cycles from room temperature (20°C) to temperatures of 150°C, 400°C and 700°C.

Through this study, the behavior at high temperatures of fibered HPCs manufactured with silica fume was found to be slightly better than that of fibered HPC with slag in terms of mass loss, residual compressive strength and residual tensile strength by bending. At 700°C, the mass loss is of the order of 10% for HPC fiberized with silica fume (HPCSF-2.2) and 11% for HPC fiberized with slag (HPCS-2.2). At the same temperature, HPCSF-2.2 and HPCS-2.2 have compressive strength losses of 72% and 75% of their initial strength, respectively.

Finally, the addition of polypropylene fibers in HPC improves its thermal stability. Indeed, no bursting and no scaling were recorded, and a few cracks were observed on the surface of the specimens.

**Keywords:** High performance concrete, Polypropylene fiber, High temperature, Physico-mechanical properties.

## Table de matière

REMERCIEMENTS.....	II
Dédicace 1.....	III
Dédicace 2 .....	IV
Resumé.....	V
ملخص.....	VI
Abstract .....	VII
Table de matières .....	VIII
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux .....	XII
Liste des symboles.....	XIII
Introduction Générale.....	16
Chapitre 01. Revue bibliographique	
1. Introduction .....	20
2.1.Ciment .....	20
2.2. Granulats .....	21
2.3. Sable.....	21
2.3. Eau de gâchage .....	22
2.4. Super plastifiant .....	22
2.5. Ajouts minéraux .....	23
2.5.1. Fumé de silice.....	24
2.5.2. Laitiers de haut fourneau .....	26
3. Formulation des bétons à hautes performances .....	26
4. Propriétés du béton à hautes performances .....	27
4.1. Propriétés à l'état frais.....	27
4.2. Propriétés à l'état durci.....	28
4.2.1. Résistance à la compression .....	28
4.2.2. Résistance à la traction par fendage .....	29
4.2.3. Résistance à la traction par flexion .....	30
4.2.4. Module d'élasticité (Ec).....	31
5. Domaine d'application .....	31
5.1. Plates-formes pétrolières .....	32
5.3. Pont l'île de Ré .....	32
5.4. Arche de la Défense .....	33
5.5. Tours jumelles de Petronas.....	33
6. Effet de la température sur le comportement mécanique des bétons .....	34

6.1. Perte de masse .....	34
6.2. Résistance à la compression .....	35
6.3. Résistance en traction.....	37
6.4. Module d'élasticité.....	38
6.5. Eclatement du béton .....	38
6.6. Influence des fibres de polypropylène .....	39
7. Conclusion.....	41
 Chapitre 02 : Programme Expérimental	
2.1. Introduction .....	44
2.2. Matériaux utilisés .....	44
2.2.1. Ciment .....	44
2.2.2. Fumée de silice.....	29
2.2.3 .Laitier de haut fourneau.....	30
2.2.4. Fibres de polypropylène.....	31
2.2.4. Superplastifiant.....	32
2.2.5. Sable.....	33
2.2.6. Granulat.....	34
2.2.7. Eau de gâchage.....	38
2.3. Formulation des Bétons à Hautes Performances.....	52
2.4. Confection et conservation des éprouvettes .....	53
2.5. Essai sur les bétons frais .....	54
2.6. Essais sur les bétons durcis .....	55
2.6.1. Résistances mécaniques .....	55
2.6.2. Essai de traction par flexion.....	43
2.6.3. Modules d'élasticité.....	43
2.7. Traitement thermique .....	58
2.8. Perte de masse .....	59
 Chapitre 03 : Résultats et interprétation	
3.1. Introduction .....	61
3.2. Propriétés des BHP à l'état frais .....	61
3.2.1. Affaissement des BHP .....	61
3.2.2. Masse volumique.....	48
3.2. Propriétés mécaniques des BHP à l'état durci .....	64
3.2.1. Résistance à la compression.....	49
3.2.2. Résistance à la traction par flexion.....	50
3.2.3. Module d'élasticité.....	51
3.4. Comportement des BHP à haute température .....	66
3.3.1. Comportement des BHP sans fibres de polypropylène.....	66
3.3.1.1. Perte de masse .....	66

3.3.1.2. Résistance résiduelle en compression .....	68
3.3.1.3. Résistance résiduelle à la traction par flexion.....	71
3.3.2. Comportement des BHP avec fibres de polypropylène .....	73
3.3.2.1. Perte de masse .....	73
3.3.2.2. Résistance résiduelle en compression .....	74
3.3.2.3. Résistance résiduelle à la traction par flexion.....	77
3.4. Conclusion.....	80
Conclusion générale .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Perspectives.....	84
Références bibliographiques .....	85

## Liste des figures

### Chapitre 01 : Revue bibliographique

Figure 1. 1. Grains sans adjuvant set grains avec adjuvants [8].	22
Figure 1. 2. Fumée de silice sous Microscope électronique à balayage.	25
Figure 1. 3. C-S-H dense autour d'un granulats dans un béton à la fumée de silice [14].	25
Figure 1. 4. Laitier de hauts fourneaux.	26
Figure 1. 5. Courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) d'essais obtenues [21].	28
Figure 1. 6. Résistance à la flexion à l'air libre [26]	30
Figure 1. 7. plate-forme enhautemerennorvégiens	32
Figure 1. 8. Edifice Scotia Plaza Toronto (reproduit avec la permission de J.Bickley)	32
Figure 1. 9. Pont de l'île de Ré	33
Figure 1. 10. Arche de la Défense (France).	33
Figure 1. 11. <b>Petronas Towers ,Kuala Lumpur la Malaisie</b>	34
Figure 1. 12. Perte de masse des spécimens après exposition à différents températures.[37]	35
Figure 1. 13. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec haute température [38]	35
Figure 1. 14. Résultats des essais de résistance en traction relative obtenus par [47], [41]et[48]comparés à ceux de la DTU et EUROCODE2	37
Figure 1. 15. Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances [50].	38
Figure 1. 16. Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C,M75SC, M100C[50]	38
Figure 1. 17. Risque d'éclatement dans les bétons en fonction de la teneur en eau et de l'effort exercé [59]	39
Figure 1. 18. Fibres de polypropylènes	40
Figure 1. 19 .Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). [62].	40
Figure 1. 20. Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène[62].	41

### Chapitre 02 : Programme Expérimental

Figure 2. 1. Ciment utilisé.	45
Figure 2. 2. Laitier de SIKA.	46
Figure 2.3. Fibres de polypropylène.	47
Figure 2. 4. Superplastifiant utilisé SUPERIOR 9WG	47
Figure 2.5. Sable naturel.	48
Figure 2. 6. Essai de l'équivalent de sable.	49
Figure 2. 7.Granulat naturel	49
Figure 2. 8. Analyse granulométrique	50
Figure 2. 9. Essai de masse volumique (Sable et Granulat).	51
Figure 2. 10: Essai de Los Angeles.	51
Figure 2. 11: Essai de fragmentation dynamique.	52
Figure 2. 12. Fabrication des spécimens d'épreuve.	54
Figure 2. 13. Conservation des éprouvettes dans un bac d'eau.	54
Figure 2. 14. Essai d'affaissement au cône d'Abram.	55
Figure 2. 15. Mesure de la masse volumique du BHP frais.	55
Figure 2. 16. Presse hydraulique.	56

Figure 2. 17. Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.....	57
<b>Figure 2. 18.</b> Mesure du Module d'élasticité. ....	57
<b>Figure 2.19.</b> Four à moufle .....	58
<b>Figure 2. 21.</b> Mesure de la perte de masse .....	59

### Chapitre 03 : Résultats et interprétation

<b>Figure 3. 1.</b> Affaissements des bétons.....	61
<b>Figure 3. 2.</b> Affaissements des BHP testés.....	62
<b>Figure 3. 3.</b> Variation de la masse volumique des différents types de BHP. ....	63
<b>Figure 3. 4.</b> Variation de la résistance à la compression des différents types de BHP. ....	64
<b>Figure 3. 5.</b> Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps des BHP testés.....	65
<b>Figure 3. 6.</b> Variation du module d'élasticité des BHP testés.....	66
<b>Figure 3. 7.</b> Perte de masse des BHP sans fibres en fonction de la température de chauffage.....	68
<b>Figure 3. 8.</b> Perte de résistance en compression des BHP en fonction de la température de chauffage. ....	69
<b>Figure 3. 9.</b> Résistance résiduelle en compression ( $R_C/R_{C20^\circ C}$ ) des BHP en fonction différentes températures. ....	70
<b>Figure 3. 10.</b> Vue visuelle des éprouvettes sans fibre polypropylène soumis à différentes températures. ....	70
<b>Figure 3. 11.</b> Perte de la résistance en traction par flexion des BHP sans fibres. ....	72
<b>Figure 3. 12.</b> Résistance résiduelle de la traction par flexion des BHP sans fibres. ....	72
<b>Figure 3. 13.</b> Faciès de BHP à 700°C.....	72
<b>Figure 3. 14.</b> Evolution de la perte de masse des BHP fibrés en fonction de la température.....	74
<b>Figure 3. 15.</b> Faciès observé après cycle de chauffage-refroidissement de 450°C.....	74
<b>Figure 3. 16.</b> Evolution de la perte de résistance en compression des bétons fibrés en fonction de la température.....	76
<b>Figure 3. 17.</b> Variation de la résistance résiduelle en compression des BHP fibrés en fonction de la température.....	76
<b>Figure 3. 18.</b> Faciès de BHP fibré après le cycle de chauffage-refroidissement de 700°C.....	77
<b>Figure 3. 19.</b> Variation de la résistance résiduelle en traction des bétons fibrés en fonction de la température.....	78
<b>Figure 3. 20.</b> Vue visuelle des éprouvettes avec fibre polypropylène soumis à différente température. ....	79
Figure 3. 21. Vue microscopique des éprouvettes BHP soumis à une température de 700°C.....	80

## Liste des tableaux

### Chapitre 01 : Revue bibliographique

Tableau 1. 1. Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment .....	23
Tableau 1. 2. Composition chimique type de certaines fumées de silice.....	25
Tableau 1. 3. Composition chimique de quelques laitiers de hauts fourneaux.....	26
Tableau 1. 4. Classes de résistance des bétons .....	29
Tableau 1. 5. Résistance la compression de BHP en fonction du rapport E/C .....	29
Tableau 1. 6. Résistance à traction par fendage .....	30
Tableau 1. 7. Module d'élasticité mesuré (Ec). .....	31
Tableau 1. 8. Propriétés des bétons à haute temperature .....	36

### Chapitre 02 : Programme Expérimental

Tableau 2. 1: Composition chimique du ciment (%) .....	44
Tableau 2. 2. Propriétés physiques.....	44
Tableau 2.3. Caractéristiques chimiques de la fumée de silice.....	45
Tableau 2.4. Caractéristique physique de la fumée de silice. ....	45
Tableau 2. 5. Caractéristiques chimiques de laitier.....	46
Tableau 2. 6. Caractéristique physique de laitier. ....	46
Tableau 2. 7. Caractéristiques physico-chimiques du SUPERIOR 9 WG.....	48
Tableau 2.8. Equivalant de sable.....	48
Tableau 2. 9. Masse volumique (Sable et Granulat) .....	50
Tableau 2. 10: Essai Los Angeles. ....	51
Tableau 2. 11: Coefficient Fragmentation dynamique du granulat. ....	52
Tableau 2. 12. Composition des BHPFS, BHPFS-F1.1. et BHPFS-F2.2 .....	53
Tableau 2. 13. Composition des BHPL, BHPL-1.1. et BHPL-2.2.....	53

### Chapitre 03 : Résultats et interprétation

Tableau 3. 1. Affaissement de deux séries de BHP. ....	62
Tableau 3. 2. Masse volumique des bétons.....	63
Tableau 3. 3. Résistance à la compression des BHP étudiés .....	64
Tableau 3. 4. Résistance à la traction par flexion des BHP testés .....	5
Tableau 3. 5. Pertes de masse des BHP sans fibres .....	52
Tableau 3. 6. Résistance en compression des BHP sans fibres .....	54
Tableau 3. 7. Résistance à la traction par flexion des BHP sans fibres.....	57
Tableau 3. 8. Pertes de masse des BHP avec fibres de polypropylène.....	59
Tableau 3. 9. Résistance à la traction par flexion des BHP avec fibres.....	78

---

## Liste des symboles

SiO	Oxyde de silicium
C <sub>2</sub> S	Dicalcium Silicate
C <sub>3</sub> S	Tricalcium Silicate
LA	Los Anglos
FD	Fragmentation dynamique
MED	Micro Deval.
C <sub>v</sub>	Coefficient volumétrique
M <sub>vabs</sub>	La masse volumique absolue
SP	Superplastifiant
BHP	Bétons à haute performance
BHPFS	Béton à haute performance à base de fumée de silice sans fibres
BHPL	Béton à haute performance à base de laitier sans fibres
BHPFS-1.1	Béton à haute performance à base de fumée de silice avec fibres de polypropylènes
BHPFS-2.2	Béton à haute performance à base de fumée de silice avec fibres
BHPL-1.1	Béton à haute performance à base de laitier avec fibres
BHPL-2.2	Béton à haute performance à base de laitier avec fibres de polypropylènes
E/C	Rapport eau /ciment
E/L	Rapport eau /liant
f <sub>cj</sub>	Résistance en compression
σ <sub>fj</sub>	Résistance en traction
ATD	Analyse thermos-differentielle
ATG	Analyse thermos-gravimétrique
Ab	Absorption d'eau
M <sub>vap</sub>	La masse volumique apparente

# **Introduction Générale**

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés pour la construction des immeubles, des ouvrages d'art, .... En fait, le béton, est un hétérogène, composé d'une matrice cimentaire (liant + eau) et squelette granulaire (sable +granulat). Ainsi que la zone d'interface pâte/granulat est le point fort d'un tel béton. Certes, cette zone de transition se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire, pour le cas d'un béton à hautes performances (BHP). En plus, la résistance de la pâte de ciment est très proche de la résistance des granulats.

Les BHP sont le type de bétons qui semblent être les plus efficaces par leurs propriétés mécaniques améliorées par rapport aux bétons ordinaires. L'utilisation de BHP permet de réduire la quantité de béton et de ferrailage par rapport aux bétons ordinaires.

L'exposition des bétons à des températures élevées est l'un des facteurs de détérioration les plus importants qui réduisent leurs microstructures et leurs propriétés mécaniques. Des problèmes de diminution significative de la résistance et de masse peuvent être remarqués lorsque les échantillons sont exposés à des températures élevées. Cette perte de résistance et de masse après exposition à des températures élevées est un phénomène très peu connu dans le cas des BHP.

Par ailleurs, l'introduction de fibres de polypropylène minimise la détérioration des bétons à des températures élevées. Cependant, le comportement des bétons chauffés montre l'apparition d'une porosité et d'une perméabilité supplémentaire, en raison de la fusion et la vaporisation des fibres de polypropylène. Ainsi, certains auteurs ont remarqué une amélioration des propriétés mécaniques des bétons fibrés, tandis que d'autres ont constaté l'inverse.

Il existe très peu d'études disponibles sur le sujet du comportement du BHP sous hautes températures. Le but principal de l'étude présentée est de déterminer les propriétés physico-mécaniques d'un BHP sans et avec fibres de polypropylène soumis à une température élevée.

Ce travail est composé de trois chapitres :

Le **premier chapitre** est consacré à une étude bibliographique sur les BHP. Il comporte une description sommaire sur les propriétés mécaniques des BHP. Il décrit également l'effet de haute température et des fibres de polypropylènes sur le comportement des bétons soumis à une température élevée.

Le **deuxième chapitre** présente le protocole expérimental défini dans le cadre de ce travail. Les matériaux, les essais de caractérisation, les compositions de BHP et matériels sont présentés.

Le **troisième chapitre** regroupe les résultats des différents essais sur le comportement des BHP sans et avec fibres de polypropylènes soumis à une température élevée. Les résultats présentés concernent les propriétés physico-mécaniques résiduelles (masse, compression et traction par flexion) à différents cycles de chauffage- refroidissement (150°C, 400°C et 700°C).

Les conclusions générales clôturent ce mémoire en synthétisant les principaux résultats sur la comparaison entre les BHP sans fibres de polypropylènes et les BHP avec fibres de polypropylènes vis-à vis le comportement physico-mécanique sous un traitement thermique à 150°C, 400°C et 700°C.

# **Chapitre 01**

## **Revue bibliographique**

## 1. Introduction

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière offshore. Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques, économiques et esthétiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques.

L'Algérie est l'un des pays en voie de développement, il adapte le programme de développement durable dans tous les domaines surtout dans le domaine de l'industrie de construction, donc il est nécessaire de fabriquer des bétons durables. Les développements récents en technologie des ciments et des ajouts cimentaires (pouzzolane naturelle, laitier, cendres volantes, ...) et des super plastifiants ont mené à la production du béton à haute résistance ( $\geq 50\text{MPa}$ ) [1]. Le critère crucial dans la production du béton de haute résistance est l'utilisation de systèmes de rapport E/C (Eau/Ciment) bas, couplée à une consolidation optimale et la cure du béton[2]. Plusieurs autres de ses caractéristiques s'améliorent : la maniabilité, le module d'élasticité, la résistance à la flexion, la perméabilité et la durabilité[3].

Un béton à hautes performances (BHP) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, avec un rapport E/C équivalent ou inférieur 0,4 [3].

L'utilisation des BHP est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art. Le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux (super plastifiant, fumée de silice, laitier, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite. Il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile des structures. En effet, ce choix a des effets sur les activités d'inspection, d'entretien et de réparation ainsi que sur sa disposition à la fin de sa vie utile. De plus, ces effets touchent également les usagers de la structure, la société, etc., donc le BHP est le béton le plus économique à long terme [3].

## 2. Constituant du béton à hautes performances

Le béton à hautes performances est constitué du ciment, des granulats, l'eau, superplastifiant et d'ajouts minéraux.

### 2.1. Ciment

Pour la fabrication d'un BHP, il est nécessaire d'utiliser des ciments de type CEM I ou CEM II ou encore CEM III. Un ciment (CEM I) de classe 52,5 N est la plupart du temps employé pour la fabrication d'un béton hautes performances. La classe 52,5 R peut être utilisée si une résistance initiale très élevée est souhaitée. Le ciment (CEM II) de classe 42.5 (peut être aussi utilisé dans l'élaboration du BHP mais le ciment de classe 32.5 n'est pas recommandé.

Les dosages préconisés pour les BHP sont compris entre 350 et 600 kg/m<sup>3</sup> suivant la résistance prévue et le coût comparé de l'ultrafine [3]. Un rapport E/C de 0,35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Un volume assez important de grains de ciment reste anhydre dans un BHP et ceci même à long terme. Le ciment en plus de sa fonction liante joue aussi le rôle d'un granulat inerte de petite dimension [4].

## 2.2. Granulats

La résistance mécanique du BHP est d'autant plus grande que la résistance mécanique des granulats est plus importante. La forme du granulat a une influence sur l'augmentation de la résistance BHP. L'utilisation des granulats concassés permet d'obtenir des gains de résistance. Concernant la taille du granulat, le diamètre maximal des grains préféré est compris entre 10 et 20 mm dans la plupart de temps. Il est mentionné dans la bibliographie que pour une bonne ouvrabilité, les granulats devraient présenter des formes aussi sphériques ou cubiques que possible avec une surface lisse [5].

Aïtcin et Mehta [6] ont conduit une expérience sur l'influence de la minéralogie d'un certain nombre de gros granulats sur les propriétés élastique du BHP. Quatre gros granulats différents ont été étudiés : l'un de ses granules a été un gravier naturel, les trois autres étaient des roches concassées de type diabase, calcaire et granite. Les résultats trouvés ont montré que les résistances à la compression pour les bétons à base de granite, gravier, calcaire et diabase étaient respectivement de 85, 92, 97 et 101 MPa [6].

L'expérience montre qu'il est très difficile de produire des BHP de classe III (100 à 125 MPa) en utilisant des gros granulats supérieurs à 25 mm. Dans le cas de la plupart des granulats naturel, il semble qu'une taille maximale de 10 à 12 mm est probablement optimale pour fabriquer des BHP, ce qui ne signifie pas qu'un granulat de 20 mm ne puisse pas être utilisé [6]. Quand la roche mère est suffisamment forte et homogène, des granulats de 20 et 25 mm peuvent être utilisées sans affecter négativement la maniabilité est la résistance du béton [6].

## 2.3. Sable

Le sable ayant un module de finesse supérieur est recommandé, non pas pour améliorer l'ouvrabilité, parce que ça nécessite moins d'eau, mais les particules grossières vont générer un cisaillement important. Il est préférable d'utiliser un sable de module de finesse compris entre 2,7 et 3. L'utilisation de tel sable grossier est recommandée puisque, dans le BHP, il y a suffisamment d'éléments fins à cause de la forte teneur en ciment et en ajouts cimentaires, de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un sable fin pour améliorer la maniabilité du béton et

sa résistance à la ségrégation. En outre, l'utilisation d'un sable plutôt grossier peut amener à une certaine diminution de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour obtenir une maniabilité donnée, ce qui est un avantage de point de vue résistance et économie. L'utilisation d'un sable grossier permet aussi d'obtenir une meilleure ouvrabilité et de meilleures résistances en compression simple [6]. Cependant, un module de finesse inférieure à 2.5 rend le béton collant et donne des résistances moins bonnes [7].

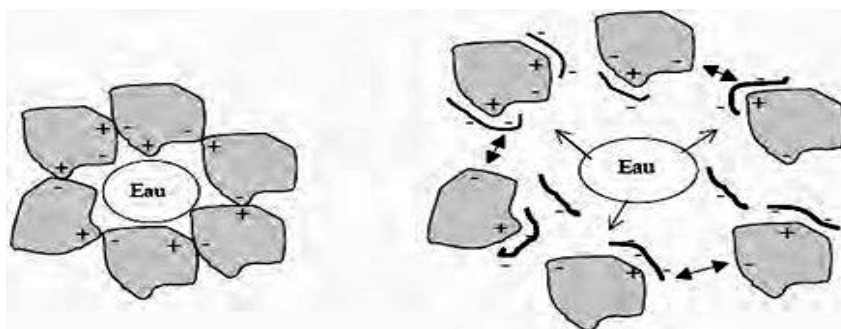
## 2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisable pour la fabrication du béton fait l'objet de la norme NFEN 1008 [4]. Cette norme définit les prescriptions pour l'eau convenant à la production du béton et décrit les méthodes permettant d'apprécier son aptitude à l'emploi. L'eau permet au ciment de faire prise et de donner au béton une consistance (ouvrabilité) adaptée à l'ouvrage à réaliser. Il faut être attentif au dosage, car un excès d'eau nuit à la durabilité du béton et diminue la résistance du béton durci. Pour la fabrication d'un BHP, il est recommandé d'utiliser, un rapport E/C inférieur à 0.4. Pour la fabrication d'un mètre cube de BHP la quantité d'eau utilisé peut aller jusqu'au 250 l/m<sup>3</sup>. L'eau destinée au gâchage du béton doit être propre et ne doit pas contenir d'impuretés qui pourraient nuire à la qualité du béton (matières organiques ou chimiques...) [4].

## 2.5. Super plastifiant

Un Super plastifiant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse du ciment) aux bétons, mortiers ou coulis, lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci.

L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus maniable sans ajouter de l'eau. La surface de chaque grain de ciment contient une décharge électrique libre, les charges opposées s'attirent mutuellement au contact de l'eau. Les grains s'agglomèrent alors en flocculant l'eau de gâchage, ce qui se trouve entre les grains sera toutefois emprisonnée voir (Fig. 1.1).



**Figure 1. 1.** Grains sans adjuvant set grains avec adjuvants [8].

Les superplastifiants empêchent la formation néfaste des agglomérats. Leurs molécules se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. En effet, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité

de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant (sous la forme de longues chaînes) renforce également cet effet. Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent leurs rapprochements réciproques. Grâce aux structures de polymères modernes 'en forme de peigne', il est possible de réduire le rapport eau-ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un super plastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80 MPa [8].

Les superplastifiants jouent un rôle de plus en plus important dans la technologie du béton. En effet, l'action d'un a superplastifiant est fonction de son dosage, du type de ciment, et sa séquence d'introduction dans le malaxeur et des conditions climatiques lors de la mise en œuvre du béton.

Le superplastifiant doit être introduit dans le béton sous forme liquide de façon à obtenir rapidement les bénéfices de son action. Il faut un certain temps pour qu'un superplastifiant en poudre se dissolve dans l'eau avant que tous les solides introduit dans le malaxeur deviennent actif [9].

Tableau 1.1 montre le dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment pour leur utilisation au béton.

**Tableau 1. 1.** Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment [10].

Adjuvant	Dosages %
Plastifiants	0.15 à1.2
Super plastifiants	0.6 à2.5
Accélérateurs de prise	1 à3
Accélérateurs de durcissement	0.8 à2
Retardateurs de prise	0.2 à0.8
Hydrofuges	0.5 à2
Entraîneurs d'air	0.05 à3

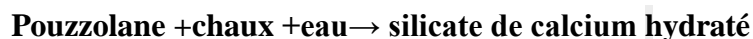
Le dosage total en super plastifiant doit être introduit en deux fractions: une fraction (1/3 de l'ajout) dans l'eau de gâchage afin d'assurer le rôle de séparation des grains de ciment, le super plastifiant jouant alors son rôle de plastifiant réducteur d'eau, la fraction restante (2/3 de l'ajout) après l'ensemble des constituants (à la fin du malaxage, voire même avant la mise en œuvre) pour mettre la fluidification du mélange [7].

## 2.6. Ajouts minéraux

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs poudres ultrafines lorsqu'ils sont

disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement de point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologie et parfois du point de vue résistance.

La plupart des ajouts cimentaires ultrafines ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté de même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment portland. Selon, Dron et Voinovitch [11] la réaction chimique est la suivante :



Les produits cimentaires additionnels utilisés dans les bétons à hautes et très hautes performances sont essentiellement :

- Les cendres volantes,
- Les laitiers des hauts fourneaux,
- Les fumées de silice,
- Les fillers calcaires,
- Les pouzzolanes naturelles.

### 2.5.1. Fumé de silice

La fumée de silice ou micro silice est une pouzzolane artificielle d'une grande finesse, environ 100 fois plus fines que le ciment (grain moyen inférieur à 1 micron). La fumée de silice est un sous-produit résultant de la production de silicium et d'alliages au silicium (ferro silicium) : dans des fours à fusion par arc électrique, partiellement réduit, s'évapore à environ 1900 °C) sous forme de SiO. Les gaz brûlés se refroidissent dans les cheminées, et le SiO, qui s'oxyde en SiO<sub>2</sub>, se condense sous forme de fumées de silice amorphes. La fumée de silice n'est cependant pas qu'une pouzzolane très réactive. En effet la petite taille des particules de fumée de silice permet de combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore donc le remplissage des vides [12].

Elle est généralement utilisée à un niveau de remplacement compris entre 5% et 12% de la masse totale des matériaux à base de ciment [13].

Le matériau ultrafin est constitué de nano sphères de moins d'1 µm de diamètre (0,15 µm en moyenne) (Fig. 1.2), soit environ 100 fois plus petit qu'une particule de ciment pulvérulent sec. La densité apparente est estimée à 0.65±0.10, par contre la densité réelle (hélium) est de 2.24 en moyenne, mais la plupart du temps comprise entre 2,2 et 2,3 [1-4].

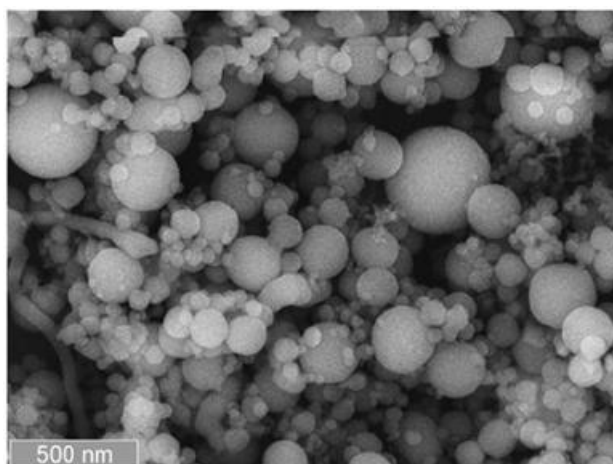
La teneur SiO<sub>2</sub> de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO<sub>2</sub> de la fumée de silice est élevée. Les

fumées de silice produites durant la fabrication du silicium métal contient en général plus de 90 % de  $\text{SiO}_2$  (tableau 1.2). La fumée de silice produit lors de la fabrication d'un alliage Fe-Si à 75 % à une teneur en silice généralement supérieur à 85 % [13].

**Tableau 1. 2.** Composition chimique type de certaines fumées de silice.

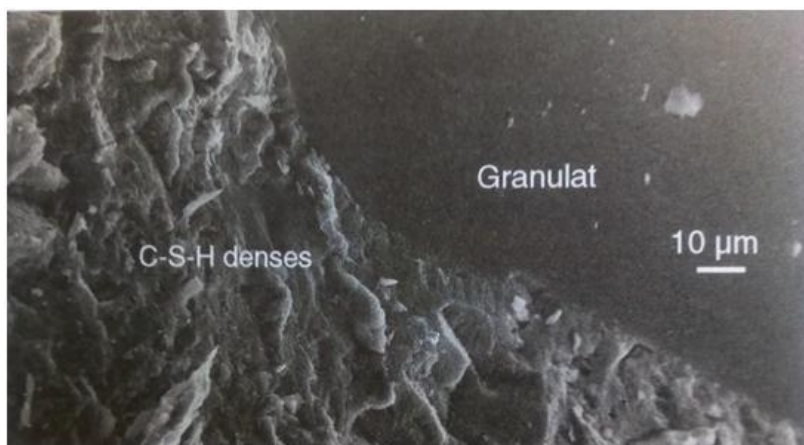
Eléments	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Perte au feu
%	93.7	0.6	0.2	0.3	0.2	0.2	0.5	2.9

La surface spécifique de la fumée de silice varie entre 15000 et 25000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Cependant, la surface spécifique du ciment Portland ordinaire est environ 3100  $\text{cm}^2/\text{g}$  [13].



**Figure 1. 2.** Fumée de silice sous Microscope électronique à balayage.

Avec une microstructure aussi dense (Fig. 1.3), l'utilisation de la fumée de silice entraîne une augmentation de la résistance à la compression, particulièrement entre 7 et 28 jours. En outre la fumée de silice réduit la porosité de la pâte de ciment à l'interface avec les granulats et diminue ainsi de façon considérable la perméabilité du béton (Fig. 1.3) [14].



**Figure 1. 3.** C-S-H dense autour d'un granulat dans un béton à la fumée de silice [14].

### 2.5.2. Laitiers de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Le tableau 1.3 montre la composition chimique de laitier de hauts fourneaux

**Tableau 1. 3.** Composition chimique de quelques laitiers de hauts fourneaux[15].

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Laitier Algerian	35.85	5.08	37.22	7.77	3.55
Laitier français	29à36	13à19	40à43	< 4%	< 6%
Laitier-américain	33à42	10à16	36à45	0.3à20	3à12

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été broyé séparément (Fig.1.4). La masse volumique apparente du laitier peut varier de 900 à 1000 kg / m<sup>3</sup> et sa masse volumique absolue de 2800 à 3000 kg / m<sup>3</sup>[15].



**Figure 1. 4.** Laitier de hauts fourneaux.

En conclusion, ces ajouts minéraux sont utilisés pour fabriquer des bétons qui ont des propriétés physiques et mécaniques améliorées, en particulier une meilleure durabilité lorsqu'ils sont soumis à certains environnements particulièrement agressifs (environnement marin, eaux sulfatées, solutions acides, ...).

Ces ajouts minéraux utilisés dans les bétons peuvent :

- densifier la matrice en jouant un rôle de filler ou en jouât un rôle chimique actif,
- diminuer la perméabilité du béton aux agents atmosphériques agressifs.

### 3. Formulation des bétons à hautes performances

La formulation des BHP consiste souvent à « mélanger » un ciment et un adjuvant superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide (bien que de teneur en eau

faible). Ainsi il sera nécessaire de connaître pour chaque adjuvant la dose de saturation, au-delà de laquelle le produit n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire.

En effet, le choix de ciment est évidemment crucial dans la fabrication d'un BHP, d'un point de vue résistance, et d'un point de vue rhéologique de la pâte de ciment avec un faible rapport E/C. En outre, la façon pratique pour l'étude du comportement rhéologique d'un ciment vis-à-vis d'un superplastifiant se fait par "la méthode des coulis". Elle permet de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, et d'optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour chaque ciment [16, 17].

#### **4. Propriétés du béton à hautes performances**

La diverse caractéristique des BHP découle de leur faible porosité, l'âge de durabilité. Hautes performances signifient aussi faciliter de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompage, etc.) et des performances au jeune âge. Les gains de résistance ne sont pas seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. On va définir les différentes caractéristiques des BHP à l'état frais et à l'état durci [18].

##### **4.1. Propriétés à l'état frais**

La période durant laquelle le béton demeure plastique n'est que temporaire. La résistance du béton pour une composition donnée, est très affectée par le degré de compacité. Il est alors important que la consistance du béton soit ajustée de façon que le béton puisse être facilement transporté, mise en place, vibré et fini sans qu'il ait de ségrégation [18].

Le BHP doit pouvoir être mise en place facilement qu'un béton usuel. De la même façon que celle d'un béton ordinaire, on utilise des essais simples et rapides pour vérifier la propriété du BHP à l'état frais.

Malgré des dosages en eau est inférieurs aux dosages usuels ces bétons présentent le plus souvent un affaissement au cône d'Abrams d'environ 20 cm en sortie de malaxeur. La séparation des particules permise par le superplastifiant supprime en effet le seuil de cisaillement de la pâte de ciment fraîche d'où un béton qui s'écoule sous le seul effet de la pesanteur avec cependant une vitesse dépendant de la viscosité du mélange.

Un béton qui peut être mis en place et serré correctement est considéré comme un béton ayant une bonne maniabilité. Ce facteur primordial peut varier comme pour le béton classique et l'on obtient facilement des affaissements au cône d'Abrams appelés slumps dépassant 20 cm.

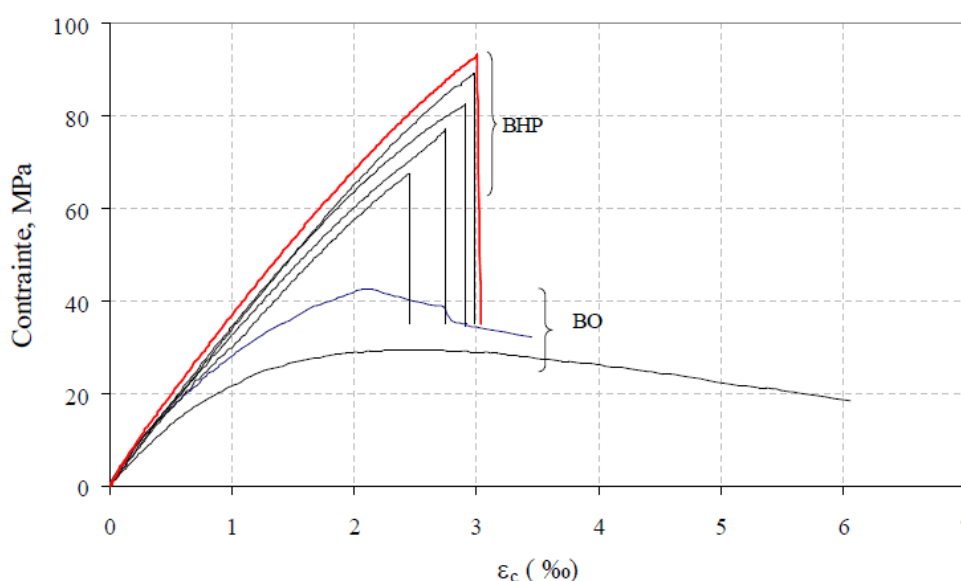
La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton [19]. Les facteurs qui influent sur la maniabilité du béton sont : le mode de transport et la durée du transport, la quantité de liant et les caractéristiques des granulats (granulométrie, forme, type de la surface des grains), et enfin les avantages d'air entraîné, la teneur en eau, la température du béton et celle de l'air ambiant, et les adjuvants. Une distribution uniforme des granulats et la présence d'air entraîné contribuent de façon importante à réduire la ségrégation et à améliorer la maniabilité.

En outre, les super plastifiants utilisés pour dé flocler les particules anhydre de ciment réagissent aussi avec les particules de ciment qui s'hydratent de telle sorte qu'un système de facteurs très complexes influence la rhéologie et l'affaissement BHP [20].

## 4.2. Propriétés à l'état durci.

### 4.2.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression semble continuer à se développer après 28 jours même si c'est à un taux de gain de résistance faible. Le gain de résistance a atteint 15% à 90 jours. Cependant, l'observation attentive des diagrammes « $\sigma$ - $\epsilon$ » d'essais obtenus montre que la courbe est réductible à une droite jusqu'à approximativement 85% de la contrainte maximale [21]. En outre, la déformation ultime ( $\epsilon_{cu}$ ) semble être atteinte à 3 ‰, puisque la branche descendante (post pic) est très abrupte au-delà d'une déformation de cet ordre de grandeur (Fig.1.5).



**Figure 1. 5.** Courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) d'essais obtenues [21].

Une des propriétés exceptionnelles des BHP est leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours, supérieure à 50 MPa. L'optimisation du squelette granulaire permet de diminuer le

volume des vides et par conséquent augmenter la résistance en compression. En outre, le BHP se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice du ciment. La résistance de la matrice sera pratiquement supérieure ou égale à la résistance des granulats [20,21]. Le tableau 1.4 montre les classes de résistance des Bétons (tableau 1.4).

**Tableau 1. 4.** Classes de résistance des bétons [20].

Bétons	Résistance (MPa)
Bétons ordinaire	20-50
Béton à hautes performances	50-100
Béton à très hautes performances	100-150
Béton ultra haute performance (exceptionnel)	$\geq 150$

Evidemment, la résistance à la compression des BHP est plus élevée que celle des bétons ordinaires (tableau 1.4). Cependant, les résultats de laboratoire et de chantier prédisent la résistance maximale à la compression des BHP pour différents rapports E/C (tableau 1.5) [22].

**Tableau 1. 5.** Résistance la compression de BHP en fonction du rapport E/C [22].

E/C	Variation de la résistance à la compression Maximale
0.40-0.34	50 à 75 MPa
0.35-0.30	75 à 100 MPa
0.30-0.25	100 à 125 MPa
0.25-0.20	Plus de 120 MPa

L'addition d'ultrafines telles que des fumées de silice ou de certaines fines influe également sur les vitesses d'hydratation. La finesse de mouture du ciment, définie par sa surface spécifique caractéristique contrôlée lors de la production du ciment, influe sur sa vitesse d'hydratation et sur son évolution à long terme.

Il faut se rappeler que la réaction d'hydratation d'un BHP peut être retardé de façon significative à cause des dosages important en super plastifiant que l'on n'est obligé d'utiliser. Pour obtenir une maniabilité donnée et parfois de l'ajout d'un retardateur mais lorsque l'hydratation du ciment commence elle se développe alors très rapidement. Lorsque des BHP sont bien formulés en termes de quantité de ciment et d'eau de gâchage, des résistances atteint des 9 MPa à 12h, 15 MPa à 18 h, et 20 MPa à 24 heures [23].

#### 4.2.2. Résistance à la traction par fendage

La résistance en traction croît dans des proportions beaucoup plus modestes que la résistance à la compression. En effet, si la résistance à la compression peut être doublée voir triplée, celle de la traction reste très faiblement améliorée. Il a été constaté qu'une diminution du rapport  $f_t/f_c$  lorsque la résistance à la compression de béton ( $f_c$ ) augmente. En effet, un C30/37 aura

par exemple un rapport variant de 1/10 à 1/12 entre la résistance à la compression et à la traction alors qu'un béton C 80/95 aura un rapport de 1/15 [16].

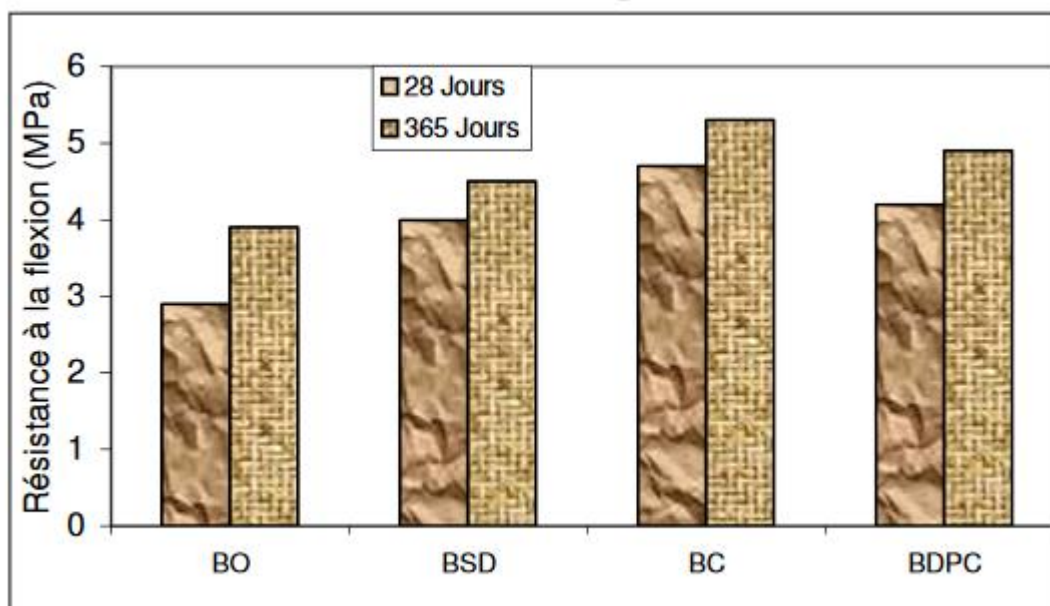
Certaines relations donnent la relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage [24], comme le tableau10:

**Tableau 1. 6.** Résistance à traction par fendage [25].

Eurocode 2	$f_{sp}=0.273 f_c^{2/3}$	
Carrasquillo, Nilson et Salte (1981);	$f_{sp}=0.54 f_c^{1/2}$	Résistance en compression entre 21 et 83 MPa
Raphael (1984)	$f_{sp}=0.313 f_c^{1/2}$	Résistance en compression inférieure à 57 MPa
Le Comité ACI (1984)	$f_{sp}=0.59 f_c^{0.55}$	Résistance en compression entre 21 et 83 MPa
Ahmad et Shah (1985)	$f_{sp}=0.462 f_c^{0.55}$	Résistance en compression inférieure à 84 MPa
Burget Ost (1992)	$f_{sp}=0.61 f_c^{0.5}$	Résistance en compression entre 85 et 130 MPa

### 4.2.3. Résistance à la traction par flexion

La variation de la résistance à la flexion a la même tendance que celle à la compression. La meilleure résistance à la traction a été obtenue avec le béton au calcaire (BC+ 10%), et qui est de l'ordre de 5,3 MPa, soit une amélioration de 27% (BO/0,5), pour le béton SD, l'augmentation enregistrée est de 15% et de l'ordre 19% pour le béton DPC (Fig.1.6).



**Figure 1. 6.** Résistance à la flexion à l'air libre [26]

**BO:** Béton ordinaire **BC:** Béton avec calcaire broyé. **BDFC:** Béton avec déchet de polissage de carrelage broyé. **BSD:** Béton avec sable de dune broyé

#### 4.2.4. Module d'élasticité ( $E_c$ )

Le module d'élasticité du béton augmente lorsque la résistance à la compression augmente. La seule chose certaine est que l'augmentation du module d'élasticité est progressivement lente par rapport à l'augmentation de la résistance en compression. Pour le BHP, il a été constaté que son module  $E_c$  est triple ni même le double de celui du béton ordinaire pendant que sa résistance à l'écrasement passe de 30 à 40 MPa à plus de 100 MPa facilement [7].

Les résultats d'une étude présentés au tableau 1.7 montrent que le module  $E_c$  du béton n'augmente pas dans les mêmes proportions que la résistance à la compression. Une augmentation de l'ordre de 25% a été obtenue dans les travaux préliminaires [7].

Par ailleurs, Holcim [27] a reporté que le module d'élasticité de ces BHP est nettement plus élevé que pour des bétons ordinaires. Il sera de l'ordre de 37 000 à 45 000 N/mm<sup>2</sup> contre environ 32 000 à 33 000 N/mm<sup>2</sup> pour un béton à résistance normale [27].

**Tableau 1. 7.** Module d'élasticité mesuré ( $E_c$ ) [7].

Type de béton		Age (jours)		
		7j	28j	90j
BHP1	$f_c$ (MPa)	39.6	57.9	66.3
(E/C=0.38)	$E_c$ (GPa)	28.7	30.0	31.7
BHP 2	$f_c$ (MPa)	41.8	60.5	68.9
(E/C=0.36)	$E_c$ (GPa)	28.4	31.2	32.5
BHP 3	$f_c$ (MPa)	35.6	54.5	63.1
(E/C=0.34)	$E_c$ (GPa)	26.3	30.0	30.1

### 5. Domaine d'application

Les BHP ont été utilisés avec succès dans plusieurs domaines. Nous allons donner quelques exemples qui vont permettre d'illustrer comment les BHP ont été utilisés avec succès pour construire économiquement des structures prestigieuses et d'autres plus modestes. Ces projets illustrent les différents facteurs technologiques, y compris la résistance à la compression, qui ont influencé le choix du BHP pour des raisons qui, en fin de compte, sont essentiellement d'ordre économique. On peut citer quelque différente utilisation du BHP :

- Ouvrages d'art : Génie Civil (Ponts, tunnels, ouvrages fortement sollicités, poutres, galeries techniques, ouvrages hydrauliques...)
- Bâtiments : Immeubles de grandes hauteurs Parkings-Equipements sportifs (Eléments de structures (poutres, poteaux, murs porteurs...)).
- Voirie-Dallage :
- Plate-forme d'exploitation et des Stockage (offshore, agricole...).

- Voies de circulation très sollicitées (péages, giratoires, taxiways).
- Dallages industriels ,sans chape anti-abrasion [28].

### 5.1. Plates-formes pétrolières

Les BHP ont été utilisés de façon intensive pour construire des plates-formes pétrolières en Norvège à partir des années 1970 (Fig.1.7). Depuis plus de 20 plates- formes pétrolières ont été construites, ce qui a permis de mettre en œuvre plus de 2 millions de m<sup>3</sup> de BHP en grande partie post contrainte.



Figure 1. 7. Plate-forme en haute merrain norvégiens

### 5.2. Edifice Scotia Plaza

L'édifice Scotia Plaza est un gratte-ciel de 68 étages, de 275 m de hauteur construit en 1986 et 1987 dans le centre-ville de Toronto au Canada (Fig. 1.8). Ce gratte-ciel a été construit entièrement avec un BHP ayant une résistance caractéristique de 70 MPa [29].

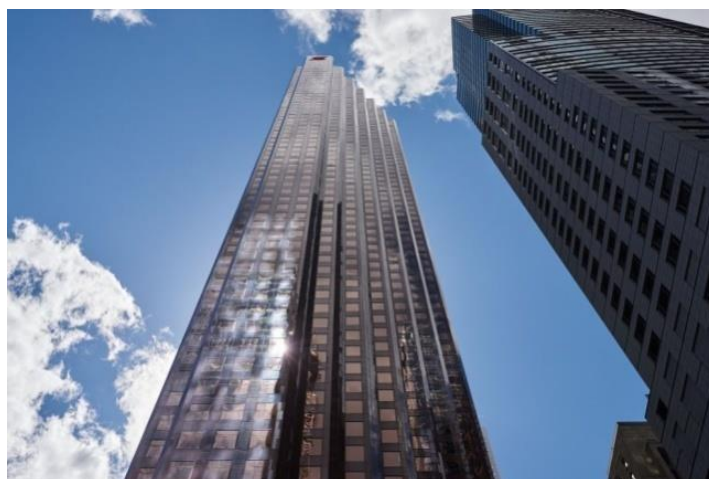


Figure 1. 8. Edifice Scotia Plazaa Toronto (reproduit avec la permission de J.Bickley)

### 5.3. Pont l'île de Ré

La construction d'un pont de 3 Km de longueur a débuté en septembre 1986 pour se terminer moins de 20 mois plus tard (Fig.1.9). Une résistance à la compression moyenne aussi élevé à 28 jours permettre d'atteindre une résistance à la compression de 20 MPa pour 10 ou 12 h

après la mise en place du BHP de façon à permettre de réutiliser les moules le plus rapidement possible [30].



**Figure 1. 9.** Pont de l'île de Ré

#### **5.4. Arche de la Défense**

L'Arche est un cube évidé en son centre dont le vide intérieur permettrait d'abriter Notre-Dame de Paris (Fig.1.10). La longueur est de 112 m, la largeur de 106,9 m et la hauteur de 110,9m [31].



**Figure 1. 10.** Arche de la Défense (France).

#### **5.5. Tours jumelles de Petronas**

Une passerelle de 170 mètres de haut relie ces tours jumelles aux 41<sup>ème</sup> et 42<sup>ème</sup> étages (Fig.1.11). Les tours Petronas, situées à Kuala Lumpur en Malaisie, comprennent chacune 88 étages, 5 étages souterrains et 39 ascenseurs. La passerelle permet de rejoindre l'autre bâtiment sans forcément repartir du rez-de-chaussée. Les deux structures de 452 mètres de haut contiennent des bureaux [32].



**Figure 1. 11.** Petronas Towers, Kuala Lumpur la Malaisie

## **6. Effet de la température sur le comportement mécanique des bétons**

L'exposition du béton à des températures élevées induit des modifications complexes, de la teneur en humidité ainsi que de la composition chimique de la pâte de ciment.

De plus, il existe un décalage dans la dilatation thermique entre la pâte de ciment et le granulat. Par conséquent, des facteurs tels que les changements dans la composition chimique du béton et l'ampleur de l'inadéquation de la dilatation thermique entraînent des contraintes internes et des microfissures dans les constituants du béton (granulats et pâte de ciment) [33]. L'augmentation de la température du béton entraîne une séquence d'événements tels que : déshydratation de la pâte de ciment au-dessus de 100 °C, formation de fissures dans la plage de 400 à 1000 °C, décomposition des produits de ciment hydraté comme l'hydroxyde de calcium  $[Ca(OH)_2]$  à 450 °C, changements minéralogiques des granulats au-dessus de 500 C, désintégration (décomposition) des hydrates de silicate de calcium [CSH] au-dessus de 600 C et formation de poudre vitreuse vers 1200 °C [33, 34].

Bazant [35] a constaté qu'à des températures comprises entre 600°C et 900°C, les changements et physiques se produisent non seulement sur les granulats, mais aussi sur la pâte de ciment durcie. Lorsque la déshydratation de la pâte de ciment durcie a lieu, elle modifie la porosité et l'eau s'évapore des granulats.

### **6.1. Perte de masse**

Dabbaghi et al. [36] ont observé que la masse des bétons ordinaires et légers diminue lorsque la température augmente, mais la perte de masse du béton léger est nettement supérieure à celle du béton ordinaire, comme le montre la figure 1.12. Certes, la différence augmente avec l'augmentation de la température maximale, les bétons LWC1 ( $f_c=25$  MPa) et NSC ( $f_c=38$  MPa) subissant respectivement la perte de masse la plus faible et la plus élevée.

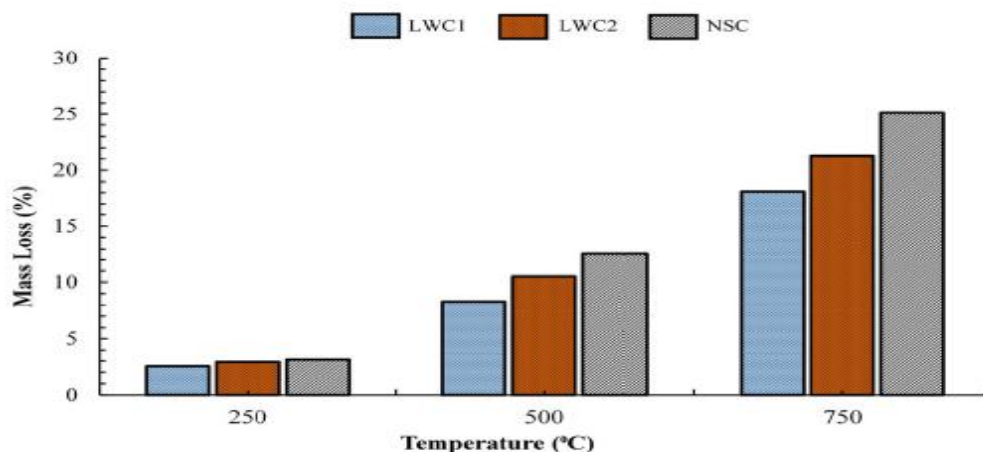


Figure 1. 12. Perte de masse des spécimens après exposition à différents température.[37]

### 6.2. Résistance à la compression

L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température a été le sujet de plusieurs investigations expérimentales. Cette évolution est affectée par de nombreux paramètres : nature du liant et des granulats, rapport granulats/ciment, rapport E/C.

Phan [38] rassemble les résistances en compression résiduelles obtenues au cours de ses essais et une partie des résultats obtenus par d'autres chercheurs. L'allure générale des courbes débute par une chute de résistance au voisinage de 100 à 150°C, suivi d'un accroissement de résistance entre 300 et 350°C, puis d'une chute de résistance continue avec la température au-delà de 350°C.

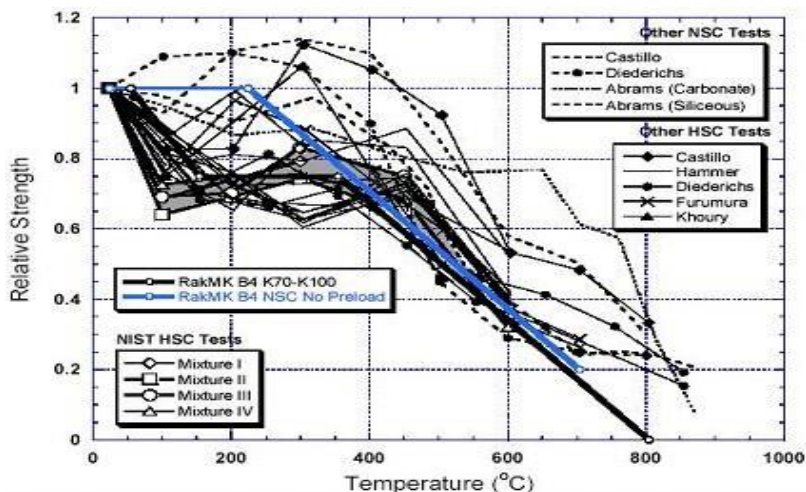


Figure 1. 13. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec haute température [38]

Khoury [39] attribue la baisse de résistance enregistrée entre 100-150°C à un gain de fluidité de l'eau qui à ces températures a pour conséquence de réduire les forces de liaison entre les couches de C-S-H. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH HO-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison faibles.

D'après Dias [40], le gain de résistance vers 300-350°C est dû à une augmentation des forces de liaisons entre hydrates et à un accroissement des énergies de surface .Les BHP présentent un gain plus marqué et décalé vers les hautes températures par rapport aux bétons ordinaires (BO). La raison de la baisse de résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation. Cette réaction de déshydratation étant chimiquement irréversible, la chute de résistance du béton est liée au degré d'hydratation de la matrice cimentaire. La haute température (573°C) fragilise le granulats et peut entraîner également une chute des résistances mécaniques du béton [41].

Par ailleurs, le tableau 1.8 résume quelques études qui ont été menées sur le comportement à haute température des bétons.

**Tableau 1. 8.** Propriétés des bétons à haute temperature

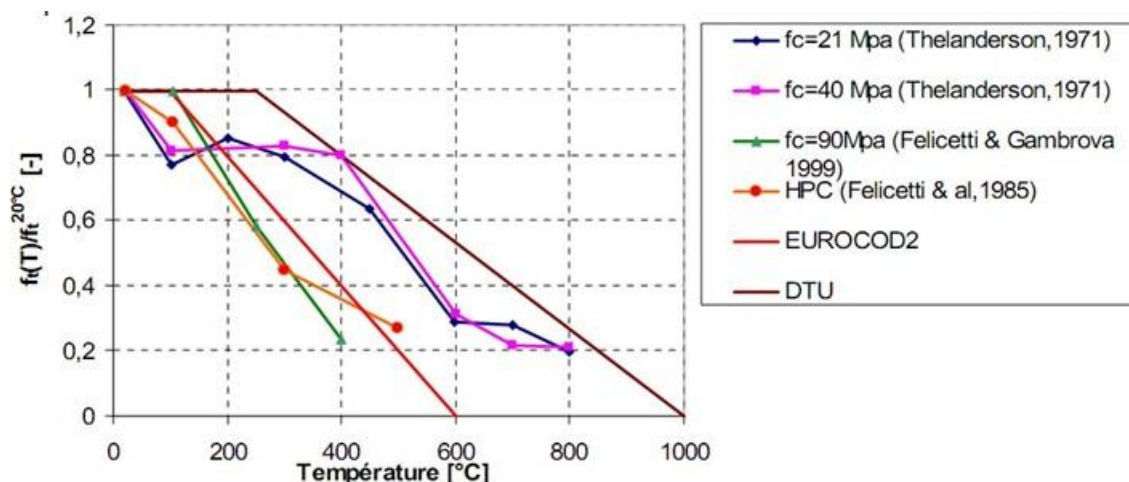
Propriétés	Comportement à Haute Température	Référence
-Chauffage `a 3.5 °C/min -Température palier : 105, 250, 350 et 550°C -Eprouvettes cubiques de résistance initiale de 65.9 Mpa	-Diminution de la résistance résiduelle relative pour atteindre 50% à 550°C. -Observation de fissures dans les zones de transition	Annerel et al. 2007 [42]
-Montée en température de 0.5°C/min jusqu`a 400°C -Essai sur des BAP avec et sans fibres de polypropylène -Résistance de 81.3 MPa pour les BAP ss FPP et 75 MPa pour les BAP av FPP	-BAP ss FPP : Eclatement (pour tous les bétons) -Résistance résiduelle avec FPP :41MPa `a 400°C	Noumowé et al. 2006[43]
-Chauffage à 5°C/min avec une précharge de 20°C -Température palier : 20, 200, 400, 600 et 800°C -Etude de BAP avec et sans FPP Essais sur des cubes de résistance initiale de 70 MPa	-A 800°C, résistance résiduelle relative : 48% obtenue sur BAP avec FPP -Eclatement entre 300 et 450°C sur BAP ss FPP (pour tous les bétons)	Tao et al. 2007 [44]
-Température palier : 20, 200, 400, 600 et 800°C -Résistance initiale : 40 `a 88 Mpa E/L : 0.28 a 0.70 -Etude de l`effet de filler calcaire,	-Baisse continue de la résistance (`a 800°C, 15%) -Ecaillage important	Persson 2004 [45]

filler de verre et des fibres polypropylènes		
--	--	--

### 6.3. Résistance en traction

L'évolution de la résistance en traction en fonction de la température a été étudié par Noumowé[46].

La Figure 8 présente les résultats de la résistance à la traction directe sous haute température obtenus par Thelandersson [47] et Felicetti& al [48]. Ces résultats sont comparés avec les valeurs données par l'EUROCODE 2 et le DTUF eu-Béton.

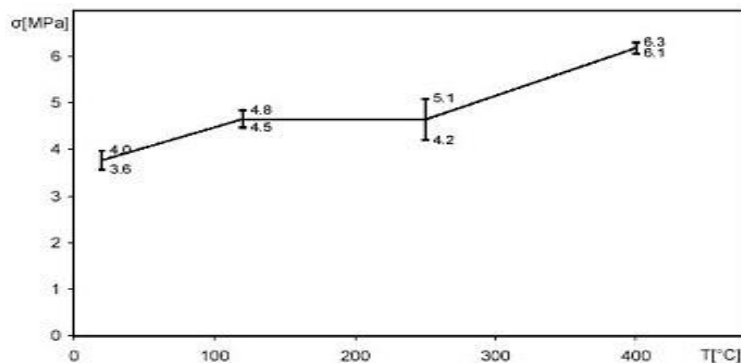


**Figure 1. 14.** Résultats des essais de résistance en traction relative obtenus par Thelandersson [47], comparés à ceux de la DTU [41] et EUROCODE2 [48].

A partir de la figure 1.14, la résistance en traction chute avec l'élévation de la température. En effet, la résistance en traction du béton avec la température est affectée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats, teneur en eau, vitesse de chauffage...).

Par ailleurs, Harada & al.[49], affirment que, par rapport à la résistance en compression, la diminution de la résistance en traction est très marquée.

Gaweska [50] a remarqué que la résistance à la traction obtenue « à chaud » à 120°C, 250°C et 400°C est supérieure à celle déterminée à 20°C (Fig. 1.15). Ces résultats semblent corroborer ceux de Khoury [60], obtenus par des essais de flexion à haute température.



**Figure 1. 15.** Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances [50].

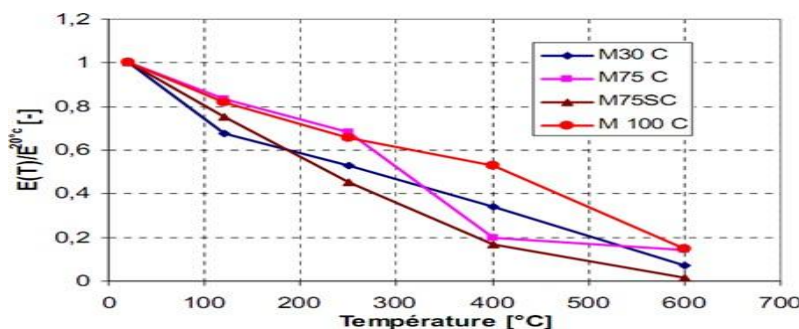
Les essais menés par Chang et al. [51]e montrent la résistance résiduelle à la traction diminue avec la température.

Pour sa part, Min Li [52] note que sur la résistance résiduelle à la traction par fendage est plus sensible aux effets de la fissuration que la résistance résiduelle à la compression.

### 6.4. Module d'élasticité

La perte de l'eau évaporable au-dessous de 100°C du béton a tendance à faire à diminuer le module d'élasticité. La chaleur affecte similairement le module d'élasticité et la résistance du béton au-dessus de 100°C. De nombreuses études expérimentales montrent une diminution graduelle du module élastique en compression avec la température (Noumowé[46], Tolentino[53], Gaweska[50]).

Gaweska [50] a noté une décroissance du module d'élasticité relatif entre 20°C et 600°C sur quatre bétons M100C, M75C, M75SC et un M30C comme montre la figure 1.16. Les valeurs du module d'élasticité à 600°C sont inférieures à 15%. La plus faible valeur est celle du M75SC (moins de 2 %). Gaweska[50] a conclu aussi que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température.



**Figure 1. 16.** Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C[50].

### 6.5. Eclatement du béton

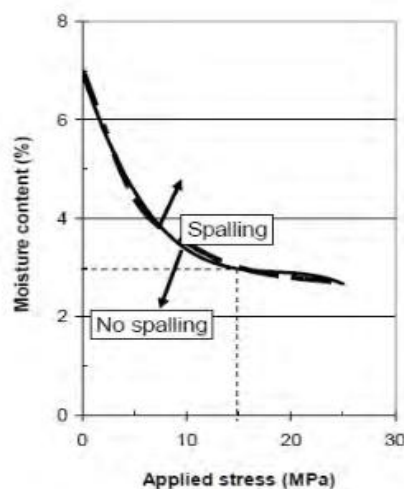
Lors d'essais testant la résistance au feu des matériaux, il a été constaté des désordres importants appelés « Eclatement » ou « Spalling » (en anglais). En effet, les bétons ou des structures en

béton ont présenté des éclats et ont été détruits suite à un bruit sourd comme une explosion. L'éclatement est la résultante de processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés et concurrents, impliquant un grand nombre de paramètres, tant à l'échelle du matériau qu'à celle de l'élément de structure [54].

L'écaillage est la combinaison de plusieurs processus (chimique, thermique, hydrique et mécanique) et de la modification microstructurale au cours du chauffage [55].

Parmi les paramètres qui participant à ce phénomène d'écaillage [56],[57].

- Faible porosité: La faible porosité entraîne une faible perméabilité et par conséquent un transfert de masse plus difficile [58].
- Présence de l'eau et apparition des pressions internes : L'eau présente est la principale raison de l'éclatement. Une teneur en eau limitée (inférieure à 3%) permet d'éviter tout risque d'écaillage (Fig. 1.17).



**Figure 1. 17.** Risque d'éclatement dans les bétons en fonction de la teneur en eau et de l'effort exercé [59]

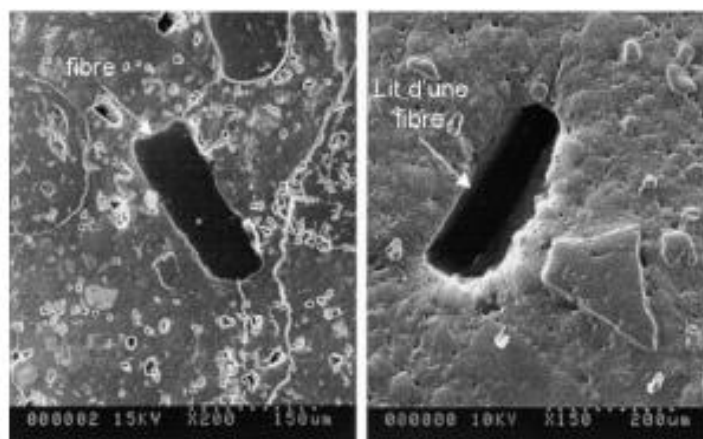
### 6.6. Influence des fibres de polypropylène

Les fibres sont sous forme de faisceaux ou de filaments individuels (Fig.1.18). Elles se caractérisent par une faible densité. Elles sont particulièrement flexibles et insensibles aux produits chimiques, mais peu résistants au feu (Température de fusion environ 160 °C). Lorsqu'elles sont utilisées en faisceaux, elles se séparent lors du mélange. Elles sont réparties de manière multidirectionnelle dans le béton. Elles se mesurent environ 100 µm de diamètre et entre 10 et 30 mm de longueur [60].



**Figure 1. 18.** Fibres de polypropylènes

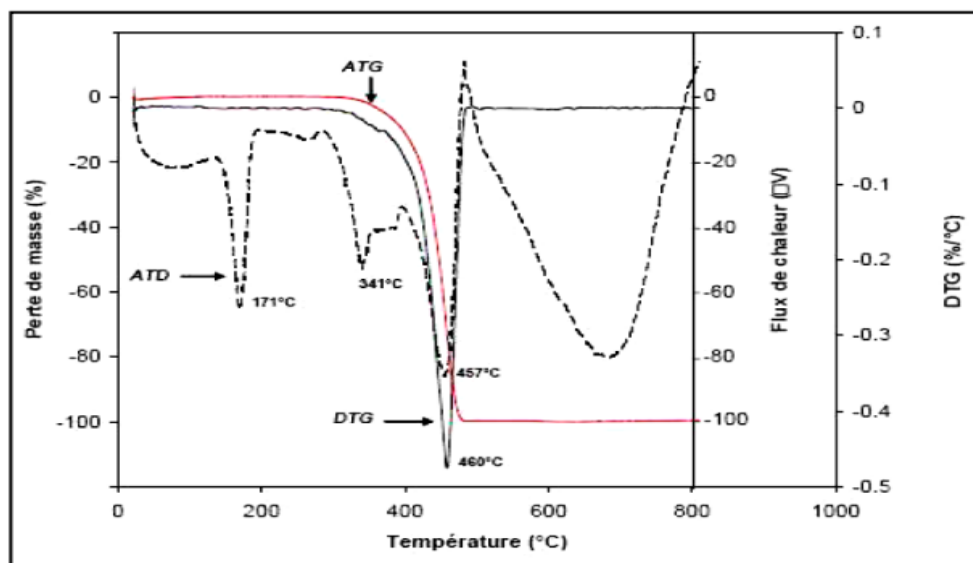
L'addition de fibres polypropylène est recommandée par l'EUROCODE 2 [62] comme moyen de réduire le risque d'éclatement des bétons en cas d'incendie, Les fibres de polypropylène utilisées fondent lorsqu'elles sont chauffées à des températures voisinant 170 °C [61], [61]. Kalifa et al [62] ont montré que les fibres ainsi fondues sont absorbées par la pâte de ciment durcie. Un vide est ainsi créé à l'emplacement initial de la fibre, offrant un volume supplémentaire pour la circulation de la vapeur d'eau. Selon Khoury et Willoughby [63], la fusion complète des fibres n'est pas nécessaire pour fournir de nouveaux canaux de gaz en raison de la mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire (Fig. 1.19).



**Figure 1. 19 .**Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). [62].

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour lutter contre la fissuration du béton à l'état frais. Elles permettent de renforcer le béton avant durcissement et d'éviter ainsi la fissuration de retrait au très jeune âge. Certains auteurs [41] ont montré que l'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton réduit considérablement l'éclatement. La quantité minimale de fibres de polypropylène permettant d'éviter le risque d'éclatement est de l'ordre de 0.20 % du volume de béton. L'analyse thermique différentielle (ATD) des fibres de polypropylène effectuée par Kalifa et al [62]. Montre des pics sur les courbes d'ATD des fibres (Fig. 1.20). Les auteurs attribuent le

premier pic au point de fusion des fibres de polypropylène à une température 171°C, le second pic correspond à la température de vaporisation à 341 °C et le troisième, au point de carbonatation à 457 °C.



**Figure 1. 20.** Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène[62].

## 7. Conclusion

Une synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux propriétés à l'état frais et à l'état durci des bétons à hautes performances (BHP). Cette synthèse laisse apparaître également que le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux (super-plastifiant, ajouts minéraux, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite.

Sous l'effet des hautes températures, la composition chimique, la structure physique et la teneur en humidité du béton changent. Ces changements sont principalement observés au niveau de la pâte de ciment puis également au niveau des granulats. Le chauffage à des températures élevées provoque la déshydratation de la pâte de ciment durcie et les granulats perdent également leur eau évaporable et les granulats hydratés se déshydratent à des températures élevées, et subissent une transformation cristalline accompagnée d'une température d'expansion volumique importante. Tous ces changements chimiques et physiques affectent considérablement les propriétés mécaniques des bétons



# **Chapitre 02**

## **Programme Expérimental**

## 2.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, on présente les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton à hautes performances. Ensuite, on présente la formulation des bétons à hautes performances et également le dispositif d'essai et instrumentation.

## 2.2. Matériaux utilisés

### 2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland de classe CEM I/ 52.5 N (Fig.2.1), provenant de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef). La composition minéralogique propriétés physiques sont données par le tableau 2.1 et le tableau 2.2, respectivement. Le ciment ayant une résistance à la compression de 52.5 MPa à 28 jours.

**Tableau 2. 1:** Composition minéralogique du ciment (%)

Eléments	Valeur moyenne
C <sub>3</sub> A	6-8
C <sub>3</sub> S	41.8
C <sub>2</sub> S	33.1
C <sub>4</sub> AF	10.7

**Tableau 2. 1:** Composition chimique du ciment (%)

Eléments	Valeur moyenne
SiO <sub>2</sub>	20.20
AL 2O <sub>3</sub>	5.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.24
CaO	64.25
MgO	0.84
SO <sub>3</sub>	1.70
K <sub>2</sub> O	0.67
Na <sub>2</sub> O	0.18
CaO libre	1
Cl <sup>-</sup>	< 0.03
RI	1.20
PAF (LOI)	1.39

**Tableau 2. 2.** Propriétés physiques.

Consistance normale	26 à 28%
Temps début de prise	= 45min
Expansion	<5mm
Finesse (SSB)	3200-3800(cm <sup>2</sup> /g)

**Figure 2. 1.** Ciment utilisé.

### 2.2.2. Fumée de silice

La fumée de silice a une classe granulométrique inférieure à 80  $\mu\text{m}$ , une masse volumique de 2  $\text{g}/\text{cm}^3$  et une surface spécifique Blaine de 9601  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Les tableaux 2.3 et 2.4 récapitulent les propriétés de la fumée de silice.

**Tableau 2.3.** Caractéristiques chimiques de la fumée de silice.

Si O <sub>2</sub>	89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9
CaO	0.3
MgO	1.5
SO <sub>3</sub>	0.3
K <sub>2</sub> O	1.7
Na <sub>2</sub> O	0.6

**Tableau 2.4.** Caractéristique physique de la fumée de silice.

<b>Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,5
<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.0
<b>Surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g)</b>	9601

### 2.2.3 .Laitier de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique (Fig.2.2). Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minéral de fer dans un haut fourneau. Ce laitier provient du combinat métallurgique EL -HADJAR ANNABA récupéré de l'usine SIKA ALDJAZAIR. Ses caractéristiques et composants minéralogiques sont représentés dans les tableaux 2.5 et 2.6.



**Figure 2. 2.** Laitier de SIKA.

**Tableau 2. 5.** Caractéristiques chimiques de laitier.

Si O <sub>2</sub>	39.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.23
CaO	41.12
MgO	3.22
SO <sub>3</sub>	0.18
K <sub>2</sub> O	0.94
Na <sub>2</sub> O	0.16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.36
PAF	1.02

**Tableau 2. 6.** Caractéristique physique de laitier.

Masse volumique réelle (g/cm <sup>3</sup> )	2.89
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.87
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5300
Indice de basicité CaO/SiO <sub>2</sub>	1.4

### 2.2.4. Fibres de polypropylène

Les fibres utilisées sont des fibres de polypropylène (Fig.2.3) commercialisées par la société algérienne GRANITEX. Elles sont employées dans les bétons pour améliorer la résistance au feu. Leurs caractéristiques techniques sont données par le fabriquant.

- Masse volumique..... 0.91g/cm<sup>3</sup>
- Point de fusion ..... 160°C
- Module de Young..... 3 kN/mm<sup>2</sup>
- Section de la fibre ..... 30 microns
- Longueur de la fibre.....30 mm



**Figure 2.3.** Fibres de polypropylène.

### 2.2.4. Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau appelé SUPERIOR 9 WG (Fig.2.4). Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés rhéologiques du béton frais et ne présente pas d'effet retardataire. Ce superplastifiant est dosé à 0,9 % par rapport à la masse de ciment. Le tableau 2.7 présente les caractéristiques physico-chimiques du SUPERIOR 9 WG.



**Figure 2. 4.** Superplastifiant utilisé SUPERIOR 9WG

**Tableau 2. 7.** Caractéristiques physico-chimiques du SUPERIOR 9 WG.

SUPERIOR 9 WG	Propriétés
Teneur en extrait sec	30%
Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 – 6,5
Masse volumique	1,07 g/cm <sup>3</sup>
Dosage recommandé	0,5% à 2,0%
Nature chimique	Polycarboxylate

### 2.2.5. Sable

Le sable utilisé est un sable d'oued de la région de la willaya d'Ain Defla. Le sable est propre et arrondis < 4 mm. (Fig.2.5). L'analyse granulométrique est donné par la figure 2.8.

**Figure 2.5.** Sable naturel.

Selon la norme Européenne EN 12620 [63], le module de finesse du sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivants : 0,125-0,25-0,50-1-2-4 mm. Le sable (0/4) utilisé ayant un module de finesse de 2.47.

Selon la norme française P18-598 [64]. Le coefficient d'équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et de diminuer l'adhérence avec les granulats. Le sable utilisé dans la fabrication de notre est un sable ayant propre (tableau 2.8).

**Tableau 2.8.** Equivalant de sable.

	Hauteur H1 (cm)	Hauteur H2 (cm)	ES (%)
$E_{sv}$	10	8.9	89
$E_{sp}$	10	8.8	88



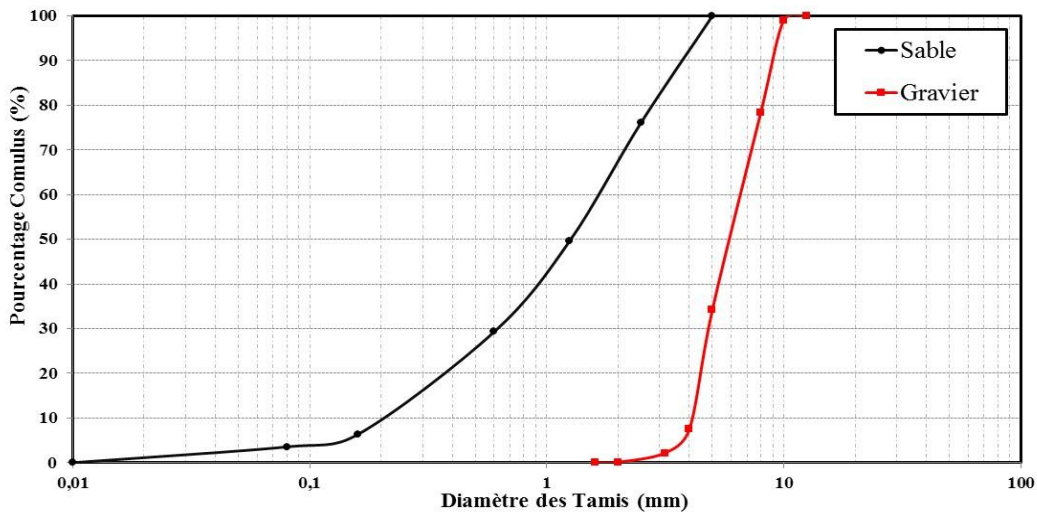
**Figure 2. 6. Essai de l'équivalent de sable.**

### **2.2.6. Granulat**

Le granulat utilisé est de classe granulaire 4/12.5 (Fig.2.7). selon la norme P 18-560 [65] l'analyse est représentée dans la figure 2.8



**Figure 2. 7. Granulat naturel**



**Figure 2. 8.** Analyse granulométrique

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume (V) du sable / granulat sans le tasser et le peser ensuite (Fig.2.9), soit cette quantité (M), pour en déduire la masse volumique apparente selon la formule suivante :

$$M_{v_{app}} = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \tag{1}$$

M (kg) : masse sèche du matériau.

V (m<sup>3</sup>) : représente le volume du récipient.

La masse volumique absolue est déterminée selon la norme NF P 18-555 [66] pour le sable et la norme NFT 51 063 (méthode b) [67] pour le gravier. La masse volumique est calculée selon la formule suivante :

$$M_{v_{abs}} = \frac{M_1}{M_2 - M_0 - M_1} \rho_{eau} \tag{2}$$

M0: masse de pycnomètre rempli eau ;

M1: masse du granulat (sable ou gravier);

M2 : masse du pycnomètre + granulat.

Le tableau 2.9 donne les résultats de la masse volumique du sable et du granulat

**Tableau 2. 9.** Masse volumique (Sable et Granulat)

	Sable (0/4)		Graviers (#12.5)
Masse volumique	Apparente (g/cm3)	1,68	1,41
	Absolue (g/cm3)	2,66	2,7



(a) masse volumique apparente      (b) masse volumique absolue  
**Figure 2. 9.** Essai de masse volumique (Sable et Granulat).

L'essai Essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs des boulets (Fig.2.10). Cet essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le granulat aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. La valeur du coefficient Los-Angeles doit être  $\leq 40$  pour les granulats naturels suivant la norme NF P18 573 [68]. Le



**Figure 2. 10:** Essai de **Los Angeles**.

D'après les résultats obtenus (tableau 2.10), le granulat présente de bonne résistance de dureté (Choc).

**Tableau 2. 10:** Essai Los Angeles.

Type de matériaux	Gravier
Coefficient LA	24

L'essai de Fragmentation dynamique permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un granulat selon NF P 18-574 [69]. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée (Fig.2.11). Cette quantité est appelée coefficient de fragmentation dynamique. Cet essai a été conçu de manière à trouver, sur un même matériau, un résultat aussi proche que possible du coefficient Los Angeles. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 2.12. Selon le résultat donné par le tableau 2.11, le granulat (4/12.5) est de bonne résistance à la fragmentation dynamique



**Figure 2. 11:** Essai de fragmentation dynamique.

**Tableau 2. 11:** Coefficient Fragmentation dynamique du granulat.

Type de matériaux	Gravier
Coefficient FD	18

### 2.2.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée provient du réseau d'eau potable du robinet du Laboratoire de matériaux de construction de l'Institut de Génie Civil de l'Université de Chlef sans aucun traitement. Cette eau ne contient pas d'impuretés nuisibles aux mélanges.

### 2.3. Formulation des Bétons à Hautes Performances

Après une caractérisation détaillée des différents constituants, nous présenterons ensuite la méthode de formulation choisie pour déterminer la composition optimale des Bétons à Hautes Performances (BHP). La méthode de formulation adoptée pour les constituants entrant dans la composition du BHP est celle élaborée par Aïtcin [17].

Les formulations des BHP sont récapitulées dans le tableau 2.12 et le tableau 2.13. Une quantité optimale de fumée de silice, soit 10 % par rapport à la masse du ciment et 15% de laitier, 450 kg/m<sup>3</sup> de ciment a été utilisé pour atteindre une résistance qui dépasse les 75MPa. La réduction de la quantité d'eau est obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dosé à 0.9 % par rapport à la masse du ciment, ceci a permis de rendre le mélange fluide.

Six types de BHPs ont été confectionnés : un BHP à base de fumée de silice (**BHPFS**), un BHP avec Laitier (**BHPL**), BHPFS avec 0.11% de fibre polypropylène (**BHPFS-1.1**), BHPFS avec 0.22% de fibre polypropylène (**BHPFS-2.2**), BHPL avec 0.11% de fibre polypropylène (**BHPL-1.1**) et BHPL avec 0.22% de fibre polypropylène (**BHPL-2.2**)

Les six BHPs formulées sont récapitulées dans les tableaux 2.12 et 2.13.

**Tableau 2. 12.** Composition des BHPFS, BHPFS-F1.1. et BHPFS-F2.2

Constituants	BHPFS	BHPFS-1.1	BHPFS-1.1
Eau (L/ m <sup>3</sup> )	173.25	173.25	173.25
Ciment kg/m <sup>3</sup> )	450	450	450
Fumée de silice (kg/m <sup>3</sup> )	45	45	45
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	715	715	715
Granulat (kg/m <sup>3</sup> )	1000	1000	1000
Super plastifiant (L/m <sup>3</sup> )	3.6	3.6	3.6
Fibre polypropylène (kg/m <sup>3</sup> )	0	1	2
E/L	0.35	0.35	0.35

**Tableau 2. 13.** Composition des BHPL, BHPL-1.1. et BHPL-2.2

Constituants	BHPL	BHPL-1.1	BHPL-1.1
Eau (L/m <sup>3</sup> )	173.25	173.25	173.25
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	450	450	450
Laitier (kg/m <sup>3</sup> )	67.5	67.5	67.5
Sable kg/m <sup>3</sup>	715	715	715
Granulat kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000
Super plastifiant	3.6	3.6	3.6
Fibre polypropylène (kg/m <sup>3</sup> )	0	1	2
E/L	0.34	0.34	0.34

#### 2.4. Confection et conservation des éprouvettes

Le malaxage des BHP a été effectué à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de 15 litres. La durée totale de malaxage est de 4 min.

Le protocole de fabrication des spécimens d'épreuve est le suivant :

- Introduction des ingrédients (sable, granulat et ciment).
- Malaxer des constituants à sec pendant 1 minute.
- Ajout de l'eau de gâchage avec 1/3 de SP et malaxage pendant 2 minutes.
- Ajout du reste (2/3) de SP et malaxer pendant 30 secondes
- Mesurer de l'affaissement au cône d'Abrams,

Le remplissage des moules s'effectue par deux couches, chacune est mise sous vibration à l'aide d'une aiguille vibrante pendant une vingtaine de seconde, enfin on fait un surfacage avec une truelle

manuelle. L'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique sont déterminées pour chaque gâchée.

La figure 2.12 montre la fabrication des corps d'épreuve. Les spécimens d'épreuve sont ensuite décoffrés 24 h après le coulage et conservés dans l'eau pendant 56 jours (Fig. 2.13).



a. Bétonnage.

b. Décoffrage.

**Figure 2. 12.** Fabrication des spécimens d'épreuve.



**Figure 2. 13.** Conservation des éprouvettes dans un bac d'eau.

## 2.5. Essai sur les bétons frais

La caractérisation des bétons à l'état frais est obtenue en exploitant la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est l'essai le plus utilisé pour mesurer la maniabilité du béton. Cet essai est réalisé selon les prescriptions de la norme NF EN 12350-2 NF P 18-451 [70]. Il permet de déterminer la consistance d'un béton frais en mesurant l'affaissement qui n'est autre que la différence entre la hauteur du moule conique utilisé et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé. Le cône utilisé est de dimensions ( $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{ cm}$  et  $h=30\text{ cm}$ ). Le cône doit être posé sur un plateau métallique horizontal légèrement humidifié au préalable comme le montre la figure

2.14. Le remplissage du cône se fait en trois couches de même hauteur, chaque couche étant piquée par 25 coups à l'aide d'une tige de piquage normalisée. Une fois rempli, le moule doit être retiré verticalement. L'affaissement  $h$  est mesuré après stabilisation de l'affaissement par l'intermédiaire d'une règle.



**Figure 2. 14. Essai d'affaissement au cône d'Abram**

:

La méthode de détermination de la masse volumique du BHP frais ( figure 2.15) applicable en laboratoire est donnée dans la norme NF EN 12350-6 [71].



**Figure 2. 15. Mesure de la masse volumique du BHP frais.**

## 2.6. Essais sur les bétons durcis

### 2.6.1. Résistances mécaniques

Les essais de compression sont réalisés sur des éprouvettes cubiques ( $10 \times 10 \times 10$ ) cm<sup>3</sup> selon la norme EN12390-3 [72]. Les mesures ont été effectuées à 7,14, 28, 56 et 91 jours avec une presse de capacité maximale de 3000 kN (Fig.2.16 ). La vitesse de chargement était de 0,5 MPa/s.

$$f_{cj} = \frac{F}{A}$$

Où

$f_{cj}$  : la résistance en compression, exprimée en MPa à jours;

$F$  : la charge maximale, exprimée en Newtons ;

$A$  : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.



**Figure 2. 16.** Presse hydraulique.

### 2.6.2. Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion 3points est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) suivant la norme NF EN 12390-5 [73]. L'essai est effectué sur une machine, d'une capacité de 200 KN (Fig. 2.17), et ayant une vitesse de chargement de 0.1 MPa par seconde. La résistance à la traction (par flexion) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$F_t = \frac{1.5FL}{a^3}$$

$F_t$ : Résistance à traction la flexion exprimée en MPa.

$F$  : Force de rupture exprimée en N.

$a$  : dimension de la section ( $a = 70$  mm).



**Figure 2. 17.** Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.

### 2.6.3. Modules d'élasticité

Le module d'élasticité ( $E_c$ ) a été évalué au moyen d'un test de compression sur des échantillons cylindriques 150×300 mm (Fig.2.18), à l'aide d'un extensomètre conformément à la norme ASTM C-469 [74].

Le module d'élasticité de chaque mélange BHP a été testé à 56 jours. Trois échantillons ont été préparés pour chaque essai, en prenant leur moyenne arithmétique.



**Figure 2. 18.** Mesure du Module d'élasticité.

## 2.7. Traitement thermique

Pour étudier le comportement à haute température des bétons, il est nécessaire d'appliquer des traitements thermiques. Pour cela, les éprouvettes subissent un traitement lent ( $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), correspondant à la vitesse recommandée par la RILEM [75] pour les dimensions d'éprouvettes utilisées et afin de déterminer les propriétés mécaniques des bétons étudiés.

Afin de réaliser ces cycles de chauffage, on a utilisé un four d'une capacité ( $25 \times 23 \times 18 \text{ cm}^3$ ) (Fig.2.19). Il est piloté par un régulateur connecté à un thermocouple placé dans le four. Une ventilation est associée au chauffage pour brasser l'air et ainsi avoir une température uniforme dans le four.

Les échantillons sont soumis à des différentes températures ( $150^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  et  $700^{\circ}\text{C}$ ), une stabilité d'une heure est appliquée afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes, puis un refroidissement jusqu'à la température ambiante. Le choix de ces températures est fait par rapport au comportement des différents composants de la matrice cimentaire, des fibres de polypropylène et la capacité du four.

La période de chauffage était de deux heures à chaque augmentation de température pour permettre au béton à l'intérieur des échantillons d'atteindre la température requise. Après chaque étape du traitement thermique, les échantillons ont été pesés pour calculer la perte de masse et calculer la résistance résiduelle en compression et résistance résiduelle à la traction par flexion.



**Figure 2.19.** Four à moufle

### 2.8. Perte de masse

Pour la détermination de l'évolution de la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Les éprouvettes issues du chauffage sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant. L'essai consiste donc à déterminer la perte de masse qu'ont subie les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage), Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0.1g comme montre la figure 2.21. La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100 (\%) \quad (2.10)$$

Avec :

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

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



**Figure 2. 20.** Mesure de la perte de masse

# **Chapitre03**

## **Résultats et interprétation**

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats obtenus lors des expériences de façon à pouvoir les interpréter. L'analyse portera d'abord sur les propriétés des six types de bétons à hautes performances (BHP) sans et avec fibres de polypropylène à l'état frais et à l'état durci. Ce chapitre vise également à étudier le comportement de ces types de BHP sous différents cycles de chauffage-refroidissement (20 °C, 150 °C, 400 °C et 700°C). L'analyse des résultats qui concernent la perte de masse, la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion sous différentes températures.

### 3.2. Propriétés des BHP à l'état frais

Les propriétés des BHP à l'état frais sont caractérisées par l'affaissement au Cône d'Abrams et la masse volumique

#### 3.2.1. Affaissement des BHP

Les résultats sur le comportement à l'état frais des BHP sont donnés par le tableau 3.1. et la figure 3.1.



**Figure 3. 1.** Affaissements des bétons.

Tableau 3. 1. Affaissement de deux séries de BHP.

Béton	Affaissement (cm)
BHP sans fibres de polypropylène	
<b>BHPFS</b>	19
<b>BHPL</b>	18
BHP avec fibres de polypropylène	
<b>BHPFS-1.1</b>	16
<b>BHPFS-2.2</b>	11
<b>BHPL-1.1</b>	14.5
<b>BHPL-2.2</b>	10

La figure 3.2. montre que l'incorporation des fibres polypropylène provoque une diminution de l'affaissement des BHP avec fibres de polypropylène par rapport aux BHP sans fibres. On note des affaissements de 19cm, 16cm, 11cm, 18cm ,14.5cm et 10 cm pour BHPFS BHPFS-1.1, BHPFS-2.2, BHPL, BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement. En fait, les fibres de polypropylène diminuent l'affaissement des bétons fibrés, en raison de leur pouvoir d'absorption d'eau important.

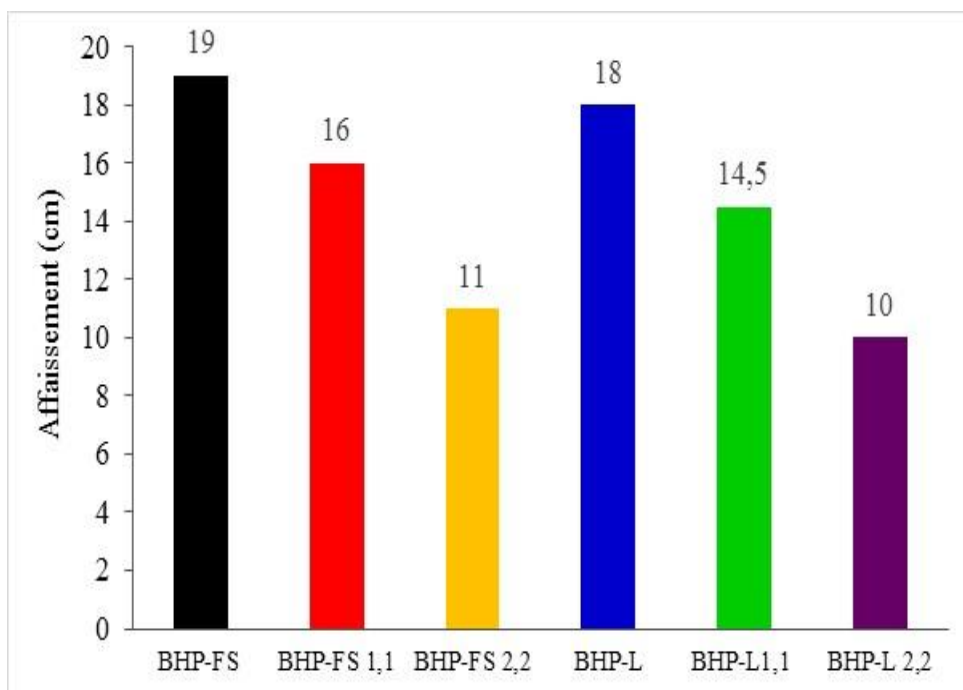


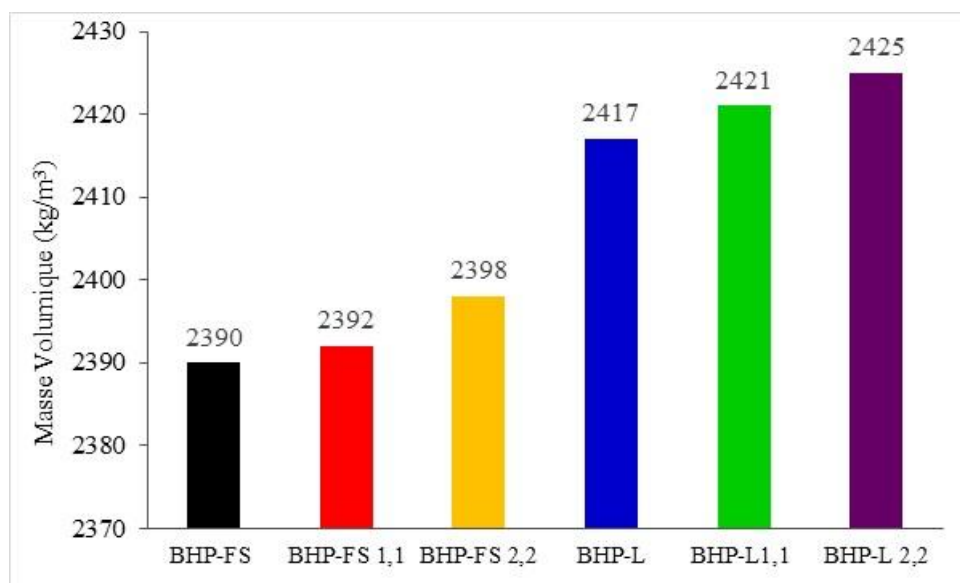
Figure 3. 2. Affaissements des BHP testés.

### 3.2.2. Masse volumique

Les résultats de la variation de la masse volumique des deux séries de BHP à l'état frais sont illustrés par le tableau 3.2 et la figure 3.3.

**Tableau 3. 2.** Masse volumique des bétons.

Béton	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BHP sans fibres de polypropylène	
<b>BHPFS</b>	2390
<b>BHPL</b>	2417
BHP avec fibres de polypropylène	
<b>BHPFS-1.1</b>	2392
<b>BHPFS-2.2</b>	2398
<b>BHPL-1.1</b>	2421
<b>BHPL-2.2</b>	2425



**Figure 3. 3.** Variation de la masse volumique des différents types de BHP.

D'après la figure 3.3, on constate que la masse volumique est légèrement affectée par l'addition des fibres de polypropylène, on enregistre 2390 kg/m<sup>3</sup>, 2398 kg/m<sup>3</sup> et 2417 kg/m<sup>3</sup> et 2425 kg/m<sup>3</sup> pour BHPFS, BHPFS-2.2, BHPL et BHPL-2.2, respectivement. On remarque également que la masse volumique des BHP avec l'addition du laitier est généralement supérieure à celle des BHP à base de la fumée de silice, en raison de la différence des masses volumiques intrinsèques des deux additions minérales, qui sont 2900 kg/m<sup>3</sup> pour le laitier et 2240 kg/m<sup>3</sup> pour la fumée de silice.

### 3.2. Propriétés mécaniques des BHP à l'état durci

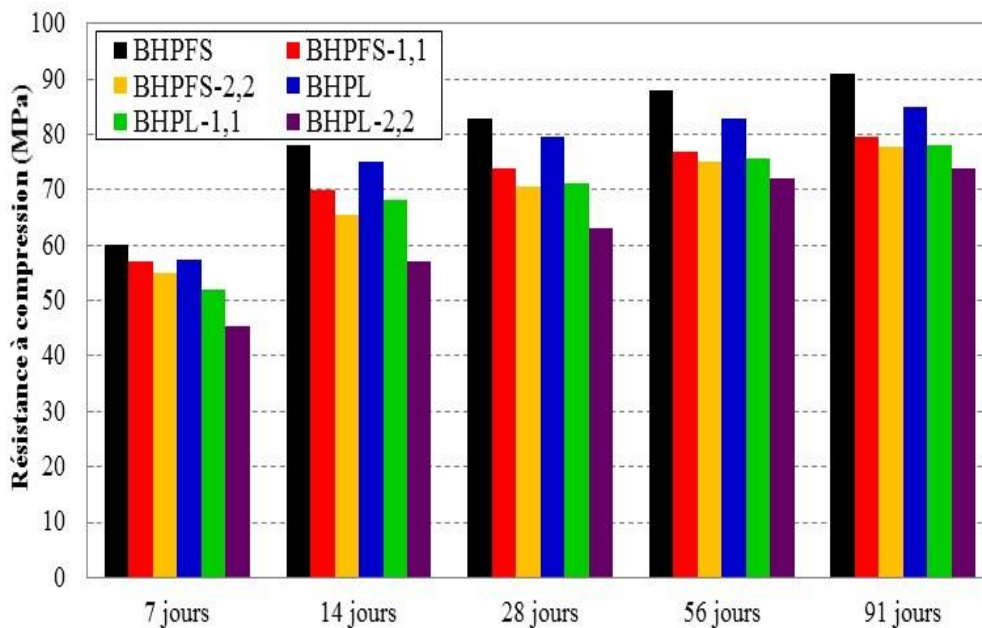
#### 3.2.1. Résistance à la compression

Le tableau 3.3 et la figure 3.4. regroupent les résultats de la résistance à la compression des deux séries de BHP sans et avec fibres de polypropylène à 7, 14, 28, 56 et 91 jours.

**Tableau 3. 3.** Résistance à la compression des BHP étudiés

Type de Béton		Age (jours)				
		7	14	28	56	91
BHPFS	$f_{cj}$ (MPa)	60	78	83	88	91
BHPL	$f_{cj}$ (MPa)	57	75	79	83	85
BHPFS-1.1	$f_{cj}$ (MPa)	57	70	74	77	80
BHPFS-2.2	$f_{cj}$ (MPa)	55	66	71	75	78
BHPL-1.1	$f_{cj}$ (MPa)	52	68	71	76	78
BHPL-2.2	$f_{cj}$ (MPa)	46	57	63	72	74

Selon la figure 3.4, on remarque que tous les BHP sans fibre ont une résistance supérieure à 80 MPa à 91 jours, à l'exception pour les BHP avec fibres où la résistance à la compression varie de 74 MPa à 80 MPa. On constate également que la résistance à la compression du BHPFS est légèrement supérieure à celle du BHPL.



**Figure 3. 4.** Variation de la résistance à la compression des différents types de BHP.

3.2.2. Résistance à la traction par flexion

Selon le tableau 3.4, on remarque que la présence des fibres de polypropylène modifie la résistance à la traction par flexion des différents types de BHP. En effet, on remarque que les BHP sans fibres ont une résistance supérieure à celle BHP avec fibres. On note également que la résistance à la traction du BHPFS reste supérieure à celle du BHPL.

Tableau 3. 4. Résistance à la traction par flexion des BHP testés (Fig.3.5)

Type de Béton		Age (jours)				
		7	14	28	56	91
BHPFS	$f_{tj}$ (MPa)	6.3	6.4	6.8	7.5	7.8
BHPL	$f_{tj}$ (MPa)	5.4	5.8	6.3	6.5	6.6
BHPFS-1.1	$f_{tj}$ (MPa)	6.1	6.2	6.6	7.3	7.6
BHPFS-2.2	$f_{tj}$ (MPa)	5.8	6.0	6.4	6.8	7.3
BHPL-1.1	$f_{tj}$ (MPa)	5.1	5.4	6.1	6.3	6.4
BHPL-2.2	$f_{tj}$ (MPa)	4.8	5.1	5.7	6.1	6.2

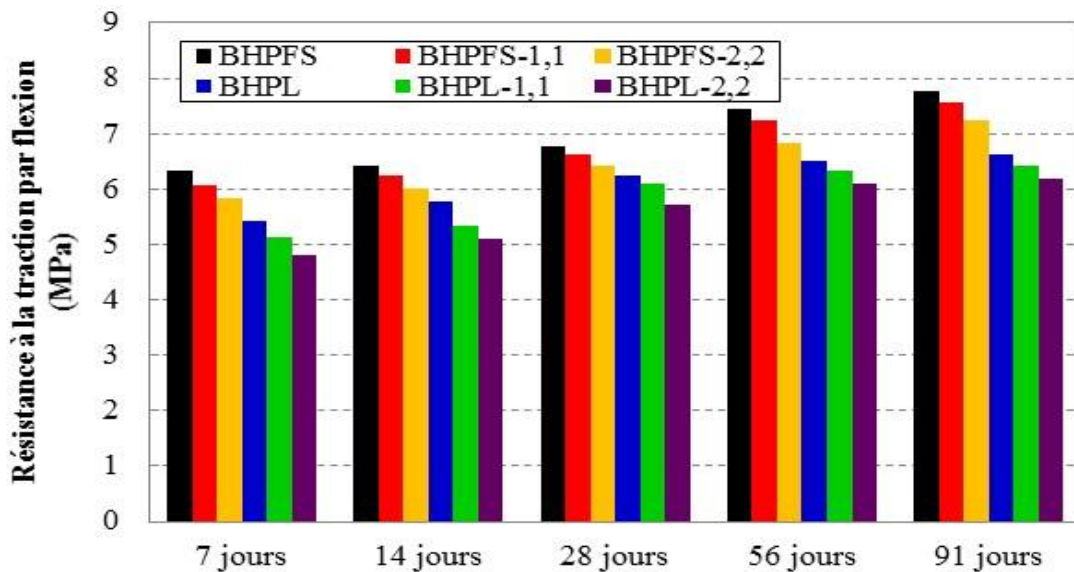


Figure 3. 5. Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps des BHP testés

### 3.2.3. Module d'élasticité

La figure 3.6 montre la variation du module d'élasticité des différents BHP à 91 jours. On constate que l'incorporation de 0.22% de fibre polypropylène (soit  $2\text{kg/m}^3$ ) diminue le module d'élasticité de 11% et 14 % des BHPFS-2.2 et BHPL-2.2 par rapport aux BHPFS et BHPL témoins. Cette diminution de module d'élasticité est due à l'incorporation des fibres polypropylènes qui entraîne une augmentation du volume d'air occlus. En plus, la forme lisse de la fibre facilite la formation de réseaux de capillaires remplis d'air. Ces deux circonstances amplifient la perméabilité du BHP.

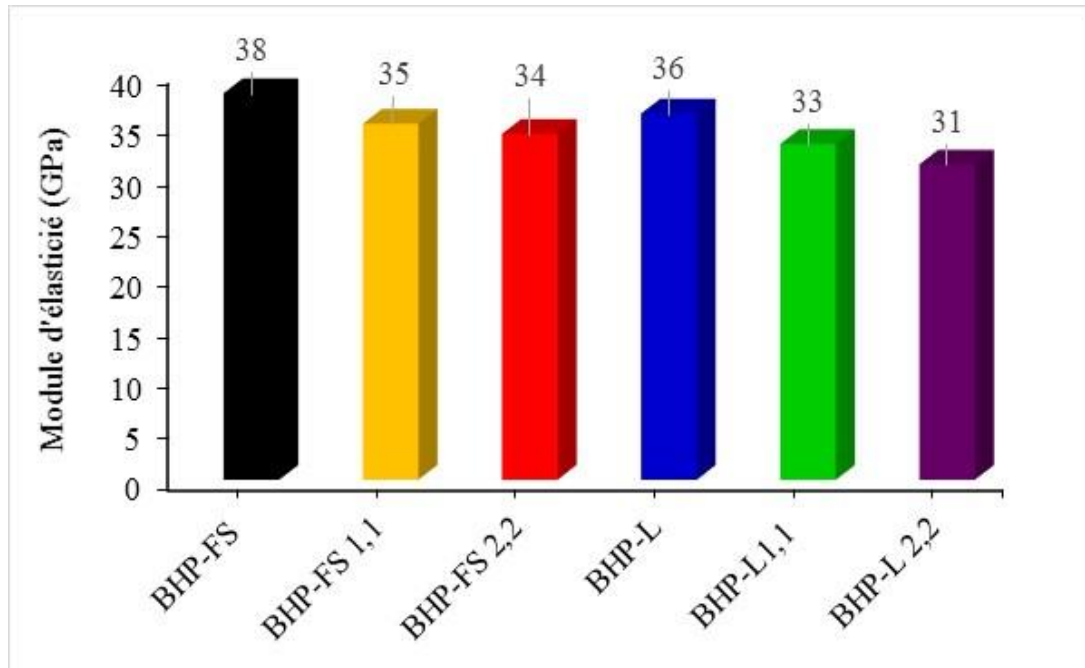


Figure 3. 6. Variation du module d'elasticité des BHP testés.

## 3.4. Comportement des BHP à haute température

Cette partie traite les propriétés physico -mécaniques des BHP avec et sans fibres de polypropylène soumis à de haute température. L'étude concerne la perte de masse ; la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion. Toutes ces propriétés résiduelles sont comparées aux propriétés initiales (à  $20^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.3.1. Comportement des BHP sans fibres de polypropylène

#### 3.3.1.1. Perte de masse

La perte de masse des éprouvettes cubiques ( $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ ) permet notamment de quantifier l'eau libre et l'eau liée présentes avant et après chauffage dans une éprouvette de BHP. En effet, le tableau 3.5 et la figure 3.7 présentent les valeurs de masse avant et après chauffage à 56 jours.

Tableau 3. 5. Pertes de masse des BHP sans fibres.

Type de Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	150°C	400°C	700°C
BHPFS	Masse (g)	2467.3	2436.7	2330.2	2280.2
	Perte (%)	/	1.24	5.56	7.58
BHPL	Masse (g)	2518	2474.8	2380.6	2318.8
	Perte (%)	/	1.72	5.46	7.91

En général, l'allure de la courbe de perte de masse est identique pour tous les bétons (Fig. 3.4). Pour les tous les BHP sans fibres de polypropylène étudiés, trois domaines s'observent :

- **Le premier domaine (20°C-150°C)** se caractérise par une faible variation de perte de masse, soit 1.24% et 1.72% pour BHPFS et BHPL, respectivement. En fait, durant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores qui débute à partir de 100°C. L'eau libre a la propriété d'être perdue facilement lors de variations thermiques [76].

- **Le deuxième domaine (150°C à 400°C)** est marqué par une forte augmentation de perte de masse. A 400°C, les BHPFS et BHPL ont perdu 5.56% et 5.46 % de leurs masses, respectivement. Cette perte de masse est due au départ de l'eau contenue initialement dans les hydrates (C-S-H) et à la décomposition du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), comme le prouve Noumowé[77].

-**Le troisième domaine (400°C à 700°C)** est caractérisé par une forte variation de perte de masse par rapport aux deux autres domaines. Ce domaine est marqué par la déshydroxylation de la portlandite[46].A la température de 700°C, on a remarqué que les BHP étudiés perdent plus de masse. On enregistre 7.58% et 7.91% pour les BHPFS et BHPL respectivement. Cette perte de masse est attribuée à la perte d'eau chimiquement liée des produits d'hydratation du ciment, de l'évaporation de l'eau libre des pores du béton et de la formation de fissures thermiques.

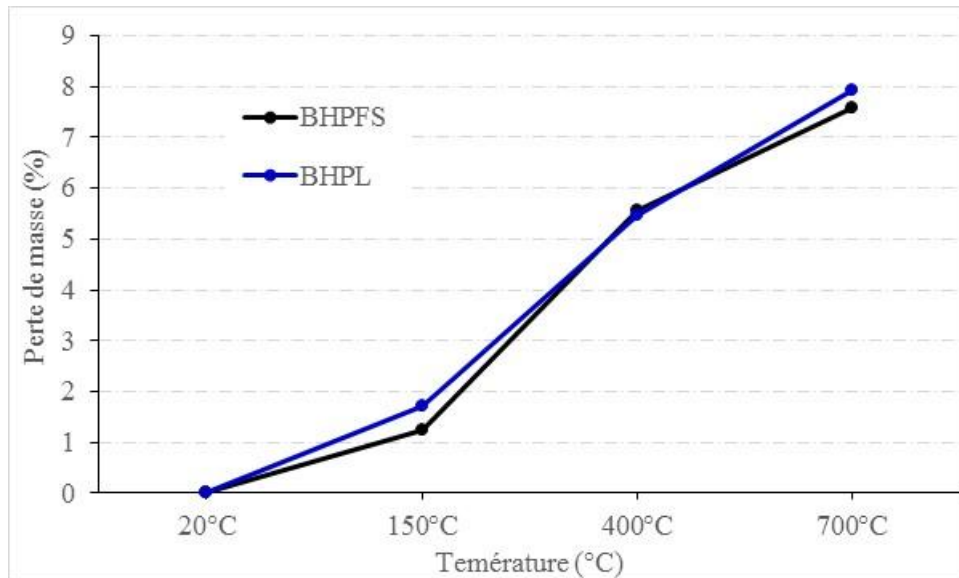


Figure 3. 7. Perte de masse des BHP sans fibres en fonction de la température de chauffage.

3.3.1.2. Résistance résiduelle en compression

Le tableau 3.6 et la figure 3.8 regroupent les résistances en compression obtenues à différents traitements thermiques pour l'ensemble des BHP testés à 56 jours.

Tableau 3. 6. Résistance en compression des BHP sans fibres (Fig.3.9).

Béton	Mesures	Température (° C)			
		20°C	150°C	400°C	700°C
BHPFS	Résistance (MPa)	88	83,58	76,7	38,86
	$R_c/R_{c20°C}$	1,00	0,95	0,87	0,44
	Perte (%)	/	5,02	12,84	55,84
BHPL	Résistance (MPa)	83	76,3	67	33,6
	$R_c/R_{c20°C}$	1,00	0,92	0,81	0,40
	Perte (%)	/	8,07	19,28	59,52

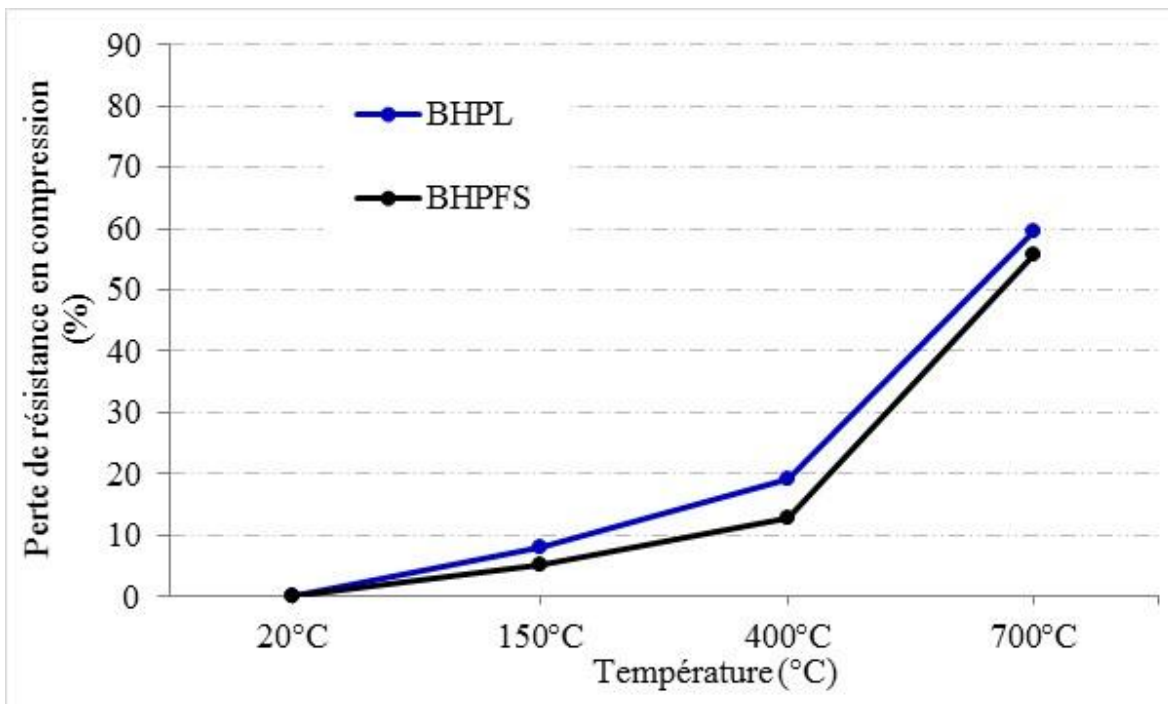
A travers l'ensemble des résultats présentés sur la figure 3.8, on constate que le comportement en compression à haute température des bétons sans fibres comporte trois domaines.

-Le **premier domaine (20°C-150°C)** est caractérisé par une baisse moyenne de la résistance à la compression. A 150°C, on enregistre des pertes de résistance de 5.02% et 8.07% pour BHPFS et BHPL, respectivement.

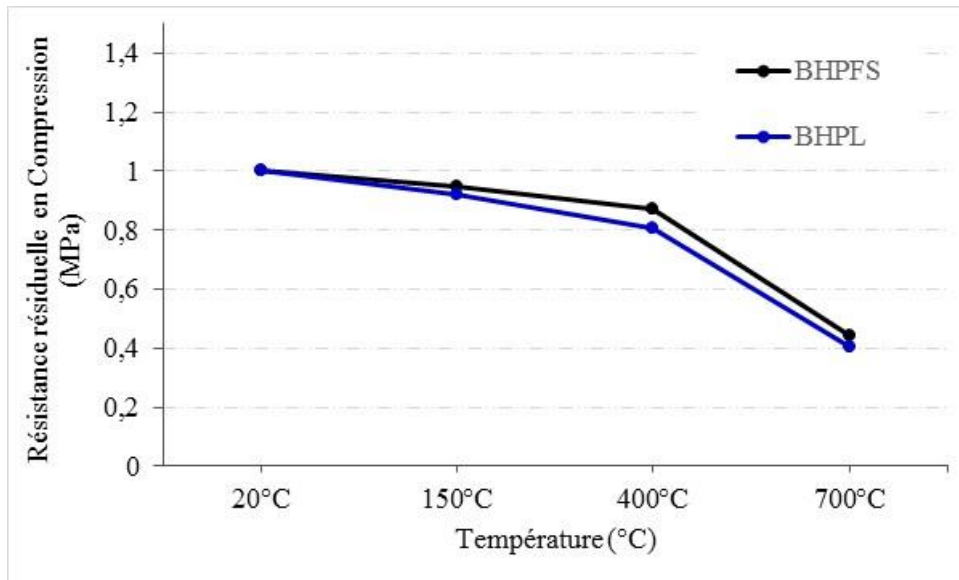
-Le **second domaine (150°C à 400°C)** présente une importante diminution de résistance. A 400°C, on note une diminution de résistance de 12,84% et 19,28%, pour les BHPFS et BHPL, respectivement.

-Le **troisième domaine (400°C à 700°C)** présente une très grande diminution de résistance. A 700°C, on note une diminution de résistance de 55,84% et 59,5%, pour les BHPFS et BHPL, respectivement.

Ces pertes de résistances sont dues à la porosité des BHP testé qui augmente au fur et à mesure que la température de chauffage augmente. Cette porosité générée par le départ de l'eau libre ou liée chimiquement

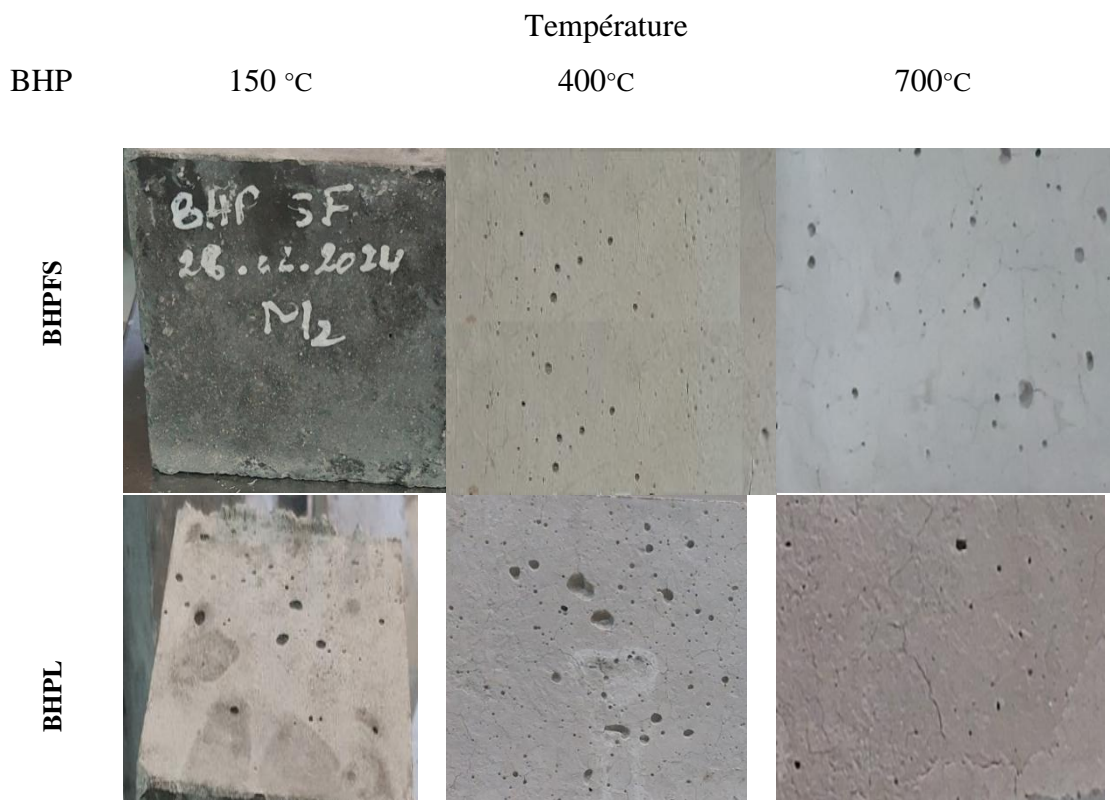


**Figure 3. 8.** Perte de résistance en compression des BHP en fonction de la température de chauffage.



**Figure 3. 9.** Résistance résiduelle en compression ( $R_C/R_{C20^\circ C}$ ) des BHP en fonction différentes températures.

Par ailleurs, on a constaté également plusieurs fissures observées sur la surface des éprouvettes (à 400°C et à 700°C) comme le montre la figure 3.10 qui peuvent être expliquées par la déshydroxylation de la portlandite [67].



**Figure 3. 10.** Vue visuelle des éprouvettes sans fibre polypropylène soumis à différentes températures.

### 3.3.1.3. Résistance résiduelle à la traction par flexion

Les valeurs de la résistance à la traction par flexion obtenues à température ambiante et après différents traitements thermiques sont présentées dans le tableau 3.7 et sur la figure 3.11.

**Tableau 3. 7.** Résistance à la traction par flexion des BHP sans fibres.

Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	150°C	400°C	700°C
BHPFS	Résistance (MPa)	7,5	7,2	4,8	2,6
	$R_t/R_{t20°C}$	1,00	0,96	0,64	0,35
	Perte (%)	/	4.0	36.0	65,3
BHPL	Résistance (MPa)	6,5	6,2	3,9	1,9
	$R_t/R_{t20°C}$	1,00	0,95	0,60	0,29
	Perte (%)	/	4,62	40,0	70,8

Selon la figure 3.11, on constate que la perte de résistance à la traction par flexion des BHP testés augmente de manière continue avec l'élévation de la température. La perte de résistance à la traction par flexion est plus importante que la résistance à la compression des bétons testés. A 150°C, les BHPFS et BHPL perdent environ 4% et 4.62 % de sa résistance initiale, respectivement.

Au-delà de 150°C, on observe que la baisse de la résistance à la traction devient plus élevée, tous les BHP perdent plus de 35% de leur résistance initiale à 400°C, le BHPL perd 40% de sa résistance initiale. On constate également qu'à 700°C, la perte de la résistance en traction par flexion pour le BHPL est 70.8%, tandis que la perte de la résistance à la traction par flexion pour BHPFS est de l'ordre de 65.3%.

Cette sévère détérioration de la résistance en traction est probablement due l'apparition de microfissures générées par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats et à la perte de masse élevée que l'on observe sur les éprouvettes de bétons chauffées à une température de 400°C et de 700°C.

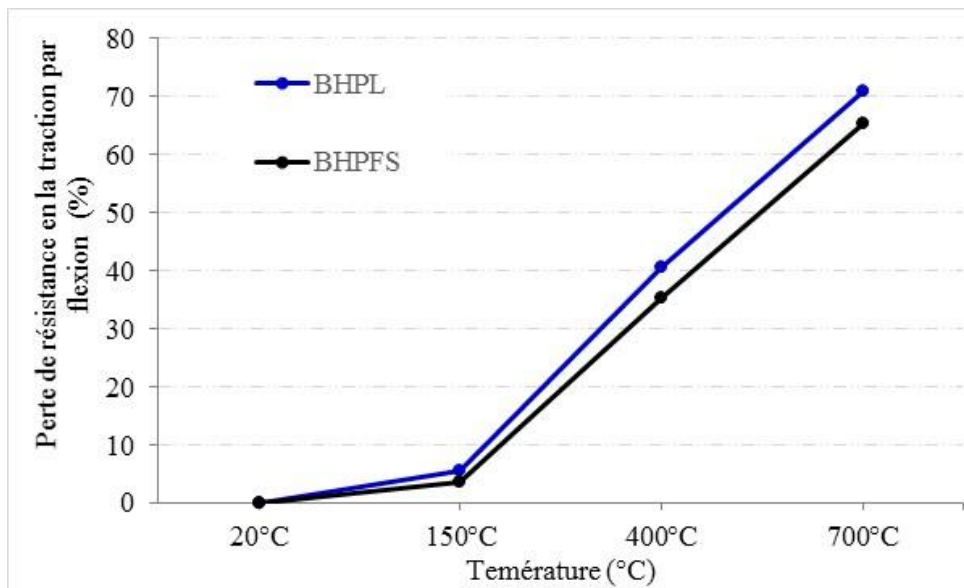


Figure 3. 11. Perte de la résistance en traction par flexion des BHP sans fibres.

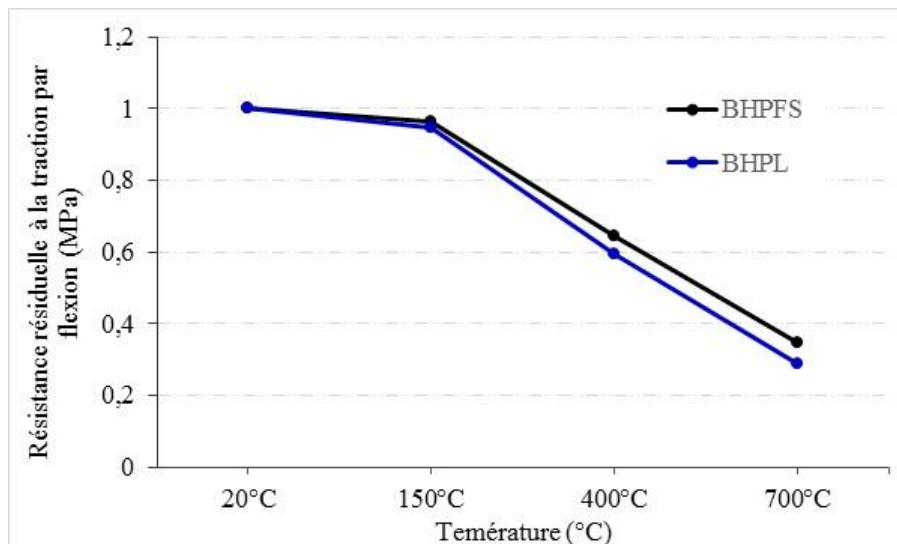


Figure 3. 12. Résistance résiduelle de la traction par flexion des BHP sans fibres.

On a constaté que les éprouvettes prismatiques présentent plusieurs fissures, comme le montre la figure 3.12.



Figure 3. 13. Faciès de BHP à 700°C.

### 3.3.2. Comportement des BHP avec fibres de polypropylène

#### 3.3.2.1. Perte de masse

Comme dans le cas des bétons sans fibres, la pesée des éprouvettes ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement a permis d'étudier l'évolution de la perte de masse des **BHPFS/BHPL** fibrés en fonction de la température de chauffage. Le tableau 3.8 et la figure 3.13 présentent les valeurs de masse avant et après chauffage.

**Tableau 3. 8.** Pertes de masse des BHP avec fibres de polypropylène.

Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	150°C	400°C	700°C
<b>BHPFS-1.1</b>	Masse (g)	2430,8	2395,3	2276,2	2193,3
	Perte (%)	/	1,46	6,36	9,77
<b>BHPFS-2.2</b>	Masse (g)	2441,1	2400,7	2246	2188,9
	Perte (%)	/	1,65	7,99	10,33
<b>BHPL-1.1</b>	Masse (g)	2428,5	2373,3	2280	2200,7
	Perte (%)	/	2,27	6,11	9,38
<b>BHPL-2.2</b>	Masse (g)	2348,3	2280,6	2150,6	2100,8
	Perte (%)	/	2.88	8.42	10,54

Au regard de la figure 3.13, on remarque que la perte de masse des BHP avec fibres de polypropylène est significative par rapport à celle des BHP sans fibres. A 700°C, la perte de masse est de 9.77% et 10.33% pour BHPFS-1.1 et BHPFS-2.2, et 9.38% et 10.54% pour BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement. Certes, la différence de perte de masse entre les BHP sans fibres et les BHP avec fibres de polypropylène allant jusqu'à 10%. En fait, avec l'augmentation de la température, la porosité des BHP avec fibres de polypropylène s'accroît plus vite que celle des BHP sans fibres. En outre, l'augmentation de perte de masse pour les BHP avec fibres de polypropylène est probablement liée à la vaporisation partielle ou totale des fibres qui mène à la perte de masse additionnelle lors de la montée en température. De plus, le réseau généré par la fusion des fibres facilite le transport de flux et l'évacuation de matière. En outre, le réseau de

fissures observées sur la surface des éprouvettes comme l'illustre la figure 3.14. pourrait être à l'origine de cette perte de masse supplémentaire.

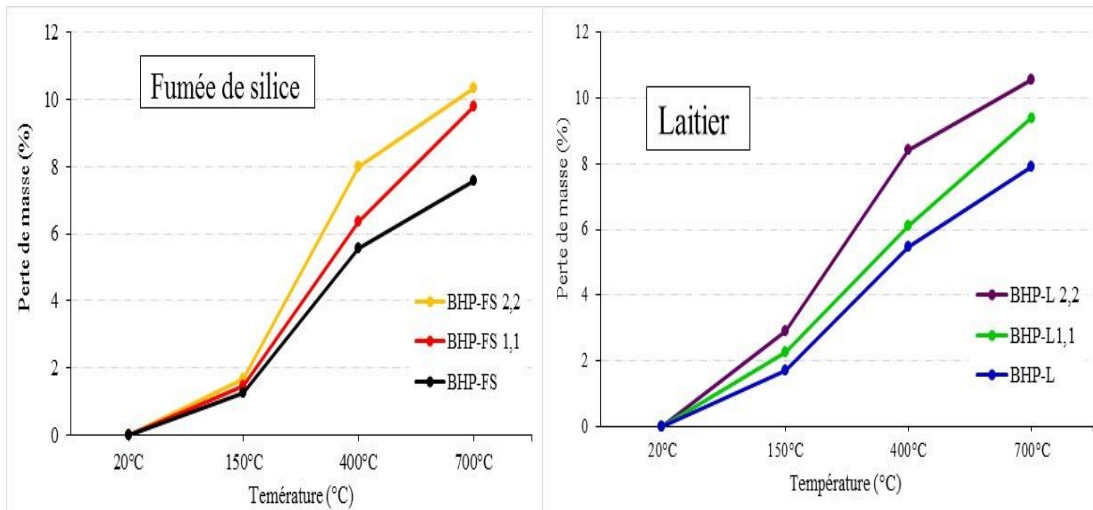


Figure 3. 14. Evolution de la perte de masse des BHP fibrés en fonction de la température.



Figure 3. 15. Faciès observé après cycle de chauffage-refroidissement de 400°C.

### 3.3.2.2. Résistance résiduelle en compression

Le tableau 3.9 et la figure 3.16 rassemblent les résultats de la résistance en compression des BHP avec fibres de polypropylène.

A la température ambiante (20°C), la présence des fibres de polypropylène modifie peu la résistance en compression. A 91 jours, les résistances en compression des BHPFS sans fibres et BHPFS-1.1 avec fibres sont respectivement de 91MPa et 80 MPa, soit une diminution de 12.1 %, tandis que pour les BHPL (85 MPa) et BHPL1.1 (78 MPa), soit une diminution de 8.24%.

**Tableau 3. 9.** Résistance en compression des bétons avec fibres de polypropylène (Fig.3.17).

Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	150°C	400°C	700°C
BHPFS-1.1	Résistance (MPa)	77	70	63,89	26,36
	$R_c/R_{c20°C}$	1,00	0,91	0,83	0,34
	Perte (%)	/	9,09	17,03	65,77
BHPFS-2.2	Résistance (MPa)	75	67,5	58,45	20,79
	$R_c/R_{c20°C}$	1,00	0,90	0,78	0,28
	Perte (%)	/	10,00	22,07	72,28
BHPL-1.1	Résistance (MPa)	76	67,5	57,71	22,95
	$R_c/R_{c20°C}$	1,00	0,89	0,76	0,30
	Perte (%)	/	10,71	23,66	69,64
BHPL-2.2	Résistance (MPa)	72	63,29	50,64	18,16
	$R_c/R_{c20°C}$	1,00	0,88	0,70	0,25
	Perte (%)	/	12,10	29,67	74,78

Selon la figure 3.16, la résistance résiduelle en compression des BHP avec fibres de polypropylène diminue en fonction de la température, comme pour le cas des BHP sans fibres. On observe deux domaines caractérisant le comportement en compression après chauffage des BHP avec fibres.

- **Premier domaine** (20°C à 400°C). A 400°C, les BHPFS fibrés conduisent à une perte de 17.03% et à 22.07%, pour BHPFS-1.1 et BHPFS-2.2, respectivement. Pour les BHPL fibrés, cette perte est de 23.66% et 29.67 % pour BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement. En fait, cette perte de résistance est probablement due à l'effet des fibres qui facilitent l'évaporation de l'eau, durant cette phase, comme le suggèrent Chen et Liu [78] et Xiao et Falkner [79].

- **Deuxième domaine** (Au-delà de 400°C), la baisse de la résistance des BHP avec fibres est importante. A 700°C, les BHPFS fibrés conduisent à une perte de 65.28 et 72.28%, pour BHPFS-1.1 et BHPFS-2.2, respectivement. Pour les BHPL fibrés, cette perte est de 69.64% et 74.78 % pour BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement. En fait, cette diminution de résistance est liée à la porosité supplémentaire est liée à la quantité de fibres dans le béton. Plus le dosage en fibres augmente, plus il y a de vide qui se crée lors du chauffage.

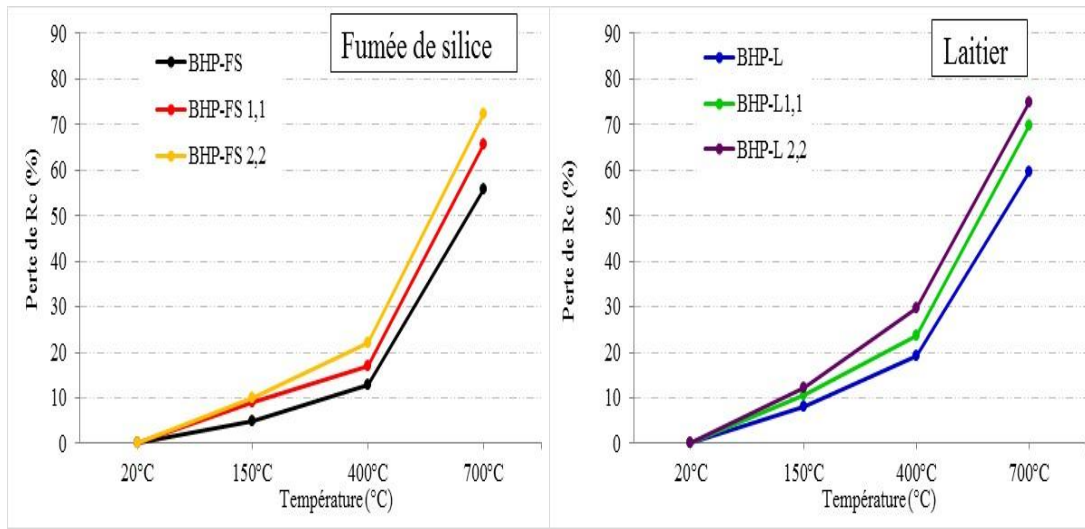


Figure 3. 16. Evolution de la perte de résistance en compression des bétons fibrés en fonction de la température.

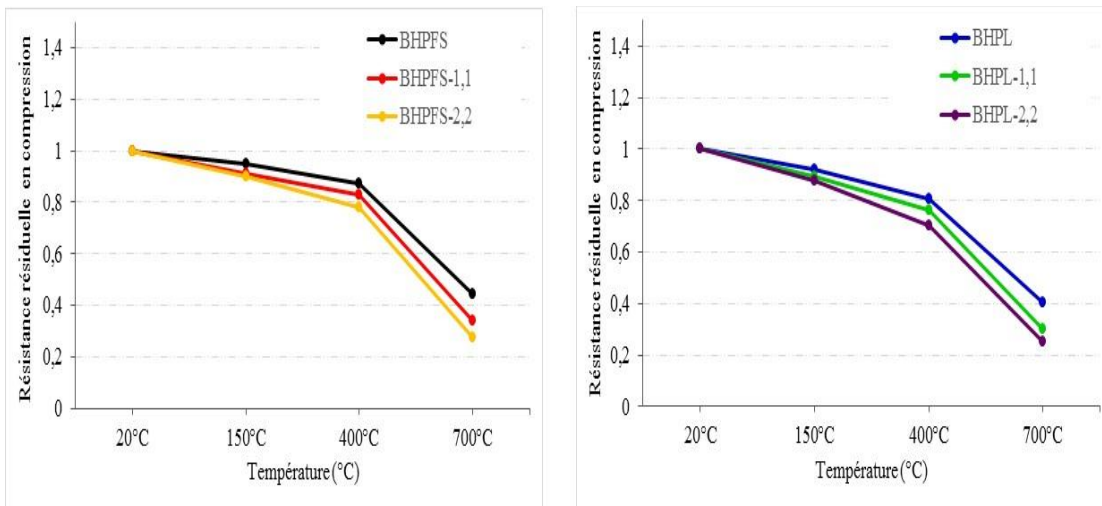
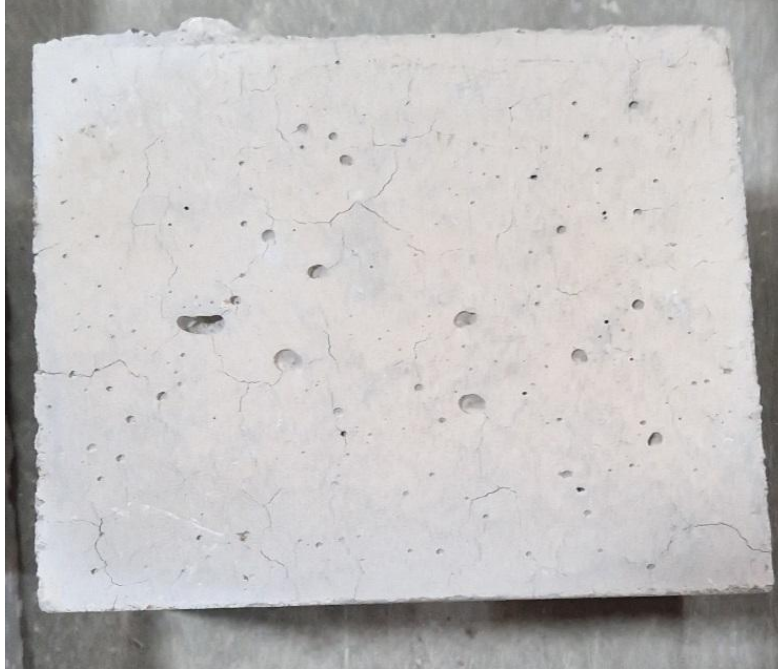


Figure 3. 17. Variation de la résistance résiduelle en compression des BHP fibrés en fonction de la température

Par ailleurs, l'ajout des fibres de polypropylène dans les BHP améliore sa stabilité thermique. En effet, aucun éclatement n'a été enregistré, et quelques fissurations ont été observées sur la surface de l'éprouvette (Fig.3.18), ceci montre bien le rôle positif que jouent les fibres de polypropylène et donc elles augmentent la stabilité thermique du BHP.



**Figure 3. 18.** Faciès de BHP fibré après le cycle de chauffage-refroidissement de 700°C.

### 3.3.2.3. Résistance résiduelle à la traction par flexion.

Le tableau 3.10 et les figures 3.19 présentent les résistances à la traction par flexion obtenues à 20°C et après les différents traitements thermiques pour les BHP fibrés testés à 56 jours.

Après chauffage à 400°C et 700°C, la résistance résiduelle en traction des BHP avec fibres diminue considérablement par rapport aux BHP sans fibres (Fig.3.20). A 400°C, la perte de résistance à la traction des BHPL-1.1 et BHPL-2.2 sont de 44.77% et 49.62% contre 40.94% et 47.58% pour les BHPFS-1.1 et BHPFS-2.2 (Fig.3.19)..

A 700°C, on observe que la baisse de la résistance en traction devient plus élevée, tous les BHP perdent plus de 70% de leur résistance initiale (Fig.3.19). La perte de la résistance relative en traction par flexion est de 78.20% et 80.26% pour les BHPFS-1.1 et BHPFS-2.2 et de 81.98% et 84.96% pour BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement.

Tableau 3. 4. Résistance à la traction par flexion des BHP avec fibres.

Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	150°C	400°C	700°C
BHPFS-1.1	Résistance (MPa)	7,25	6,58	4,28	1,58
	$R_t/R_{t20°C}$	1,00	0,91	0,59	0,22
	Perte (%)		9,25	40,94	78,20
BHPFS-2.2	Résistance (MPa)	6,83	6,02	3,58	1,21
	$R_t/R_{t20°C}$	1,00	0,88	0,52	0,18
	Perte (%)		11,96	47,58	82,26
BHPL-1.1	Résistance (MPa)	6,32	5,60	3,49	1,14
	$R_t/R_{t20°C}$	1,00	0,89	0,55	0,18
	Perte (%)		11,34	44,77	81,98
BHPL-2.2	Résistance (MPa)	6,11	5,29	3,08	0,92
	$R_t/R_{t20°C}$	1,00	0,87	0,50	0,15
	Perte (%)		13,38	49,62	84,96

Figure 3. 19. Evolution de la perte de résistance en traction des bétons fibrés en fonction de la température.

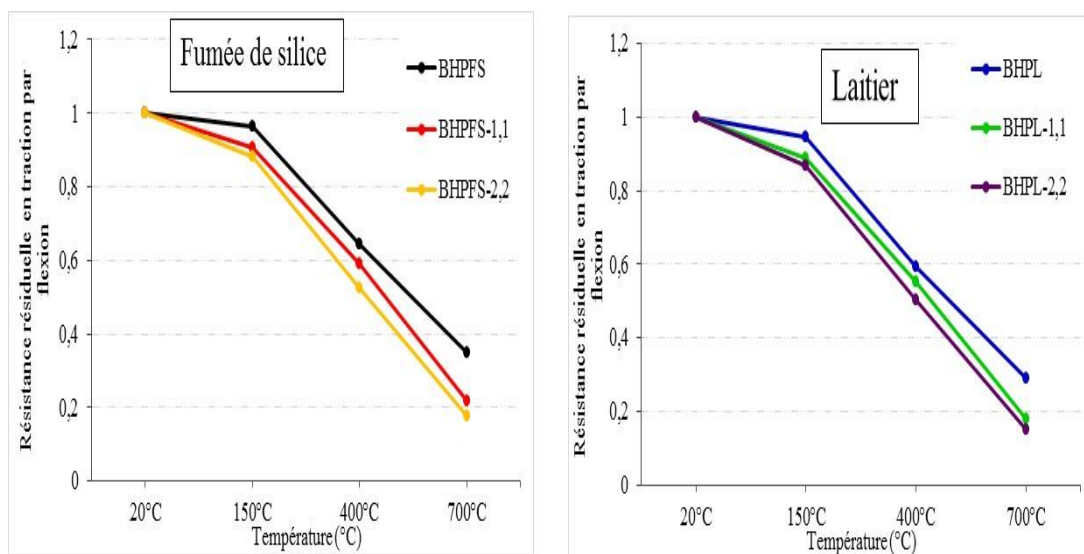


Figure 3. 19. Variation de la résistance résiduelle en traction des bétons fibrés en fonction de la température.

Par ailleurs, on a constaté également plusieurs fissures observées sur la surface de l'éprouvette exposée à 400°C 700°C comme le montre la figure 3.20.

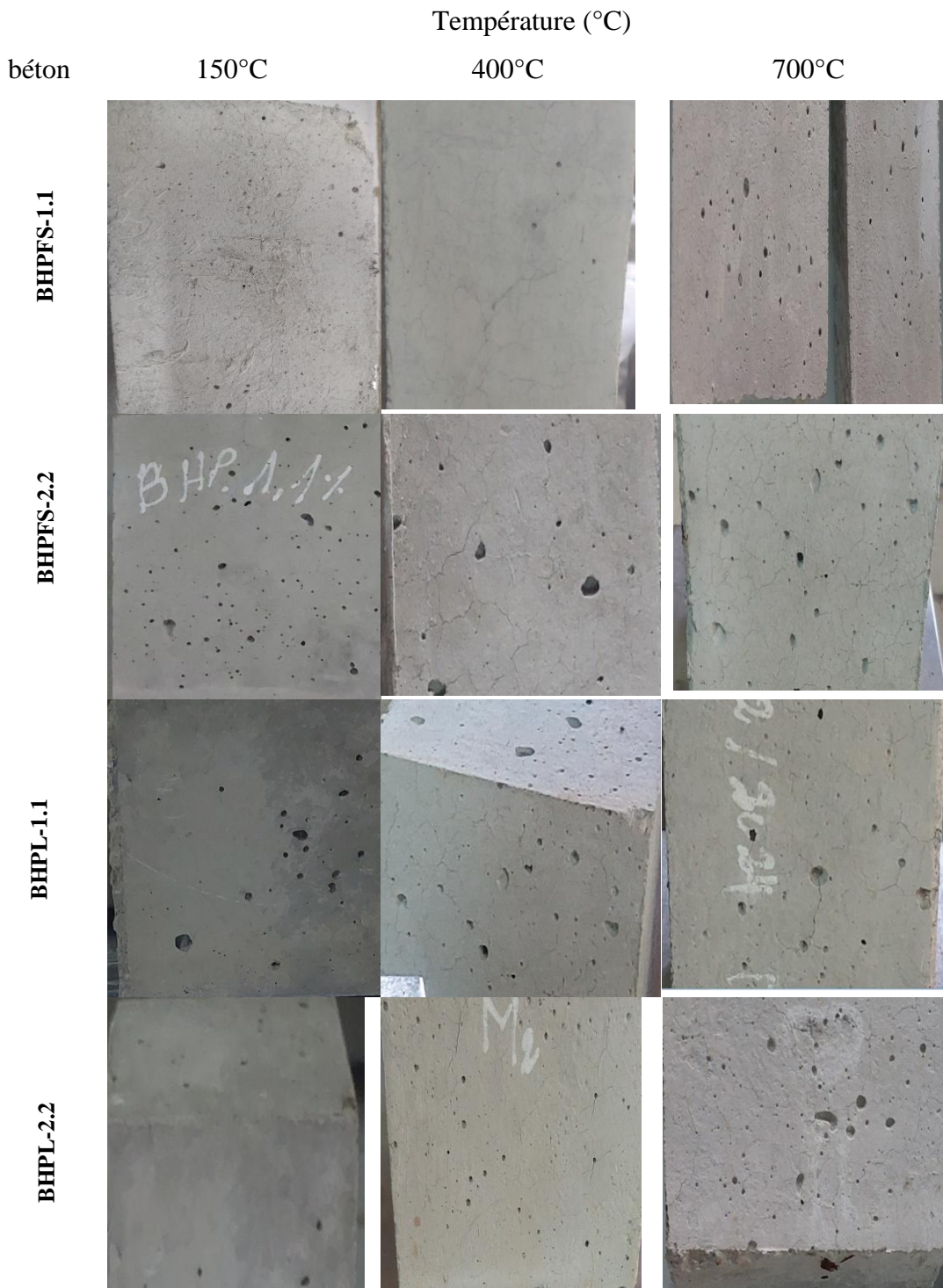
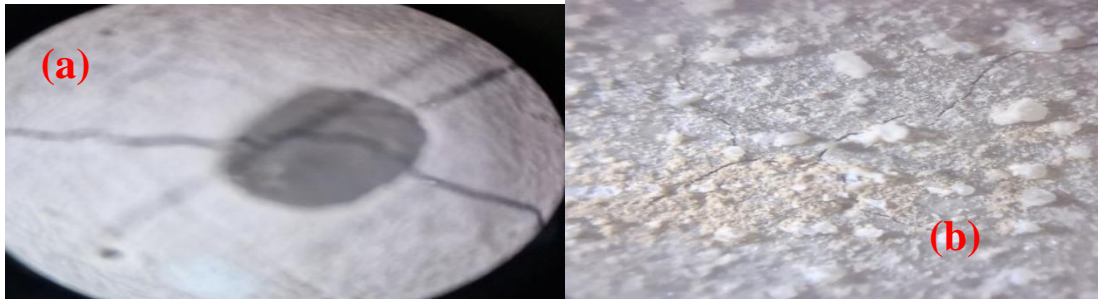


Figure 3. 20. Vue visuelle des éprouvettes avec fibre polypropylène soumis à différente température.

Par ailleurs, la figure 3.21 montre une vue rapprochée d'un BHP exposé à une température de 700°C, observé à l'aide d'un fissuromètre..

L'observation révèle de fines fissures dues aux contraintes thermiques, provoquant une expansion et une contraction inégales du matériau. Les fissures résultent de la dilatation thermique.



**Figure 3. 21.**Vue microscopique des éprouvettes BHP soumis à une température de 700°C.

### 3.4. Conclusion

Ce chapitre traite le comportement des BHP sans et avec fibres de polypropylène sous différents cycles de chauffage-refroidissement (150 °C, 400°C et 700°C). D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes:

- L'incorporation des fibres polypropylène provoque une diminution de l'affaissement des BHP avec fibres de polypropylène par rapport aux BHP sans fibres. On note des affaissements de 19 cm, 16cm et 11cm pour BHPFS, BHPFS-1.1 et BHPFS-2.2 et 18cm 14.5cm et 10cm BHPL, BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement.
- La masse volumique est légèrement affectée par l'addition des fibres de polypropylène, on enregistre 2390 kg/m<sup>3</sup> pour BHPFS et 2417 kg/m<sup>3</sup> pour BHPL contre 2398 kg/m<sup>3</sup> et 2425 kg/m<sup>3</sup> pour les BHPFS 2.2 et BHPL 2.2.
- A 700°C, la perte de masse est plus importante dans les BHPL avec fibres. On enregistre 7.91% pour le BHPFS contre 7.58% pour le BHPL. À la même température, cette perte est de l'ordre de 10.33 % pour BHPFS 2.2 et 10.54% pour BHPL 2.2
- La perte de résistances en compression des BHP testés diminue considérablement avec l'élévation de la température, particulièrement pour les BHPL. A 700°C, les pertes de résistance

en compression pour les BHPFS et BHPFS-2.2 sont respectivement de l'ordre de 55.84% et 59.52%, tandis que cette perte est de l'ordre de 72.28% et 74.78% pour les BHPL et BHPL-2.2.

–A 700°C, la perte de la résistance à la traction par flexion pour les BHPFS et BHPL est de 65.3% et 70.8%, respectivement. À la même température, les BHPFS-2.2 et BHPL-2.2 perdent 82.26% et 84.96%, respectivement de sa résistance initiale.

- L'ajout des fibres de polypropylène dans les BHP améliore sa stabilité thermique. En effet, aucun éclatement n'a été enregistré, et quelques fissures ont été observées sur la surface des éprouvettes.

# **Conclusion générale**

L'objectif de la présente étude est d'étudier et mieux comprendre le comportement des bétons à haute performance (BHP) sous haute température. On a étudié l'influence des fibres de polypropylène sur les propriétés physico-mécaniques des deux séries de BHP :

- BHP à base de Fumée de silice sans et avec de fibres de polypropylène
- BHP à base de laitier sans et avec de fibres de polypropylène.

Ces deux séries de BHP ont été soumis à des cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante (20°C) à température de 150°C, 400°C et 700°C.

Les principales conclusions issues de cette étude sont les suivantes :

### **1. L'ensemble des essais réalisés sur la caractérisation des BHP montre les résultats suivants:**

- L'incorporation des fibres de polypropylène provoque une diminution de l'affaissement des BHP avec fibres de polypropylène par rapport aux BHP sans fibres. On note des affaissements de 19cm, 16cm, 11cm, 18cm, 14.5cm et 10 cm pour BHPFS, BHPFS-1.1, BHPFS-2.2, BHPL, BHPL-1.1 et BHPL-2.2, respectivement.
- Les BHP sans fibres de polypropylène ont une résistance supérieure à 80 MPa à 91 jours, à l'exception pour les BHP avec fibres où la résistance à la compression varie de 74MPa à 80MPa
- Les BHP sans fibres ont une résistance à la traction par flexion supérieure à celle BHP avec fibres. On note également que la résistance du BHPFS reste supérieure à celle du BHPL. A 91 jours, les BHPFS, BHPL, BHPFS-1.1, BHPFS-2.2, BHPL-1.1 et BHPL-2.2 ont une résistance à la traction par flexion de 7.8MPa, 6.6 MPa, 7.6 MPa, 7.3 MPa, 6.4 MPa, et 6.2 MPa, respectivement.
- L'incorporation de 0.22% de fibre polypropylène (soit 2kg/m<sup>3</sup>) diminue le module d'élasticité de 11% et 14 % des BHPFS-2.2 et BHPL-2.2 par rapport aux BHPFS et BHPL témoins.

### **2. Les résultats du comportement des deux types de BHPs (BHPL et BHPFS) à base de fibres de polypropylène montrent que :**

- La perte de masse à haute température est plus importante pour les BHP avec fibres de polypropylène (BHPFS-2.2 /BHPL-2.2) que dans les BHP sans fibres (BHPFS /BHPL). A 700°C,

la perte de masse est de 7.58%, 7.91%, 10,33 et 10,54% pour les BHPFS, BHPL, BHPFS-2.2 et BHPL-2.2, respectivement.

- L'augmentation des températures élevées a provoqué une diminution systématique de la résistance à la compression des BHP testés. En effet, les pertes de résistance en compression pour un cycle de chauffage de 400°C et 700°C, sont respectivement de l'ordre de 5.56% et 7.58% pour le BHPFS et de 5.46% et 7.91 % pour le BHPL. Cette perte est plus importante dans le cas des BHPFS-2.2 et BHPL-2.2 qui est respectivement de l'ordre de 7.99% et 10.33% et 8.42% et 10.54%.

- A 700°C, la perte de la résistance à la traction par flexion pour les BHPFS et BHPL est de 65.3% et 70.8%, respectivement. Tandis que la perte de la résistance à la traction par flexion pour le BHPFS-2.2 et BHPL-2.2 est de l'ordre de 82 % et 85%, respectivement.

- L'addition des fibres de polypropylène dans les BHP améliore sa stabilité thermique. En effet, aucun éclatement et aucun écaillage n'ont été enregistrés, et plusieurs fissures ont été observées sur la surface des éprouvettes.

### **Perspectives**

Ce travail ouvre plusieurs perspectives concernant aussi bien l'amélioration du comportement au feu des BHP :

On peut soulever quelques points intéressants à explorer à l'avenir :

- Étudier l'influence des fibres de polypropylène et métalliques couplées sur le comportement des BHP soumis à haute température (au-delà de 700°C).
- Étudier le comportement à haute température des BHP à base de granulats recyclés

# Références bibliographiques

- [1] Dr.Schutter, FEBELCEM - Fédération de l'industrie Cimentière, Belge rue Volta 8 1050 Brussel, 2007.
- [2] N.E. 206-1/CN, Béton - Partie 1 : spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206-1, 2012.
- [3] P.C. Aïtcin, Bétons haute performance, Eyrolles2001.
- [4] N. EN, 1008.(juillet 2003), Eau de gâchage pour bétons-Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement P 18-211).
- [5] P.-C. Aïtcin, P.K. Mehta, Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete, *Materials Journal* 87(2) (1990) 103-107.
- [6] P. Aitcin, From gigapascals to nanometers, Engineering Foundation Conference, Potosi, Missouri, 1988.
- [7] M. HAMRAT, Béton a hautes performances: formulation, propriétés rhéologiques et mécaniques, Mohamed CHEMROUK, 1994.
- [8] Les adjuvants : pour des bétons à l'épreuve des chantiers et du temps[en ligne] [https://www.infociments.fr/betons/adjuvants\(consulté le 20/04/2019\)](https://www.infociments.fr/betons/adjuvants(consulté%20le%2020/04/2019)), avril 2018.
- [9] M. Thomas, K. Cail, R. Hooton, Development and field applications of silica fume concrete in Canada: a retrospective, *Canadian Journal of Civil Engineering* 25(3) (1998) 391-400.
- [10] Adjuvant. Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment tableau sur [https://www.infociments.fr/betons/adjuvants\(consulté25/04/2019\)](https://www.infociments.fr/betons/adjuvants(consulté25/04/2019)), avril2018.
- [11] R. Dron, I. Voinovitch, Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes, *Le béton hydraulique*. ENPC, Paris (1982) 237-246.
- [12] K. Hermann, L. BEGUIN, Les ajouts: les fumées de silice. 4, *Bulletin du ciment* 63(7) (1995) 3-7.
- [13] P.-C. Aïtcin, Condensed silica fume, [Sherbrooke, Quebec]: Université de Sherbrooke1983.
- [14] A. Durekovic, B. Tkalcic-Ciboci, Cement pastes of low water to solid ratio: An investigation of the polymerization of silicate anions in the presence of a superplasticizer and silica fume, *Cement and concrete research* 21(6) (1991) 1015-1022.

- [15] P. Aïtcin, les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton, *Revue des matériaux de construction* (1968) 185-194.
- [16] F. de Larrard, *Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances*, 1988.
- [17] P.-C. Aïtcin, *Bétons haute performance*, 2001.
- [18] Ghouali Mhamed ,Merah Abelhakim ,Etude de l'influence de l'incorporation des ajouts cimentaire ,fumée de silice et filler de calcaire sur les propriétés physiques et mécaniques des BHP ,Génie civil des matériau ,Mémoire de fin d'étude Boumerdes , universités M'hamed Bougra de Boumerdes ,2017. p88.
- [19] S.Laldji,caractéristiquedubéton,coursETS,hiver2015,p42.
- [20] Pierre-Claude Aïtcin: béton haute performance, propriété du béton frais. Contrôle de la masse volumique. p 405.
- [21] M. Hamrat, *Comportement structurel du béton à hautes performances (flexion et effort tranchant)*, Alger, 2010.
- [22] Pierre-Claude Aïtcin: béton haute performance, propriété mécaniques des BHP janvier 2001. 331p.
- [23] Rougeron,P.et Aïtcin,P.-C.(1994)Optimization of the composition of a high-performance concrete. *Cement, concrete, and Aggregates*, 16(2), décembre, 115-124.
- [24] Pierre-Claude Aïtcin: béton haute performance, propriété mécaniques des BHP. Module de rupture et résistance au fendage. p 505.
- [25] A. Neville, *Propriétés des bétons*, éditions Eyrolles 2000, *Properties of concrete*. Eyrolles Edition, Paris (2000).
- [26] D. BENAMARA, *Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP)*, Université Mohamed Khider–Biskra, 2011.
- [27] Holcim (2018). *Concevoir et mettre en œuvre les bétons durables, guide pratique*, 2ème édition, Belgique, 151p.
- [28] béton spéciaux, domaine d'application disponible sur <<http://betonspeciaux.e-monsite.com/pages/les-betons/betons-hautes-performances-bhp.html>> (consulté le 06/06/2024).
- [29] Edifice Scotia Plaza, jeudi19janvier2012 disponible sur <<https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/546584/scotia-tour-toronto>> (consulté le 06/06/2024).

- [30] Pont l'île de Ré disponible sur <http://www.pont-ile-de-re.com/>>(consulté le 06/06/2024).
- [31] Arche de la défense sur <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Arche\\_de\\_la\\_D%C3%A9fense](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arche_de_la_D%C3%A9fense)> (consulté le 06/06/2024).
- [32] Tours jumelles de Petronas disponible sur<  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Tours\\_Petronas](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tours_Petronas)>(consulté le 27/05/2019).
- [33] Performance characteristics of RHA concrete an overview hwang and Chandra, 1997,p141-152.
- [34] F. Koksai, O. Gencil, W. Brostow, H.H. Lobland, Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite, *Materials Research Innovations* 16(1) (2012) 7-13.
- [35] Z.P. Bažant, M.F. Kaplan, Z.P. Bazant, *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*, (1996).
- [36] C. Desmettre, *Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques*, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)2011.
- [37] F. Dabbaghi, M. Dehestani, H. Yousefpour, Residual mechanical properties of concrete containing lightweight expanded clay aggregate (LECA) after exposure to elevated temperatures, *Structural Concrete* 23(4) (2022) 2162-2184.
- [38] L.T. Phan, N.J. Carino, Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures, *Materials and Structures* 36 (2003) 91-98.
- [39] G. Khoury, Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of concrete Research* 44(161) (1992) 291-309.
- [40] W. Dias, G. Khoury, P. Sullivan, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 C (1292 F), *Materials Journal* 87(2) (1990) 160-166.
- [41] R. Felicetti, P.G. Gambarova, M.N. Sora, G.A. Khoury, Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling, *Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concretes*, N, 2000, pp. 749-758.
- [42] E. Annerel, L. Taerwe, P. Vandeveld, Assessment of temperature increase and residual strength of SCC after fire exposure, *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 2007, pp. 715-720.
- [43] A. Noumowé, H. Carré, A. Daoud, H. Toutanji, High-strength self-compacting concrete exposed to fire test, *Journal of materials in civil engineering* 18(6) (2006) 754-758.

- [44] J. Tao, X. Liu, Y. Yuan, High strength self-compacting concrete at elevated temperature, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete SCC, 2007, pp. 1135-1144.
- [45] B. Persson, Fire resistance of self-compacting concrete, SCC, *Materials and Structures* 37 (2004) 575-584.
- [46] A. Noumowe, Effet de hautes températures (20-600 C) sur le béton: cas particulier du béton a hautes performances, Lyon, INSA, 1995.
- [47] S. Thelandersson, Effect of high temperatures on tensile strength of concrete, (1972).
- [48] R. Felicetti, P. Gambarova, On the residual tensile properties of high performance siliceous concrete exposed to high temperature, *Mechanics of quasi-brittle materials and structures*. Hermes Sciences Publications (1999).
- [49] T. Harada, J. Takeda, S. Yamane, F. Furumura, Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, *Special Publication 34* (1972) 377-406.
- [50] I. Gaweska, Comportement à haute température des bétons à haute performance évolution des principales propriétés mécaniques, 2004.
- [51] Y.-F. Chang, Y.-H. Chen, M.-S. Sheu, G.C. Yao, Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures, *Cement and concrete research* 36(10) (2006) 1999-2005.
- [52] M. Li, C. Qian, W. Sun, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, *Cement and concrete research* 34(6) (2004) 1001-1005.
- [53] E. Tolentino, F.S. Lameiras, A.M. Gomes, C.A. Silva, W.L. Vasconcelos, Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes, *Materials research* 5 (2002) 301-307.
- [54] L.T. Phan, J.R. Lawson, F.L. Davis, Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and structures* 34 (2001) 83-91.
- [55] A. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki, J. Costaz, High performance concrete for severe thermal conditions, *Proceedings of the international conference on concrete under severe conditions, CONSEC*, 1995, pp. 1129-1140.
- [56] U.J. U. Diederichs, and V. Pentalla, . Behaviour of highstrengthconcreteatelevatedtemperature. Espoo - Helsinki University of Technology – Department of Structural Engineering, Report 92 :72,, ( 1992.).

- [57] Y. Msaad, Analyse des mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées, Ecole des Ponts ParisTech, 2005.
- [58] U.J. U. Diederichs, and V. Pentalla. , Behaviour of highstrengthconcreteatelevatedtemperature. Espoo - Helsinki University of Technology – Department of Structural Engineering, Report 92 :72, ( 1992.  
).
- [59] H. Sabeur, H. Colina, M. Bejjani, Elastic strain, Young's modulus variation during uniform heating of concrete, Magazine of concrete research 59(8) (2007) 559-566.
- [60] M. Zeiml, D. Leithner, R. Lackner, H.A. Mang, How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, Cement and concrete research 36(5) (2006) 929-942.
- [61] G. Khoury, B. Willoughby, Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour, Magazine of concrete research 60(2) (2008) 125-136.
- [62] P. Kalifa, G. Chene, C. Galle, High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure, Cement and concrete research 31(10) (2001) 1487-1499.
- [63] BS EN 12620, Aggregates for concrete, 2013.
- [64] NF-P-18-598, Granulats équivalent de sable, Edition Afnor,1991.
- [65] NF.P-18-560, Granulats Analyse granulométrique par tamisage, (1990).
- [66] NF-P-18-555, Granulats - mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables, Edition Afnor., (1990).
- [67] NFT 51-063, mesure de la masse volumique par pycnomètre.
- [68] NF P 18 573, Essai Los Angeles, 1990.
- [69] NF P 18-574, fragmentation dynamique, 1990.
- [70] NF.P.18-451, Bétons essai d'affaissement, (1981).
- [71] NF EN 12350-6, Essai pour béton frais partie 6: Masse volumique, 1999.
- [72] NF EN 12390-3, Part 3: Compressive strength of test specimens, 2003.
- [73] NF-EN-2390-5, Essai pour béton durci Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes, (2001).

- [74] ASTM-C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression1.
- [75] R. TC, Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures—part 1: introduction; part 2: stress–strain relation: and part 3: compressive strength for service and accident conditions, *Mater Struct* 28(181) (1995) 410-414.
- [76] Z. Xing, Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, Université de Cergy Pontoise, 2011.
- [77] A. Menou, Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température.: Approche multi échelles de l'endommagement thermique, Pau, 2004.
- [78] B. Chen, J. Liu, Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and concrete research* 34(6) (2004) 1065-1069.
- [79] J. Xiao, H. Falkner, On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire safety journal* 41(2) (2006) 115-121.