

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

MANAA Rachida

CHETIBI Amina

**Thème : ETUDE DE L'INSTABILITÉ THERMIQUE
D'UN BÉTON FIBRÉ**

Sous la direction de : Dr ; AIDOUUD Assia

Juillet 2019

Remerciement, Dédicace

Nous remercions Dieu de nous avoir donné le savoir la volonté surtout la patience pour réaliser ce modeste travail.

Qu'il soit loué et remercié en premier lieu

Nous tenons à remercier notre encadreur Dr « AIDOUD. A », pour ses précieux conseils et orientations, ainsi que son aide durant toute la période du travail.

Notre reconnaissance revient aussi aux membres du jury qui nous ont fait la faveur d'accepter d'évaluer ce travail.

Nous tenons également à remercier les responsables du laboratoire de Génie Civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 Guelma pour leurs aides et leurs générosités.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au Dr « Nigri. Gh ».

Aussi Nos remerciements toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Aussi qu'à ma chère fille, mes sœurs et mes frères. Tous mes amis et collègues.

MANAA. Rachida

Je dédie ce travail à l'esprit de ma chère mère qui était et reste mon inspiration et mon destin dans la vie. Ainsi qu'à mon père, à qui m'a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et me protéger, à mes sœurs et mon fiancé, ainsi qu'à toute ma famille pour leur soutien et leurs encouragements incessants.

CHETIBI. Amina

Résumé

La température élevée dans le béton entraine la destruction des hydrates de la pâte de ciment. Cette destruction signifie la faiblesse des matériaux par la détérioration de leurs propriétés mécaniques : dureté, résistance ... Une température élevée génère également une pression de fluide élevée, pouvant endommager ce dernier.

Le but de ce travail est d'étudier le comportement du béton fibré à haute performance met à haute température, nous avons utilisé des fibres de polypropylène et étudié leur influence sur ce comportement.

Cette étude comprend un béton à haute performance et trois bétons fibrés, chacun contient un ratio spécifique de fibres polypropylène (0,12%, 0,18% et 0,24%). Par conséquent, des éprouvettes (15x15x15) cm³ ont été soumises à la température (250 ° C), avec une vitesse de 2°C/min suivi d'un palier d'une heure à la température cible puis refroidissement jusqu'à la température ambiante.

Les résultats ont montré que le béton à base de fibres de polypropylène présentait un comportement plus performant lorsqu'il était exposé à la température étudiée. Surtout ces propriétés mécaniques qui étaient améliorés de 50% en générale.

Mots-clés :

BHP, BFHP, fibres de polypropylène, haute température, résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité dynamique.

Abstract

High temperature in concrete leads to the destruction of hydrates that form a cement paste. This destruction means the weakness of materials through the deterioration of their mechanical properties: hardness, resistance ... High temperature also generates high fluid pressure, which can lead to damage to the latter.

The purpose of this work is to study the behavior of reinforced concrete with high performance fibers at high temperatures. We have used polypropylene fibers and studied their impact on this behavior.

This study includes high performance concrete and three concrete fibers, each containing a specific percentage of polypropylene fibers (0.12%, 0.18% and 0.24%). Therefore, samples (15x15 x 15 cm³) were subjected to temperature (250 ° C) at 2 ° C / min followed by 1 hour at the target temperature and then cooling to ambient temperature.

The results showed that the concrete made of polypropylene fiber performed better when exposed to the temperature studied. Especially the mechanical properties that have been improved by 50% in general.

Keywords:

HPC, HPFC, polypropylene fiber, high temperature, pressure strength, tensile strength, dynamic coefficient of elasticity.

ملخص

ارتفاع درجة الحرارة في الخرسانة يؤدي إلى تدمير الهيدراتات التي تشكل عجينة الاسمنت. هذا التدمير يعني ضعف المواد من خلال تدهور خصائصها الميكانيكية: الصلابة، المقاومة... ارتفاع درجة الحرارة أيضا يولد ضغط السوائل العالي، والتي يمكن أن تؤدي إلى الأضرار التي قد تلحق بهذه الأخيرة.

الغرض من هذا العمل هو دراسة سلوك الخرسانة المسلحة بالألياف عالية الأداء في درجات حرارة عالية، وقد استخدمنا ألياف البولي بروبيلين ودراسة مدى تأثيرها على هذا السلوك.

تتضمن هذه الدراسة خرسانة عالية الأداء وثلاثة خرسانة من الألياف تحتوي كل منها على نسبة محددة من ألياف البولي بروبيلين (0.12 % و 0.18 % و 0.24 %). ولهذا تم اخضاع عينات ذات (15 x 15 x 15 سم) إلى درجة الحرارة (250 درجة مئوية)، بسرعة 2 درجة مئوية / دقيقة متبوعة بساعة واحدة عند درجة الحرارة المستهدفة ثم التبريد إلى درجة الحرارة المحيطة. أظهرت النتائج أن الخرسانة المصنوعة من الألياف البولي بروبيلين أداء أفضل عند التعرض لدرجة الحرارة المدروسة. خاصة الخواص الميكانيكية التي تم تحسينها بنسبة 50 % بشكل عام.

أظهرت النتائج أن الخرسانة المصنوعة من الألياف البولي بروبيلين أداء أفضل عند التعرض لدرجة الحرارة المدروسة. خاصة الخواص الميكانيكية التي تم تحسينها بنسبة 50 % بشكل عام.

تتضمن هذه الدراسة خرسانة عالية الأداء وثلاثة خرسانة من الألياف تحتوي كل منها على نسبة محددة من ألياف البولي بروبيلين (0.12 % و 0.18 % و 0.24 %). ولهذا تم اخضاع عينات ذات (15 x 15 x 15 سم) إلى درجة الحرارة (250 درجة مئوية)، بسرعة 2 درجة مئوية / دقيقة متبوعة بساعة واحدة عند درجة الحرارة المستهدفة ثم التبريد إلى درجة الحرارة المحيطة.

الكلمات المفتاحية:

خرسانة عالية الأداء، خرسانة ذات ألياف عالية الأداء، ألياف البولي بروبيلين، الحرارة العالية، قوة الضغط، قوة الشد، معامل ديناميكي للمرونة.

SOMMAIRE

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Sommaire	iv
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xii
Principales notations et abréviations	xv
Introduction générale	xvi

Chapitre I : Recherche Bibliographique

I. 1. Introduction	1
I. 2. Les BHPs et les BFHPs	1
I. 2. 1. Les Bétons à Haute Performance (BHP)	1
I. 2. 1. 1. Introduction	1
I. 2. 1. 2. Les constituants du BHP	2
I. 2. 1. 3. La Formulation des BHP	2
I. 2. 1. 4. Propriétés des Bétons à Hautes Performances	3
A. Comportement mécanique des BHPs	3
➤ Comportement en compression	3
➤ Comportement en traction	5

➤ Rigidité	5
B. Durabilité	5
C. Résistance au feu	6
I. 2. 1. 5. Domaines d'applications	7
I. 2. 2. Les Bétons Fibrés à Haute Performance (BFHP)	8
I. 2. 2. 1. Introduction	8
I. 2. 2. 2. Constituants	9
I. 2. 2. 3. La Formulation des BFHP	12
I. 2. 2. 4. Propriétés des Bétons Fibres à Hautes Performances	12
A. Propriétés mécaniques	12
➤ Résistance à la compression	12
➤ Résistance à la traction	13
➤ Durabilité	14
B. Quelques propriétés générales du BFHP	14
➤ Hydratation	14
➤ Faible porosité	14
I. 2. 2. 5. Domaines d'applications des BFHP	15
I. 3. Instabilité thermique du béton	16
I. 3. 1. Différentes formes d'endommagement thermique	16
I. 3. 2. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	17
I. 3. 3. Paramètres favorisant l'instabilité thermique	18
I. 4. Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé	19
I. 4. 1. Matrice cimentaire	20

I. 4. 2 Granulats	21
I. 4. 3. Propriétés thermiques	21
I. 4. 3. 1. Déformation thermo hydrique libre du béton	21
I. 4. 4. Propriétés mécaniques des bétons chauffés	22
I. 4. 4. 1. Résistance à la compression	22
I. 4. 4. 2. Résistance à la traction	25
I. 4. 4. 3. Module d'élasticité	28
I. 4. 5. Perte de masse	30
I. 5. Conclusion	33

Chapitre II :

Etude Expérimentale

II. 1. Introduction	34
II. 2. Matériaux utilisés	34
II. 3. Caractérisation des constituants :	34
II. 3. 1. Caractérisation des graviers	34
II. 3. 1. 1. Analyse granulométrique	35
II. 3. 1. 2. Masse volumique	37
II. 3. 1. 2. 1. La masse volumique apparente (ρ_{App})	38
II. 3. 1. 2. 2. La masse volumique absolue (ρ_{abs})	39
II. 3. 1. 3. Propreté	41
II. 3. 2. Caractérisation des sables	42
II. 3. 2. 1. Analyses granulométrique	43
II. 3. 2. 2. Equivalent de sable	45
II. 3. 2. 3. La masse volumique du sable	48

II. 3. 2. 3. 1. Masse volumique apparent	48
II. 3. 2. 3. 2. Masse volumique absolue	49
II. 3. 2. 4. L'humidité	50
II. 3. 3. Caractéristiques du ciment utilisé	51
II. 3. 4. L'eau de gâchage	52
II. 3. 5. Adjuvant : super-plastifiant Le MEDAPLAST- SP 40	53
II. 3. 6. L'ajout en fumée de silice : 'Le MEDAPLAST HP'	53
II. 3. 7. Fibre de polypropylène	54
II. 4. Fabrication des bétons et conditionnement	56
II. 4. 1. Compositions des bétons	56
II. 4. 2. Préparation des moules	59
III. 4. 3. Gâchage du béton	60
II. 5. Essais sur béton à l'état frais	61
II. 5. 1. Affaissement au cône d'Abrams	61
II. 5. 2. Confection des éprouvettes	62
II. 5. 3. Conservation des éprouvettes	63
II. 6. Traitement thermique et programme des essais	63
II. 6. 1. Cycle de chauffage – refroidissement	63
II. 6. 2. Equipment utilisé	64
II. 6. 3. Programme des essais	64
II. 6. 3.1. Essais réalisés à l'âge de 28 jours (20°C)	65
II. 6. 3. 1. 1. Suivi du poids :	65
II. 6. 3. 1. 2. Contrôle non destructif par ultrasons	65
II. 6. 3. 1. 3. Résistance à la compression (essai d'écrasement)	66
II.6. 3. 1. 4. Résistance à la traction par fendage	67
II. 7. Conclusion	69

Chapitre III :

Résultats et Interprétations

III. 1. Introduction	70
III. 2. Influence de la température sur les bétons fibrés	70
III. 2. 1. L'effet de l'ajout des fibres	70
III. 2. 1. 1. La masse	70
III. 2. 1. 2. La vitesse	72
III. 2. 1. 3. Le module d'élasticité dynamique	72
III. 2. 1. 4. La résistance à la compression	73
III. 2. 1. 5. La résistance à la traction	74
III. 2. 2. L'effet de la température	76
III. 2. 2. 1. La masse	78
III. 2. 2. 2. La vitesse	79
III. 2. 2. 3. Le module d'élasticité	81
III. 2. 2. 4. La résistance à la compression	82
III. 2. 2. 5. La résistance à la traction	84
III. 3. Effet de la température et des fibres sur les relations entre les propriétés des bétons	85
III. 3. 1. Les relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction	86
III. 3. 2. Les relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité	87
III. 4. Conclusion	88
Conclusion générale	90
Références bibliographiques	92

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Composition et propriétés de trois bétons différents, béton ordinaire, béton à hautes performances	9
---	---

Chapitre II

Tableau II. 1 : Analyse granulométrique des graviers	36
Tableau II. 2 : La masse volumique apparente (ρ_{App}) des graviers [(5/15), (15/25)]	39
Tableau II. 3 : La masse volumique absolue (ρ_{Abs}) des graviers [(5/15), (15/25)]	40
Tableau II. 4 : Résultats des essais de propreté	42
Tableau II. 5 : Analyse granulométrique des sables	43
Tableau II. 6 : Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable E_{SV} et E_{SP} .	46
Tableau II. 7 : Résultats d'essais d'équivalent des sables	47
Tableau II. 8 : La masse volumique apparente (ρ_{App}) des sables	49
Tableau II. 9 : La masse volumique absolue (ρ_{Abs}) des sables	50
Tableau II. 10 : Résultats des essais d'humidité	51
Tableau II. 11 : Caractérisation de ciment	52
Tableau II. 12 : Composition du (BHP) et des (BFHP) étudiés	59
Tableau II. 13 : L'affaissement des bétons étudiés	62
Tableau II. 14 : Caractérisation des bétons étudiés à 28 jours et à 20°C	68

Chapitre III

Tableau III. 1 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur la masse (M_{20})	70
Tableau III.2 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur la vitesse ultrasonique (V_{20})	72
Tableau III.3 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur le module d'élasticité dynamique (E_{dyn20})	72
Tableau III.4 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur la résistance à la compression (fc_{20})	73
Tableau III.5 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur la résistance à la traction (ft_{20})	74
Tableau III.6 : Effet de la température sur des propriétés résiduelles des différents bétons	77
Tableau III.7 : rapport des différentes propriétés résiduelles en fonction de la température	77

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1.	Béton ordinaire (fissures d'adhérence et fissures dans le mortier)	4
Figure I.2.	Béton à hautes performances (les granulats sont également fissurés)	4
Figure I.3.	Diagramme contraintes-déformation.	5
Figure I.4.	Diagramme de la résistance la compression des bétons haute résistance	6
Figure I.5.	Photos des ouvrages en BHP	8
Figure I.6.	Photo des fibres polypropylène	11
Figure I.7.	Evolution des résistances résiduelles relatives à la compression en fonction du cycle de chauffage – refroidissement	13
Figure I.8.	Evolution des résistances résiduelles relatives à la traction en fonction du cycle de chauffage – refroidissement	14
Figure I.9.	Photos des ouvrages en BFHP	16
Figure I.10.	Illustration du mécanisme d'éclatement	18
Figure I.11.	Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température	22
Figure I.12.	Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid)	23
Figure I.13.	Courbes de la variation de la résistance à la compression	24
Figure I.14.	Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène	25
Figure I.15.	Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage	26
Figure I.16.	Evolution de la résistance résiduelle à la traction par flexion de bétons avec et sans fibres de polypropylène	27
Figure I.17.	Evolution de modules d'élasticité apparents déterminé "à chaud" en fonction de différentes températures (a), évolution du module d'élasticité apparent obtenu "à chaud" et "résiduelles" sur le béton de fibres de polypropylène	28
Figure I.18.	Module d'élasticité statique résiduel en fonction de température	29
Figure I.19.	Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température	30
Figure I.20.	Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes	31

compositions de bétons

Figure I.21. Comparaison de la perte de masse et de la teneur en eau initiale des bétons soumis à 600°C	32
Figure I.22. Evolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage	32

Chapitre II

Figure II.1. Les fractions des graviers utilisés	35
Figure II.2. Photo de la tamiseuse utilisée	36
Figure II.3. Courbes granulométriques des graviers [5/15, 15/25]	37
Figure II.4. Essais de la masse volumique apparente des graviers	39
Figure II.5. Essais de la masse volumique absolue des graviers	40
Figure II.6. Photo des trois sables utilisés	42
Figure II.7. Courbes analyse granulométrique des sables [0/4, 0,1 et 0/5]	44
Figure II.8. Essai de l'équivalent de sable	47
Figure II.9. Essais de la masse volumique apparent des sables utilisés	48
Figure II.10. Essai de la masse volumique absolue des sables utilisés	49
Figure II.11. Sac de ciment utilisé « GICA »	52
Figure II.12. Photo du superplastifiant utilisé	53
Figure II.13. Photo de la fumée de silice utilisée	54
Figure II.14. Photo des fibres de polypropylène utilisés	55
Figure II.15. Secteurs des bétons testés	58
Figure II.16. Photo des moules cubiques utilisés	60
Figure II.17. Photo du malaxeur de béton utilisée	60
Figure II.18. Mesure de l'affaissement avec le cône d'Abrams	62
Figure II.19. Photo du bassin de la conservation des éprouvettes	63
Figure II.20. Courbe de chargement thermique	64
Figure II.21. Photo du four utilisé	64
Figure II.22. Essai non destructif ultrasonique (transmission directe)	65
Figure II.23. Photo de la presse utilisée du (LGCH)	66

Chapitre III

Figure III.1. Evolution de la masse (M_{20}) en fonction des fibres polypropylène	71
Figure III.2. Evolution de la vitesse ultrasonique (V_{20}) en fonction des fibres	72
Figure III.3. Evolution du module d'élasticité dynamique(E_{dyn20}) en fonction des fibres	73
Figure III.4. Evolution de la résistance à la compression (f_{c20}) en fonction des fibres	74
Figure III.5. Evolution de la résistance à la traction (f_{t20}) en fonction des fibres	75
Figure III.6. Rupture des éprouvettes à la compression des différent béton à 20°C	76
Figure III.7. Rupture des éprouvettes à la traction par fendage des différent béton à 20°C	76
Figure III.8. Perte de la masse à 250°C	78
Figure III.9. Rapport de la masse à 250°C	78
Figure III.10. Perte de la vitesse ultrasonique à 250°C	79
Figure III.11. Rapport de la vitesse ultrasonique à 250°C	80
Figure III.12. Perte du module d'élasticité dynamique à 250°C	81
Figure III.13. Rapport du module d'élasticité dynamique à 250°C	81
Figure III.14. Perte de la résistance à la compression à 250°C	82
Figure III.15. Rapport de la résistance à la compression à 250°C	83
Figure III.16. Rupture des éprouvettes par compression à 250°C	84
Figure III.17. Perte de la résistance à la traction à 250°C	84
Figure III.18. Rapport de la résistance à la traction à 250°C	85
Figure III.19. Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction à 20°C	86
Figure III.20. Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction à 250°C	86
Figure III.21. Relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique à 20°C	87
Figure III.22. Relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique à 250°C	88

Principales notations et abréviations

Notations

E_d -Module d'élasticité dynamique

f_c -Résistance mécanique caractéristique à la compression

f_t -Résistance mécanique caractéristique en traction

V -Vitesse ultrasonique

M -Masse

M_f - Module de finesse des sables

ρ_{abs} -Masse volumique absolue

ρ_{app} -Masse volumique apparente

ν - coefficient de poisson

Nomenclature et abreviations

BO - Béton Ordinaire

BHP - Béton à Hautes Performances

BFHP- Béton fibré à Hautes Performances

BFH1- 1^{ème} Composition du bétons fibrés (0,6 Kg/m³)

BFH2- 2^{ème} Composition du bétons fibrés (0,9 Kg/m³)

BFH3- 3^{ème} Composition du bétons fibrés (1,2 Kg/m³)

FPP- fibre de polypropylène

M- La masse

V- La vitesse

E_d - Module d'élasticité dynamique

T -Température

C - Ciment

SC - Granulats silico-calcaires

E/C - Rapport massique eau sur ciment

E/L - Rapport massique eau sur liant

C₂S - Silicate dicalcique

CaSO₄ Calcaire silicate qu'oxyde

CaCO₃ – Calcaire (carbonate de calcium)

CO₂ - Dioxyde de carbone

CSH - Silicate de calcium hydraté

FS - Fumée de silice

ESV -Equivalent de sable visuel

ESP - Equivalent de sable par piston

Introduction

Générale

Introduction générale

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation et de durabilité font du béton l'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiment et ouvrages de génie civil. L'utilisation des bétons à haute performance (BHP), matériau récent, a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons. Ces bétons sont différenciés des bétons ordinaires par leur faible porosité et leur forte densification ce qui leur offre de bonnes caractéristiques mécaniques et une meilleure durabilité.

Malgré le bon comportement des bétons ordinaires et des BHP à la température ambiante, ces bétons peuvent présenter une instabilité thermique sous diverses formes et montrent de forts endommagements de leurs structures lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées comme lors d'un incendie ou un accident nucléaire.

Soumis à un incendie, le béton se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant la durée de l'échauffement. Ce processus de dégradation conduit à la dégradation des propriétés physiques, des propriétés de transfert et des performances mécaniques du béton du fait de la modification de sa microstructure. Ces endommagements peuvent affecter la stabilité des ouvrages et compromettre l'évacuation des personnes et la sécurité des secours. De plus, une réparation et une rénovation coûteuse de la structure endommagée par un incendie doivent souvent être effectuées.

Plusieurs études de recherche ont été réalisées ces dernières années sur l'analyse, la compréhension et la modélisation de l'endommagement thermique du béton. Ces travaux de recherche ont permis d'améliorer la compréhension de l'évolution des propriétés physico-chimiques de la pâte de ciment. Cependant, moins d'études se sont intéressées à l'étude de l'influence de la nature des fibres sur le comportement du béton porté à haute température.

Le but de ce travail est avant tout d'améliorer la compréhension du comportement du béton à haute performance comme premier objectif. Le comportement du béton qui contient des fibres de polypropylène à haute température. En fait, cette mémoire contribue empiriquement, d'autres recherches déjà menées.

Le deuxième objectif de cette étude consiste, l'effet de la haute température sur les propriétés physiques et mécaniques de différents bétons à différentes quantités de fibres de polypropylène (600, 900 et 1200 g/m³). Et comparer les comportements des différents bétons confectionnés avec un (BHP) comme béton témoin.

Le manuscrit est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une analyse bibliographique des bétons (BHP, BFHP), définitions et propriétés physico-mécaniques de ces bétons. Ainsi qu'à la présentation du phénomène d'éclatement, sans oublier l'explication l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons chauffés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les éléments constitutifs de nos bétons, les formulations retenues, la méthode de confection et le mode de conservation des bétons testés au cours de cette étude. Nous présentons également les différents matériels utilisés pour caractériser les propriétés étudiés avant et après sollicitation thermique à 250°C.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés et leurs interprétations, en comparant ces derniers aux règles normatives et aux résultats de littérature.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des principaux résultats obtenus sur l'influence de la température sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons confectionnés par fibres polypropylène.

Chapitre I :

Recherche

Bibliographique

I. 1. Introduction :

Le béton est un matériau très hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométriques des granulats mais aussi de la diversité des produits d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative). De manière générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice (pâte du ciment durcie) et les granulats (gravillons et sable). Ainsi que la structure de l'interface pâte/granat (appelé auréole de transition). Cette zone d'interface est le point fort des BHP (Béton à Haute Performance) qui se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice est pratiquement égale à la résistance des granulats et des fois plus [Lakhal. R, 2011].

Même si la résistance mécanique du BHP est nettement supérieure à celle du béton ordinaire, il y a d'autres paramètres sur lesquels il convient d'attirer l'attention et qui présentent plus d'avantages pour ces matériaux tel que la durabilité, la résistance au feu [Lakhal. R, 2011].

Le béton avec fibre BFHP (béton fibré à haute performance) est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus [Yagoub. M, 2009].

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement, et la teneur en volume de fibre [Yagoub. M, 2009].

I. 2. Les BHPs et les BFHPs :

I. 2. 1. Les Bétons à Haute Performance (BHP) :

I. 2. 1. 1. Introduction :

Les Bétons à Haute Performance ont démontré qu'ils permettaient d'offrir un potentiel de progrès extraordinaire pour la construction de bâtiments et de structures de génie civil. Ils sont désormais valorisés par d'autres performances que la simple résistance mécanique, telles que la rhéologie à l'état frais, la durabilité à long terme et l'esthétisme des structures.

Ce concept de valorisation des performances du béton autre que la résistance mécanique est à la base du développement de tous les bétons modernes (BAP, BFHP, etc.).

Les gains de résistance ne sont pas les 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 [Bourema. M, 2015].

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité. Ces performances sont dues à la réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de Superplastifiants tout en conservant une maniabilité adéquate et l'optimisation de la répartition granulométrique des composants tout en utilisant les ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité [Bourema. M, 2015].

I. 2. 1. 2. Les constituants du BHP :

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes [Arab. A Rafai. H, 2017] :

- **Ciments** : conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- **Granulats** : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XPP 18-545 (article 10 : « granulats pour bétons hydrauliques »).
- **Additions** : conformes aux diverses normes en vigueur – cendres, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- **Adjuvants** : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

I. 2. 1. 3. La Formulation des BHP :

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes [Arab. A - Rafai. H, 2017] :

a. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- Détermination des proportions des constituants ;
- Optimisation du squelette granulaire.

b. Optimisation du mélange en laboratoire :

- Validation de la compatibilité ciment /adjuvant ;
- Ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant ;
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

c. Validation de la formule sur chantier :

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- Vérification des caractéristiques du béton.

I. 2. 1. 4. Propriétés des Bétons à Hautes Performances :

Les diverses propriétés des BHPs découlent de leur faible porosité, gage de durabilité.

A. Comportement mécanique des BHPs :**➤ Comportement en compression :**

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulats se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (figure I.1) [De schutter. G, 2007].

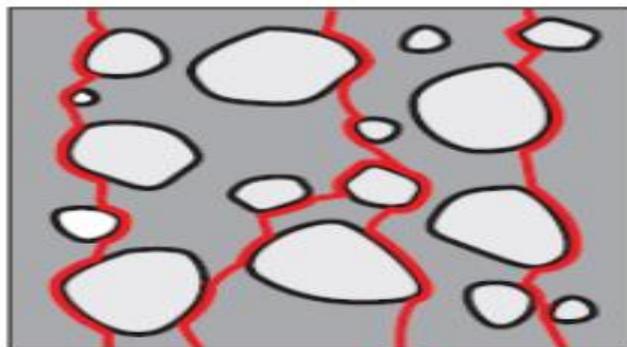


Figure I.1. Béton ordinaire (fissures d'adhérence et fissures dans le mortier),
[De schutter. G, 2007]

Par contre dans le béton à hautes performances l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats (figure I.2) [De schutter. G, 2007].

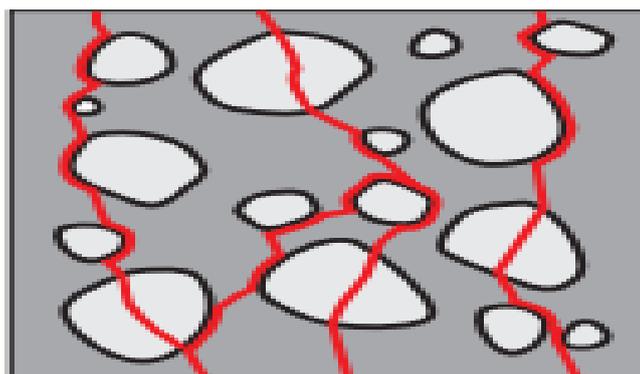


Figure I.2. Béton à hautes performances (les granulats sont également fissurés),
[De schutter. G, 2007]

Sur le diagramme contrainte-déformation (figure I.3), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton ordinaire. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle [De schutter. G, 2007].

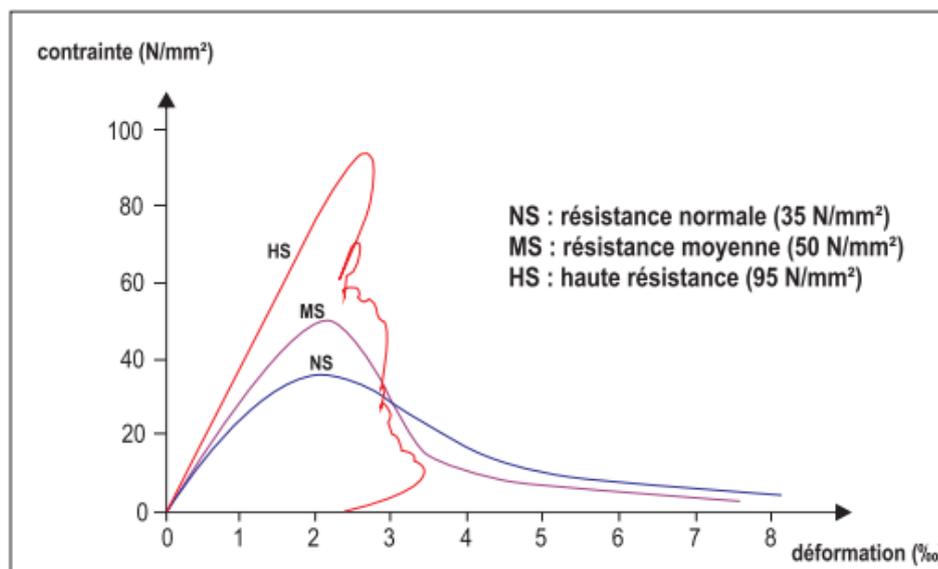


Figure I.3. Diagramme contraintes-déformation, [De schutter. G, 2007]

➤ **Comportement en traction :**

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1 :2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel. Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, signalé ci-dessus. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro [De schutter. G, 2007].

➤ **Rigidité :**

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est toujours lié à la résistance à la compression [De schutter. G, 2007].

B. Durabilité :

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. Ce processus se produit que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...etc.).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Une allusion au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène). La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction. Dans ce cadre, il faut signaler que Les laitiers offrent une bonne résistance aux agressions chimiques. Les performances des liants contenant du laitier sont, à moyen et à long terme, égales à celles des ciments portland [De schutter. G, 2007].

C. Résistance au feu :

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton ordinaire, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C. Les renseignements à propos du facteur de réduction à appliquer figurent dans la norme NBN EN1992-1-2 (figure I.4). En raison des pressions de vapeur accumulées, il convient également d'examiner les risques potentiels d'éclatement du béton. En ce qui concerne le béton des classes de résistance C 55/67 à C 80/95, les règles inhérentes au béton conventionnel suffisent pour éviter les éclatements, pour autant que la teneur en fumées de silice soit inférieure à 6 % de la masse de ciment. En cas de teneurs supérieures en fumées de silice et en cas de classe de résistance C 90/105, il sera nécessaire de prendre des mesures particulières, telles que le mélange d'au moins 2 kg/m³ de fibres de polypropylène. En cas de températures élevées, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement [De schutter. G, 2007].

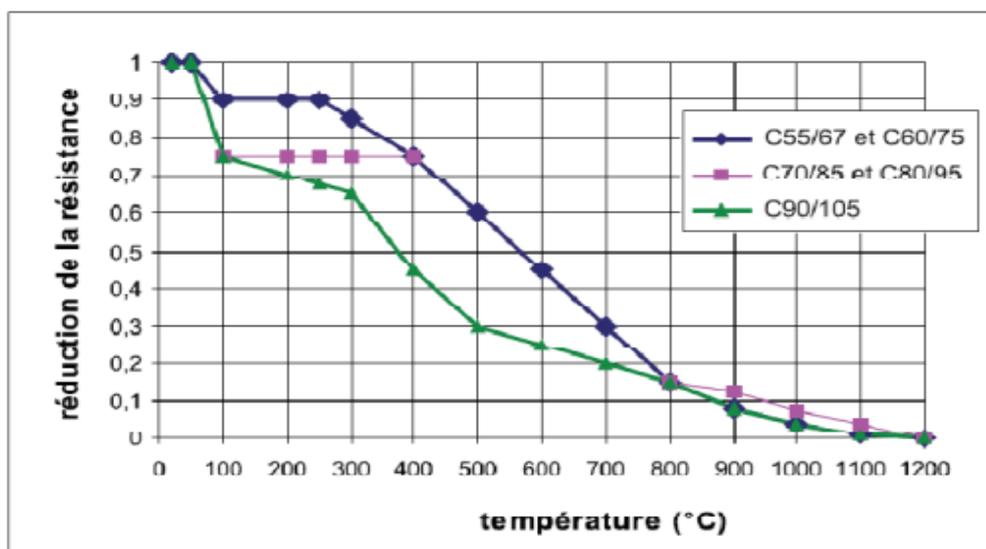


Figure I.4. Diagramme de la résistance la compression des bétons haute résistance selon l'EC2 Feu, [De schutter. G, 2007]

I. 2. 1. 5. Domaines d'applications :

Les BHP sont utilisés dans les constructions de toutes tailles quand on cherche à obtenir des résistances mécaniques très élevées, des structures compactes ou des diminutions de section [Bourema. M, 2015].

Ils permettent aussi de répondre à des exigences d'intégration dans l'environnement, de prendre en compte des contraintes extrêmes sur un plan climatique ou d'apporter une protection à des agressions chimiques [Bourema. M, 2015].

Les BHP sont utilisés notamment pour la réalisation de :

- ✓ Bâtiments de bureaux ;
- ✓ Parkings ;
- ✓ Tunnels et travaux souterrains ;
- ✓ Ouvrages d'art et de génie civil, ponts routiers ;
- ✓ Plates-formes d'exploitation et de stockage ;
- ✓ Préfabrication ;
- ✓ Ouvrage en site maritime ;
- ✓ Ouvrages de l'industrie chimique ou du nucléaire, bâtiment agricoles...



Figure I.5. Photos des ouvrages en BHP, [CIM béton, 2013]

I. 2. 2. Les Bétons Fibrés à Haute Performance (BFHP) :

I. 2. 2. 1. Introduction :

Les présentes recommandations sur les Bétons Fibres à Ultra Hautes Performances (BFHP) ont pour but la définition d'un référentiel destiné à permettre l'emploi de ces nouveaux matériaux dans les domaines du génie civil [L'AFGC, 2002].

Par bétons fibres à ultra-hautes performances, on entend des matériaux à matrice cimentaire, de résistance caractéristique à la compression supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa [L'AFGC, 2002].

Les BFHP se distinguent des bétons à hautes et très hautes performances :

- ✓ Par leur résistance en compression, systématiquement supérieure à 150 MPa ;
- ✓ Par l'emploi systématique de fibres, qui assurent la non-fragilité du matériau et modifient le recours classique aux armatures actives ou passives ;
- ✓ Par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

I. 2. 2. 2. Constituants :

La composition des BFHP repose au minimum sur cinq constituants : ciment, fumée de silice, fibres, eau et super plastifiant. Le rapport eau sur ciment (E/C) varie entre 0,15 et 0,25 avec des dosages en fumée de silice allant jusqu'à 30% [Arab. A - Rafai. H, 2017].

Les différents constituants (composants granulaires et adjuvants) qui forment généralement les BFHP sont :

- Le ciment (Quantité de ciment comprise entre 700 et 1000 kg/m³) ;
- Le sable fin (0,063 mm < diamètre max < 2 mm), Granulats de taille réduite et de résistance mécanique élevée ;
- La fumée de silice (10 à 30 % du poids de ciment C) ;
- Le quartz broyé (diamètre max < 20 µm) ;
- Les fibres métalliques et non métalliques (synthétiques, carbonées, ...etc.) pouvant être courtes ou bien longues de dimensions et formes différentes selon les propriétés recherchées ;
- Le superplastifiant haut réducteur d'eau (le dosage varie de 0.5 à 3% du poids de ciment) ;
- L'eau (rapport E/Liant inférieur à 0.25).

Les compositions typiques d'un béton ordinaire, d'un béton à hautes performances BHP et d'un Béton ultra hautes performances fibré (BFUHP) sont données dans le (tableau I.1).

Le BFUHP est un béton à granulométrie fine, avec une sélection optimisée de granulats, un haut taux de ciment et de fines (principalement de la fumée de silice), et un rapport eau/liant bas. De plus, la quantité de superfluidifiant utilisée dans le BFUHP est plus élevée que celle utilisée dans le béton normal ou à haute résistance [Arab. A - Rafai. H, 2017].

Tableau I.1 : Composition et propriétés de trois bétons différents, béton ordinaire, béton à hautes performances, [Arab. A - Rafai. H, 2017]

	Composants	BO [Kg/m ³]	BHP [15] [Kg/m ³]	BFUHP [16-17] [Kg/m ³]
Matrice	Ciment	≤ 400	410	700-1000
	Gravier	≈ 1000	920	0-200
	Sable	≈ 700	620	1000-2000

	Fume de silice	/	/	200-300
	Superplastifiant	/	5	10-40
	Eau	≥ 200	100-150	110-00
	Rapport E/C	≥ 0.35	0.28-0.38	≤ 0.24
	Rapport E/L		≤ 0.38	≤ 0.22
	Fibre [Kg/m3]	/	/	≥ 150
Propriétés	Densité [Kg/m3]	2000-2800	2000-2800	≥ 2500
	Résistance à la compression [MPa]	≤ 60	60-100	≥ 150
	Résistance à la traction [MPa]	≤ 3	≤ 5	≥ 8
	Module d'élasticité initial [GPa]	≈ 30	≤ 45	50-70
	Energie de rupture [J/m2]	30 - 200	< 150	< 90 sans fibres >10000 avec fibres

a. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée, imputrescibilité et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa [Yagoub. M, 2009].

Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques [Yagoub. M, 2009].



Figure I.6. Photo des fibres polypropylène (FPP), [Yagoub. M, 2009].

b. Propriétés des fibres de polypropylène

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du béton [Yagoub. M, 2009].

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 °C, mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton [Yagoub. M, 2009].

c. Les bétons de fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se faisant facilement et ne nécessite pas de précaution particulière lors de malaxage [Yagoub. M, 2009].

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du béton et sa cohésion. Ces propriétés sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (bordures, tuyaux) en même temps qu'elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou arêtes des pièces moulées ou des dallages [Yagoub. M, 2009].

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait » ainsi que leur résistance aux chocs.

Les dosages couramment pratiques sont de l'ordre de 0.05 à 0.2 en volume (0.5 à 2 Kg de fibres par m³ de béton) [Yagoub. M, 2009].

I. 2. 2. 3. La Formulation des BFHP :

✓ Principes de formulation des BFHP :

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres [CIM Béton, 2013] :

- Une teneur en eau extrêmement faible, grâce à l'utilisation optimisée de super plastifiants qui déflocculent les grains de ciment (rapport E/C de 0.15 à 0.25) ;
- Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (classiquement quatre à cinq qui incluent ciment, ultrafines, fillers et sable). La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm, les granulats faisant l'objet d'une sélection particulière).

L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides.

I. 2. 2. 4. Propriétés des Bétons Fibres à Hautes Performances :

A. Propriétés mécaniques :

➤ Résistance à la compression :

Les performances mécaniques résiduelles des deux bétons sont comparables. En ce qui concerne la résistance à la compression relative (Figure I.7), nous pouvons distinguer globalement deux zones de comportement du béton. Dans la première zone qui varie de la température ambiante à 300°C, nous constatons une baisse ou une faible augmentation de résistance résiduelle. Dans la seconde zone, de 300°C à 900°C, nous remarquons une baisse progressive de la résistance résiduelle à la compression pour les deux types de béton. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des études de plusieurs auteurs : [Hager. I, 2004], [Pliya. P, 2010]. L'augmentation de la résistance résiduelle à la compression entre la température ambiante et 300°C peut être due, premièrement, à la réhydratation des CSH lors de la migration et la condensation de l'eau vers les zones plus froides de l'éprouvette et, deuxièmement, à une formation de liaisons de siloxane (Si-O-Si), qui contribuent au retrait de la pâte et à l'augmentation de la résistance [Nonna. Y, 2015].

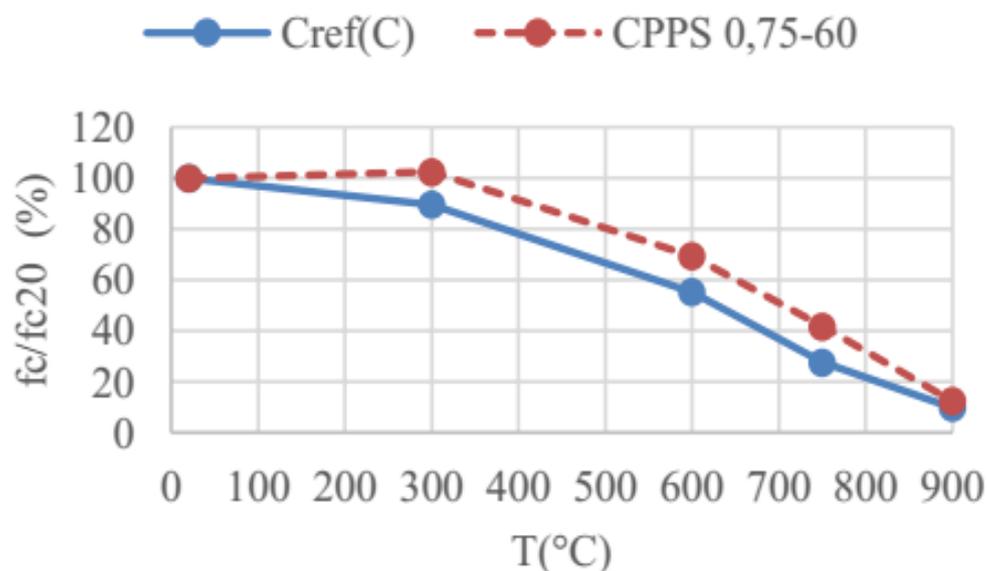


Figure I.7. Evolution des résistances résiduelles relatives à la compression en fonction du cycle de chauffage – refroidissement, [Nonna. Y, 2015].

➤ **Résistance à la traction :**

La résistance résiduelle à la traction des bétons avec ou sans fibres diminue progressivement avec la montée en température (Figure I.8). De 750°C à 900°C, la perte de résistance résiduelle à la traction est remarquable. Par ailleurs, l'intersection des courbes a lieu à 900°C. Nous supposons que cela est dû à la perte de propriétés mécaniques des FS. Les mécanismes de rupture des éprouvettes pendant l'essai de la traction sont différents à 300°C et 900°C. Au cours de l'essai sur les bétons CPPS 0.75-60 à 300°C, nous observons que le béton a un comportement ductile, tandis qu'à 900°C le béton est plutôt fragile. Cette perte de ductilité à 900°C peut être expliquée par l'oxydation ou la corrosion des FS à des températures élevées. [Ezziane. M, 2012] a remarqué le début de phénomène d'oxydation des FS à 500°C. Après 700°C, le phénomène de corrosion devient plus important. L'épaisseur des couches d'oxyde est alors d'environ 30 μm tandis qu'elle est d'environ 75 μm à 800°C. Il est intéressant de noter qu'à la température 900°C, l'amélioration des performances mécaniques résiduelles du béton CPPS 0.75-60 par rapport à celle des bétons Créf était quasiment nulle [Nonna. Y, 2015].

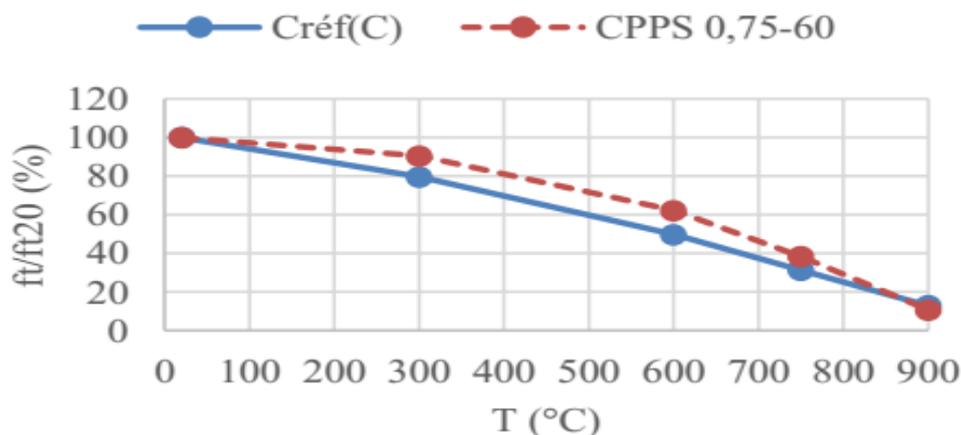


Figure I.8. Evolution des résistances résiduelles relatives à la traction en fonction du cycle de chauffage – refroidissement, [Nonna. Y,2015].

➤ **Durabilité :**

La durabilité du béton se définit principalement par une résistance adéquate aux contraintes appliquées ainsi que sa résistance à la pénétration des agents agressifs. Ainsi, les facteurs suivants sont d'une importance capitale dans l'analyse de la durabilité d'un béton [Charron et al, 2013]. D'après [Charette. N, 2017] :

- Propriétés mécaniques élevées ou adéquates ;
- Faible perméabilité ;
- Faible porosité.

B. Quelques propriétés générales du BFHP :

➤ **Hydratation :**

Le BFHP affiche une période dormante plus longue en raison d'une forte teneur en super plastifiant [Habel. K et al, 2006]. La réaction d'hydratation engendre un dégagement de chaleur 3 fois plus important pour le BFHP par rapport à un béton ordinaire causé par l'utilisation d'une grande quantité de ciment et de fumée de silice. De plus, à cause de sa forte teneur en ciment, le BFHP possède un degré de réaction faible de l'ordre de 30 % [Charette. N, 2017].

➤ **Faible porosité :**

La faible porosité du BFHP est due à l'utilisation d'une grande quantité de ciment et de l'utilisation de matériaux fins tels que la fumée de silice. À son tour, cette faible porosité et l'utilisation de fibres est directement responsable de la faible perméabilité dans le BFHP [Habel. K et al, 2006]. De plus, la faible porosité ainsi qu'un réseau adéquat de bulles d'air entrainées

permettent d'augmenter la résistance aux cycles de gel-dégel et ainsi de prévenir l'écaillage en surface [Habel. K, 2004], [Charron. J-P et al, 2013]. D'après [Charette. N, 2017].

I. 2. 2. 5. Domaines d'applications des BFHP

Les nombreuses qualités des BFHP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, dalles, passerelles piétonnes, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, canalisations, conteneurs, murs de soutènement, structures triangulées, voussoirs de tunnels ...) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée ...) ainsi que pour la création de pièces esthétiques. Elles offrent des applications innovantes, en particulier pour des structures très minces, perforées ou ajourées jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux [CIM Béton, 2013].

Les BFHP sont aussi utilisés pour la réparation ou la réhabilitation d'ouvrages (renforcement parasismique de piles de ponts, protection d'ouvrages soumis à l'érosion d'écoulement torrentiel, renforcement de poteaux, renforcement de tablier d'ouvrages d'art à poutres, renforcement structural de faible épaisseur...) [CIM Béton, 2013].

En règle générale les BFHP à base de fibres métalliques sont destinées à des applications structurelles, ceux à base de fibres organiques à des applications architectoniques [CIM Béton, 2013].

Les BFHP sont utilisés aussi bien par l'industrie du béton pour constituer des produits préfabriqués (résilles, coques, panneaux acoustiques, panneaux de couverture, panneaux de façade, parements de faible épaisseur, grilles décoratives, éléments architecturaux, corniches, escaliers, lames pare-soleil, résilles, mobiliers urbains, sculptures ...) que directement sur chantier pour diverses applications [CIM Béton, 2013].

Les multiples performances des BFHP permettent d'élargir les domaines d'utilisation des bétons en particulier pour la réalisation de structures ou d'éléments de structures [CIM Béton, 2013] :

- Soumis à de très fortes agressions chimiques ou mécaniques ou à des chocs importants ;
- Réalisés en site maritime (structures offshore ...) ;
- Nécessitant des gains de poids ;

- Dont la conception à base de béton traditionnel nécessiterait des ferrailages très denses ou des bétonnages complexes.



Figure I.9. Photos des ouvrages en BFHP [1], [2], [3], [4].

I. 3. Instabilité thermique du béton :

I. 3. 1. Différentes formes d'endommagement thermique :

D'après [Aidoud. A, 2018] Le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes [Arupfire, 2005], [Nguyen. V-T, 2013] :

- **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.
- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.

- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

I. 3. 2. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé :

D'après [Khalifa. P et al, 2000], [Consolazio. G-R et al, 1997], le phénomène de l'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique.

- **Le processus thermomécanique** : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée [Bazant. Z-P et al, 1997]. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent [Bazant. Z-P et al, 1997], [Khoury. G A, 1995], [Khoury. G-A, 1992], [Schneider. U et al, 1982], tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation [Diederichs. U et al, 1989]. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression [Nguyen. V-T, 2013]. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire [Khalifa. P et al, 2000], [Consolazio. G-R et al, 1997], [Nguyen. V-T, 2013]. D'après [Aidoud. A, 2018].

- **Le processus thermo-hydrique** : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. (La figure I.10) montre le mécanisme d'éclatement [Consolazio. G-R et al, 1997] lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores

du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique.

Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement [Nguyen. V-T, 2013]. D'après [Aidoud. A, 2018].

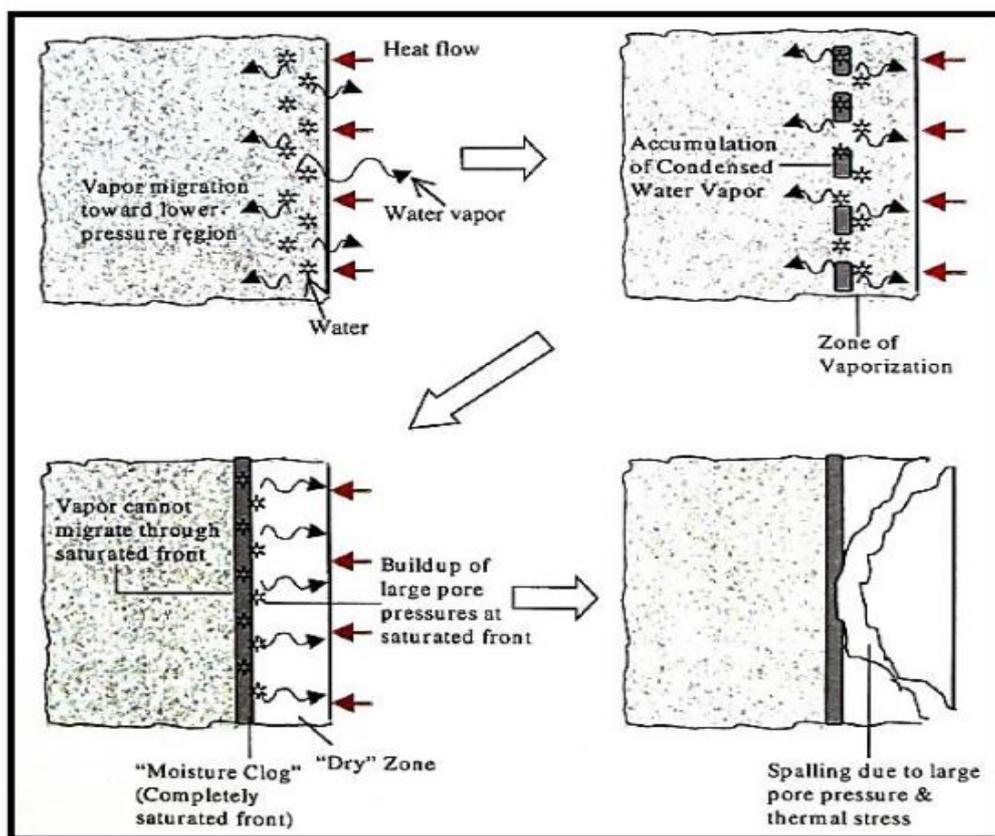


Figure I.10. Illustration du mécanisme d'éclatement, [Kanema. M, 2007] source [Aidoud. A, 2018]

I. 3. 3. Paramètres favorisant l'instabilité thermique :

Plusieurs paramètres et phénomènes peuvent influencer l'endommagement du béton à hautes températures :

- **Teneur en eau** : elle joue un rôle principal dans la formation de pression de vapeur. Des travaux de recherche de [Robert. F et al, 2008], [Hertz. K-D, 2003], montrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement. [Li. M et al 2004]. Ont montré, dans le cadre de travaux de l'influence de teneur en eau sur l'endommagement de BHP, une faible fissuration sur des échantillons de teneur en eau inférieure à 2.6% provoque une faible fissuration des BHP [Aidoud. A, 2018].

- Propriétés physico-mécaniques du matériau (densité, perméabilité, résistances) :

D'après [Aidoud. A, 2018] le béton de faible rapport eau/liant sont plus sensibles à l'éclatement [Phan. L-T et al, 2001], [Andeberg. Y, 1997], [Consolazio. G-R et al 1997] la faible porosité rend difficile le transfert de fluide engendrant de forts pressions de vapeur lors de la montée en température [Kanema. M, 2007], [Nguyen. V-T, 2013].

- Vitesse de chauffage : l'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'écaillage/ éclatement du béton [Nguyen. V-T, 2013]. Des travaux de recherche de [Noumowé. N-A, 1995] sur l'instabilité thermique du BHP ont montré qu'à la vitesse de chauffage de 1°C/min, des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² ont éclaté à une température du surface voisine de 300 — 350°C. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de 0.1°C/min n'ont pas éclaté. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement [Nguyen. V-T, 2013]. D'après [Aidoud. A, 2018]

- Taille des éprouvettes : D'après [Aidoud. A, 2018] des tests de chauffage réalisés par [Kanema 2007] sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² et (11x22) cm². Ont montré plus d'éclatement avec les éprouvettes (16x32) cm². La mesure de la perte de masse des éprouvettes au cours du chauffage a conduit à un séchage plus rapide des échantillons (11x22) cm². Cette perte de masse peut atténuer la pression de vapeur et limiter l'éclatement [Nguyen. V-T, 2013].

- Nature des granulats : les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires [Xing. Z, 2011], [Mindeguiaw. J-C, 2009], [Arupfire, 2005], [Nguyen. V-T, 2013].

L'éclatement est donc lié à plusieurs des processus (thermique, hydriques et mécaniques) avec des paramètres favorisant qui induisent plus de complexité au phénomène [Aidoud. A, 2018].

I. 4. Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé :

Le béton est un matériau composite formé de liant (ciment), de granulats (graviers, sable), de l'eau et éventuellement des ajouts. L'eau dans le béton existe sous diverses formes. Elle joue un double rôle d'hydratation et d'ouvrabilité du mélange. Elle se présente sous forme d'eau libre (ou capillaire) d'eau adsorbée, d'eau chimiquement liée. Du fait de son hétérogénéité, il est nécessaire de comprendre le rôle de chacun des composants du béton dans la phase de montée et /ou de baisse en température. Lorsque le béton est exposé à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques [Chouiter. Y, 2016].

I. 4. 1. Matrice cimentaire :

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différentes transformations physiques et chimiques se produisent. Ces phénomènes concernent la pâte de ciment et les granulats [Nonna. Y, 2015].

Les principales transformations de la matrice cimentaire observées par [Schneider. U et al, 1982], [Noumowé. N-A, 1995], [Castellote. M et al, 2004], [Alonso. C et al, 2004] et [Toumi. B, 2010] lors de la montée en température sont :

- **20-120°C** : départ de l'eau libre s'opère de façon marquée vers 100°C et adsorbée [Noumowé. N-A, 1995], décomposition de l'étrangéité à partir de 60 - 70°C [Castellote. M et al, 2004]. Premiers signes de décomposition de C-S-H avant 100°C, [Alonso. C et al, 2004] ; Autour de 120°C, l'eau libre s'échappe complètement ;
- **130-170°C** : double réaction endothermique lors de la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [Alarcon-Ruiz. L et al, 2005] ;
- La destruction du (CSH) observée avant 100°C se poursuit jusqu'à 400°C ;
- **450 - 550 °C** : La décomposition de la portlandite en chaux se produit et relâche de l'eau : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ (des hydroxylations par déshydratation) [Noumowé. N-A, 1995] ;
- **Autour de 570 °C** : Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques [Aidoud. A, 2018] ;
- **600-700°C** : décomposition des C-S-H, formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ [Schneider. U et al. 1982] ;
- **Entre 700 et 900 °C** : Le carbonate de calcium (CaCO_3) se décompose en chaux libre (CaO) et en gaz carbonique à partir de la température de 600°C et autour de 800°C ;
- **A dessus de 1300-1400 °C** : Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment [Menou. A, 2004].

Dans la phase de refroidissement, [Alonso et al, 2004] ont observé une nouvelle formation de la portlandite, ainsi qu'un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de C-S-H [Nonna. Y, 2015].

I. 4. 2 Granulats :

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% de son volume. Les granulats utilisés pour la confection du béton peuvent être naturels (origine minérale sans transformation autre que mécanique) artificiels (origine minérale et transformés) ou recyclés. Les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats réactifs (calcaire) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps. Les granulats neutres (siliceux) ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent donc de faibles liaisons [Chouiter. Y, 2016].

En principe inertes dans le béton à la température ambiante sauf cas de pathologie comme les réactions alcali-granulats, les granulats ont un comportement différent aux températures élevées. Ce comportement dépend de leur nature minéralogique et de leur composition chimique [Chouiter. Y, 2016].

I. 4. 3. Propriétés thermiques :

I. 4. 3. 1. Déformation thermo hydrique libre du béton :

La déformation thermique libre du béton dépend de sa composition, de la nature des granulats et de différentes transformations physico-chimiques, qui ont lieu durant le chauffage [Nonna. Y, 2015].

Lors du chauffage, la pâte de ciment subit deux phases : la phase d'expansion et ensuite la phase de retrait. Les travaux de [Menou. A, 2004], [Hager. I, 2004] montrent une dilatation de la pâte de ciment entre 20°C et 150°C. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements cinétiques moléculaires qui s'ajoutent à la pression développée par une diminution de la tension superficielle de l'eau lors de la sollicitation thermique [Menou. A, 2004]. Au-delà de cette plage de température, la pâte de ciment présente un retrait très important lié au départ de l'eau contenue dans le matériau [Nonna. Y, 2015].

Les granulats ont un comportement différent. La nature minéralogique influence significativement l'expansion thermique des granulats. La comparaison des déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats, menée par [Piasta. J, 1989], montre que le coefficient de dilatation thermique du béton dépend de celui des granulats. La déformation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéaire dépendante de la température. Après 150°C, la pâte de ciment se rétracte. L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment provoque à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de

déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. La (Figure I.11) présente l'évolution de dilatation thermique apparente de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température [Nonna. Y, 2015].

Les travaux de [Kodur. V-K-R, 2014] sur le béton ordinaire montrent une augmentation de la déformation thermique de 1,3 % à 700°C. L'auteur explique cette augmentation par l'expansion thermique des granulats et le retrait de la pâte de ciment au sein du béton. Il est intéressant de noter que la déformation thermique libre du béton reste constante de 700°C à 1000°C [Nonna. Y, 2015].

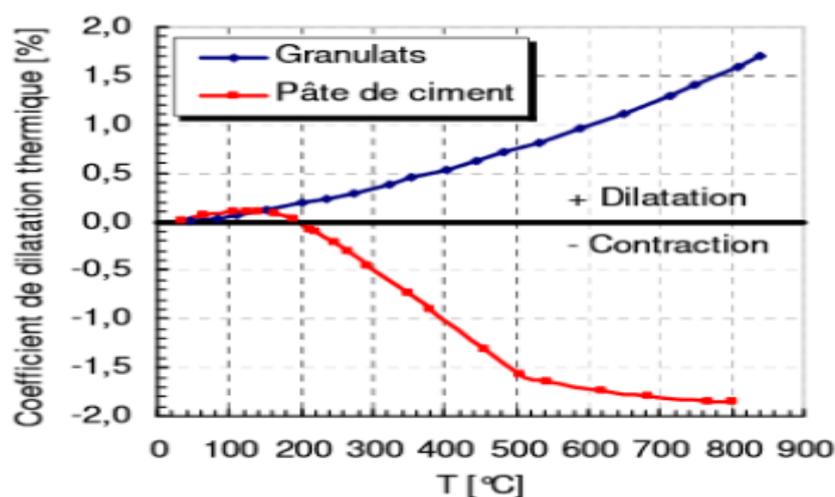


Figure I.11. Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température, [Nonna. Y, 2015]

I. 4. 4. Propriétés mécaniques des bétons chauffés :

La sollicitation thermique sur le béton provoque une diminution graduelle des propriétés mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou à froid. Les pertes de résistance varient en fonction de la température, de la vitesse de montée en température et du type de béton. Les principales caractéristiques mécaniques présentées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité [Nonna. Y, 2015].

I. 4. 4. 1. Résistance à la compression :

Pour caractériser un béton, il est nécessaire de connaître sa résistance à la compression. Généralement, une baisse de la résistance à la compression est observée au cours du chauffage [Aidoud. A, 2018].

De nombreux essais montrent une diminution de la résistance à la compression du béton entre 20 et 80°C. Khoury [Khoury. G-A, 1992] suppose que cette baisse de résistance résulte de la réduction des forces de cohésion Van der Waals entre les feuillets de CSH qui conduirait à la formation de groupes silanol (Si-OH--HO-Si). Ces groupes présentent des forces de liaison plus faibles que les groupements siloxane (Si-O-Si). Ensuite, à partir de 80°C, le processus de séchage induit la réaction suivante : $\text{Si-OH--HO-Si} \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}\uparrow$ et provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment. En dépassant le seuil de 300°C, le béton ne contient plus d'eau et la résistance baisse progressivement sous l'effet de la température [Nonna. Y, 2015].

Plusieurs études regroupent en deux zones le comportement résiduel du béton à la compression [Nonna. Y, 2015] :

- De la température ambiante à 250°C (400°C) : une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance est observée [Kodur. V-K-R et al, 2004], [Kanem. M, 2007], [Phan. L T, 2008] ;
- De 250°C (400°C) à 600°C : une chute de la résistance à la compression est notée [Hager. I, 2004], [Pliya. P, 2010].

La variation des propriétés mécaniques des bétons évolue différemment selon que l'essai soit réalisé à chaud ou à froid (essai résiduel). La (Figure I.12) présente une évolution de la résistance à la compression relative du même béton à chaud et à froid. Nous constatons que la résistance à chaud est supérieure à la résistance résiduelle pour toutes les températures après 150°C. Ceci peut être expliqué par un endommagement supplémentaire du béton au cours du refroidissement (réhydratation de la chaux, décomposition des granulats, changement du signe de gradient thermique) [Hager. I et Pimienta. P, 2004], [Nonna. Y, 2015].

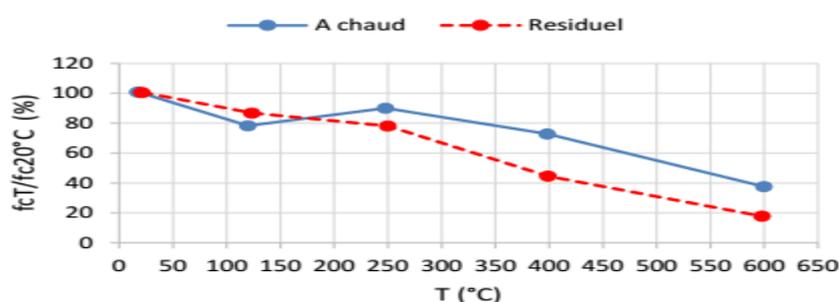


Figure I.12. Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid), [Nonna. Y, 2015]

Les courbes d'évolution de résistance à la compression en fonction de la température, proposées par l'Eurocode 2 (EC2, 2004), sont présentées sur la (Figure I.13). Les courbes de l'Eurocode 2 se basent sur deux types de granulats : calcaires et siliceux et concernent les bétons ordinaires (BO) et les bétons à hautes performances (BHP). Les BO (calcaires) se comportent mieux au feu que les BHP (C80/95) [Nonna. Y, 2015].

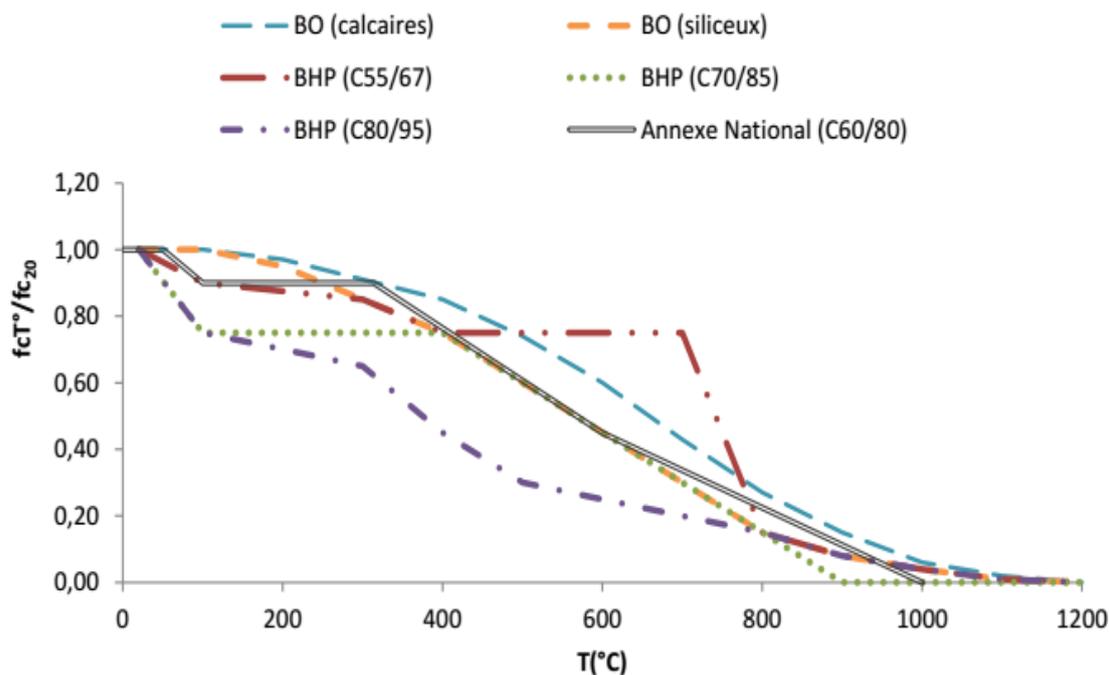


Figure I.13. Courbes de la variation de la résistance à la compression selon les textes de l'Eurocode 2, [Nonna. Y, 2015].

[Behnood. A et al, 2009] a testé les bétons de fibres de polypropylène avec des dosages de 1 kg/m^3 ; 2 kg/m^3 ; 3 kg/m^3 (Figure.I.14). Les résultats ont montré une légère amélioration de la résistance à la compression des bétons fibrés par rapport aux bétons de référence. Le dosage de 2 kg/m^3 présente les meilleures performances mécaniques de 200 à 600°C. L'auteur préconise le dosage de 2 kg/m^3 comme un optimum parmi les trois dosages testés.

Les résultats de [Khaliq. W, et al, 2011] et de [Behnood. A et al, 2009] sur les bétons de fibres de polypropylène (1 kg/m^3) n'ont pas montré d'amélioration significative de la résistance à la compression avec l'évolution de température. Il est possible que l'incorporation de fibres de polypropylène génère des porosités supplémentaires lors du traitement thermique du béton et réduit la résistance à la compression.

De plus, les fibres métalliques (42 kg/m^3) et le cocktail de fibres ($42 \times 1 \text{ kg/m}^3$) n'ont pas donné d'effet favorable vis-à-vis de la résistance à la compression [Khaliq. W et al, 2011] D'après [Nonna. Y, 2015].

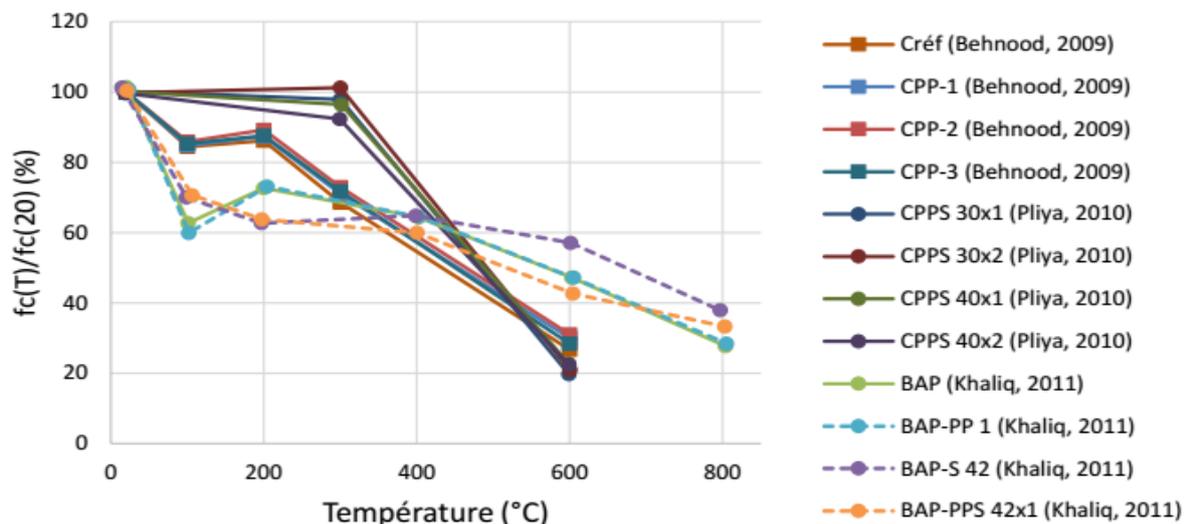


Figure I.14. Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène, [Nonna. Y, 2015]

D'après [Pliya. P, 2010], les différentes teneurs en fibres de polypropylène et métalliques ne changent pas la cinétique de la perte de résistance à la compression (Figure.1.14). Il est important de souligner, qu'il ne suffit pas d'additionner le comportement des bétons de fibres de polypropylène et celui des bétons de fibres métalliques aux mêmes dosages afin d'obtenir le comportement à hautes températures des bétons de cocktail de fibres [Nonna. Y, 2015].

I. 4. 4. 2. Résistance à la traction :

D'après [Chouiter. Y, 2016] La (figure I.15. (a)) montre les résultats d'essais de résistance résiduelle à la traction par fendage de bétons ordinaires et de bétons à hautes performances de [Noumowé. N-A, 1995], [Li. M et al, 2004], [Kanema. M, 2007] et [Behnood. A et al, 2009]. La résistance résiduelle à la traction diminue avec la température. Une légère baisse s'observe jusqu'à la température de 350°C , puis une chute de résistance plus importante [Behnood. A et al, 2009], [Kanema. M, 2007], [Li. M et al, 2004], [Noumowé. N-A, 1995]. Les bétons à faible rapport E/C présentent une baisse plus significative de résistance que les bétons à rapport E/C élevé dès la température 150°C [Kanema. M, 2007].

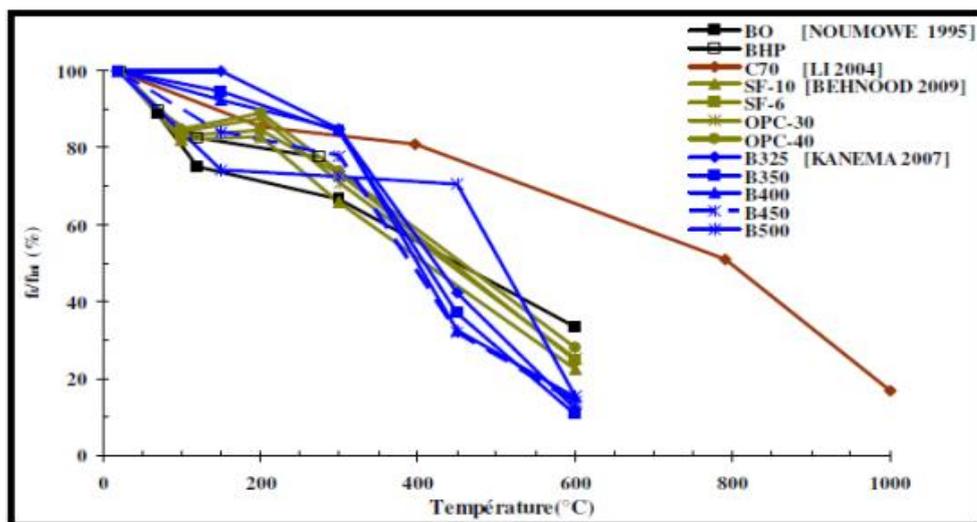


Figure I.15. Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage [Behnood. A et al, 2009], [Kanema. M, 2007], [Li. M et al, 2004], [Noumowé. N-A, 1995] source [Chouiter. Y, 2016]

Comme en compression, l'influence de la nature des granulats sur l'évolution de la résistance résiduelle à la traction est remarquée par [Xing. Z, 2011] (figure I.15). L'auteur note une plus grande accélération de la perte de résistance entre 300 et 600°C des bétons de granulats siliceux et de granulats de silex [Chouiter. Y, 2016].

La perte de résistance des bétons de granulats siliceux, de silex et calcaire est respectivement de 87%, 71% et 48% à 600°C. Au-delà de cette température, la perte de résistance des bétons de granulats calcaires devient plus importante et cela liée à la décarbonatation [Pilya. P, 2010], a étudié l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton suivant la classe de béton. Des bétons ordinaires ($E/C=0.45$) et des bétons à hautes performances ($E/C=0.3$) ont été confectionnés et chauffés suivant différents cycles de chauffage-refroidissement. Pliya a remarqué un impact élevé des fibres de polypropylène sur la résistance à la traction des bétons ordinaires entre les températures 150°C et 450°C (figure I-15 (a)). L'auteur attribue cette amélioration de résistance à la fusion du polypropylène qui remplit les pores du béton et se resolidifie durant la phase de refroidissement. Les forces de contact et les liaisons entre les différents grains s'améliorent ainsi. Avec le béton à hautes performances, du fait de sa forte densité, les fibres fondues diffusent moins dans la matrice cimentaire. Cette faible propagation du polypropylène fondu, couplée à une fissuration induite par l'augmentation de volume du polypropylène avec la température explique le fait que la résistance résiduelle à la traction par flexion des bétons BHP ne s'améliore pas. Après le

chauffage à 600°C, les résistances résiduelles à la traction des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont presque les mêmes [Chouiter. Y, 2016].

[Noumowé. N-A, 1995], [Suhaendi. S-L et al, 2006], [Behnood. A et al, 2009] ont aussi souligné un effet négligeable de la présence des fibres de polypropylène sur la résistance résiduelle des bétons BHP (figure I.16(b)). Par contre, Haniche, [Chen. B et Liu. J, 2004] ont constaté un gain de résistance à la traction par fendage de BHP en présence de fibres de polypropylène après 300°C ou 400°C (figure I.16(b)).

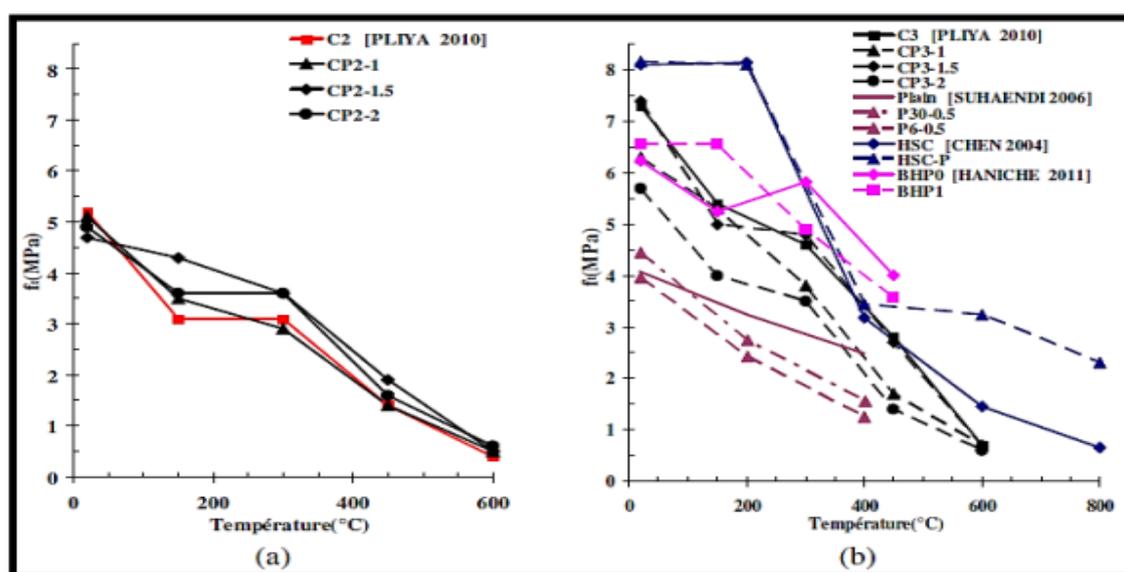


Figure I.16. Evolution de la résistance résiduelle à la traction par flexion de bétons avec et sans fibres de polypropylène : (a) pour BO et (b) pour BHP, [Pilya. P, 2010], [Suhaendi. S-L et al, 2006], [Chen. B et Liu. J, 2004] source [Chouiter. Y, 2016].

En présence de fibres métalliques, on observe une influence positive de celles-ci sur la résistance résiduelle à la traction du béton. Comme pour le béton avec et sans fibres de polypropylène, cette résistance diminue avec l'augmentation de la température. Mais, la réduction de la résistance résiduelle à la traction varie lentement pour le béton avec les fibres métalliques [Pilya. P, 2010], [Suhaendi. S-L et al, 2006], [Chen. B et Liu. J, 2004]. L'effet des fibres de carbone sur la résistance résiduelle à la traction est le même que celui des fibres métalliques. L'ajout de fibres métalliques ou de carbone, non seulement améliore la capacité résistante à la traction pour le béton exposé à haute température, mais encore limite l'ouverture des fissures [Chen. B et Liu. J, 2004]. D'après [Chouiter. Y, 2016].

I. 4. 4. 3. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité d'un béton dépend de la proportion de granulats et de la matrice cimentaire ainsi que du module d'élasticité de chaque constituant [Nonna. Y, 2015].

Noumowé [Noumowé. N-A, 1995] a présenté l'évolution des modules d'élasticité résiduels par rapport au module initial de BO et BHP. Une baisse de module est remarquée pour les deux bétons (BO et BHP). A 500°C, le BO garde seulement 48 % de son module initial, tandis que le BHP est à 54 %. Il est intéressant de noter que pour la température de 150°C, la valeur relative du BO (90 %) est supérieure à celle du BHP (83 %) [Nonna. Y, 2015].

Les résultats de modules d'élasticité mesurés à chaud sont peu nombreux. Hager [Hager. I, 2004]. [Nonna. Y, 2015]. A réalisé des essais à chaud avec des bétons de différents rapports E/C (0,3 ; 0,4 ; 0,5) (Figure.I.17 (a)). Une diminution progressive et monotone de module d'élasticité est observée, ainsi l'auteur a constaté que le départ d'eau n'influence pas le module, contrairement aux résultats de la résistance à la compression. A 120°C la perte de résistance est de 20 %, tandis qu'à 600°C la baisse est déjà d'environ 80 % [Nonna. Y, 2015].

En comparant l'évolution de module d'élasticité à chaud et à froid (Figure.I.17 (b)), nous constatons que le module décroît dans les deux cas et présente une plus forte diminution dans le cas de module résiduel. D'après [Hager. I, 2004], cette différence peut être expliquée par différents processus au cours de refroidissement : le gradient thermique inversé, l'absence de la déformation thermique transitoire (relaxation des contraintes entre la pâte et les granulats) et l'augmentation de volume consécutive à la réhydratation de la chaux [Nonna. Y, 2015].

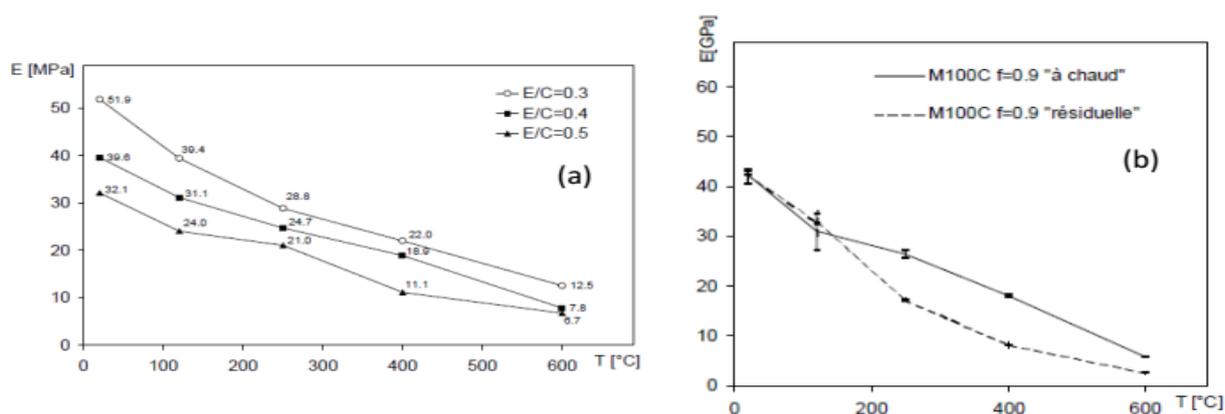


Figure I.17. Evolution de modules d'élasticité apparents déterminé "à chaud" en fonction de différentes températures (a), évolution du module d'élasticité apparent obtenu "à chaud" et "résiduelles" sur le béton de fibres de polypropylène (0.9 kg/m³) (b), [Hager. I, 2004] source [Nonna. Y, 2015].

L'incidence des fibres métalliques et de polypropylène sur le module résiduel des bétons a été étudiée par plusieurs auteurs [Nonna. Y, 2015].

Kanema [Kanema. M, 2007] a noté que le module d'élasticité diminue de manière continue à partir du cycle de 150°C. L'auteur remarque une baisse de plus de 98 % de la rigidité initiale à un chauffage de 600°C [Nonna. Y, 2015].

Lau [Lau. et al, 2006] a étudié l'influence de l'ajout de 1 % (78 kg/m³) de fibres métalliques (Figure I.18). Des bétons de résistances à la compression de 39 MPa (M1), 53 MPa (M2) et 99MPa (M3) ont été chauffés aux paliers de 105°C, 200°C, 300 °C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C,1100°C et 1200°C à une vitesse de 5°C/min jusqu'à 600°C puis de 4°C/min au-delà. L'auteur ne distingue pas d'impact important des fibres métalliques avant 400°C et au-delà de 800°C [Nonna. Y, 2015].

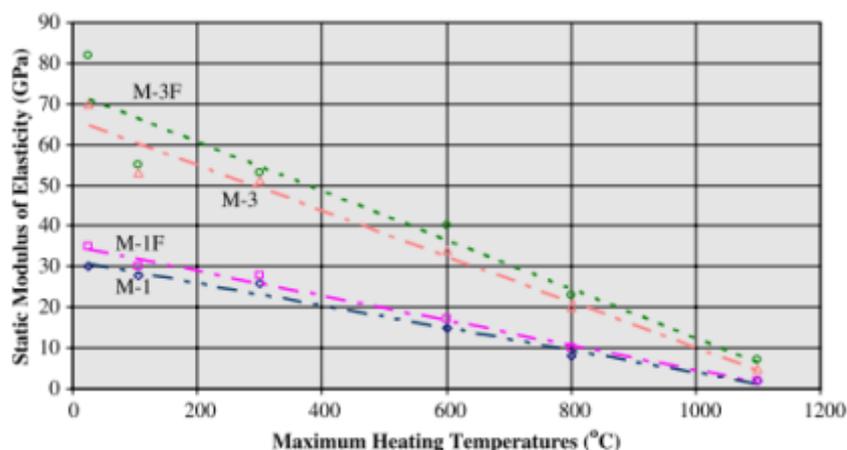


Figure I.18. Module d'élasticité statique résiduel en fonction de température, [Lau et al, 2006] source [Nonna. Y, 2015].

Sideris et al. [Sideris. K et al 2009] ont mesuré les modules d'élasticité résiduels sur différents bétons. La (Figure I.19) présente une évolution de module d'élasticité relatif de bétons ordinaires (NSC) et de bétons à hautes performances (HPC1 et HPC2), de bétons contenant des fibres métalliques (SFR) et de bétons avec ajout de fibres de polypropylène (PFR) en fonction de la température. Le dosage de fibres métalliques et de fibres de polypropylène est de 40 kg/m³ et 5 kg/m³ respectivement. La teneur en eau des éprouvettes varie de 3 % à 4 %. Les résultats des essais à hautes températures (la vitesse de chauffage est de 5°C/min, le palier est de 1h) ont montré que les bétons à hautes performances sont plus sensibles à l'écaillage que les bétons ordinaires. L'addition des fibres métalliques ne ralentit pas la perte de module. Au contraire, après 500°C, les fibres métalliques ne semblent présenter aucun apport

supplémentaire à la résistance du béton. L'effet négatif des fibres de polypropylène sur l'évolution des propriétés mécaniques du béton, notamment le module d'élasticité, est remarqué par les auteurs. La diminution linéaire des modules d'élasticité est observée jusqu'à 300°C. Seuls les bétons de fibres de polypropylène n'ont pas subi l'écaillage [Nonna. Y, 2015].

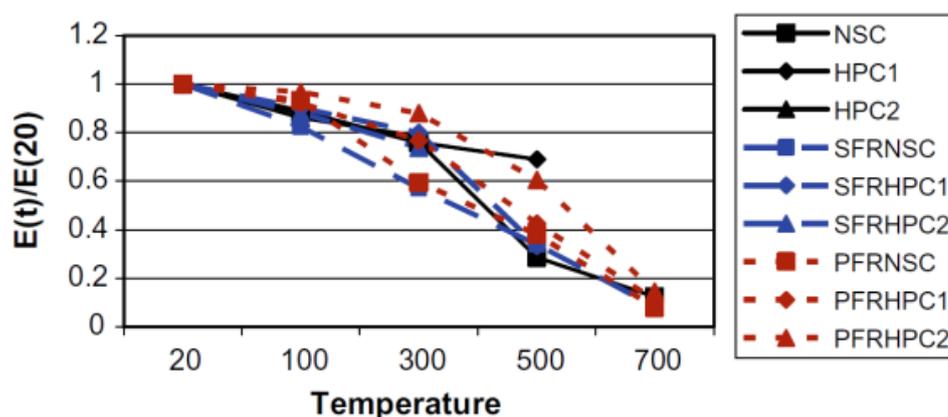


Figure I.19. Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température, [Sideris. K et al, 2009] source [Nonna. Y, 2015]

Xing [Xing. Z, 2011] a noté que les performances mécaniques résiduelles des bétons dépendent fortement de la nature du granulat après 300°C. Les bétons de granulat silex présentent la fissuration la plus marquée et par conséquent une importante perte de résistance mécanique entre 300°C et 600°C. Pour le béton de granulat calcaire, la décarbonatation de la calcite (entre 600°C et 750°C) génère la dégradation des propriétés mécaniques dès 600°C [Nonna. Y, 2015].

I. 4. 5. Perte de masse :

Le processus de perte de masse se produit lorsque la température augmente. Le départ de l'eau est la principale cause de la perte de masse du béton avant 600°C [Khalifa et al, 2000]. La (figure I.20) montre les résultats expérimentaux de perte de masse en fonction de la température obtenus par [Hager. I, 2004]. Généralement, ce processus se déroule en trois étapes liées à la perte d'eau dans le béton [Xing. Z, 2011], [Pilya. P, 2010], [Kanema. M, 2007], [Xiao. J et Falkner. H, 2006], [Hager. I, 2004], [Phan. L et Carino.N, 2001], [Noumowé. N-A, 1995] :

- **De la température ambiante jusqu'à 100 - 150°C**, il y a une faible perte de masse due au départ de l'eau libre contenue dans le béton ;
- **Entre 150 et 300°C**, la perte de masse augmente rapidement. Ceci est lié au départ de l'eau contenue initialement dans les hydrates C-S-H et à la décomposition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Jusqu'à 300°C, le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale [Kanema. M, 2007] ;
- **Au-delà de la température 300°C**, il y a une faible perte de masse correspondant à la dés hydroxylation de la portlandite ($450\text{-}550^\circ\text{C}$), à la décomposition des silanols (SiOH), du silex ($400\text{-}570^\circ\text{C}$) [Xing. Z, 2011], et à la décarbonatation du calcaire CaCO_3 ($600\text{-}800^\circ\text{C}$) [Xing. Z, 2011], [Xiao. J et Falkner. H, 2006], [Khoury. A, 1992].

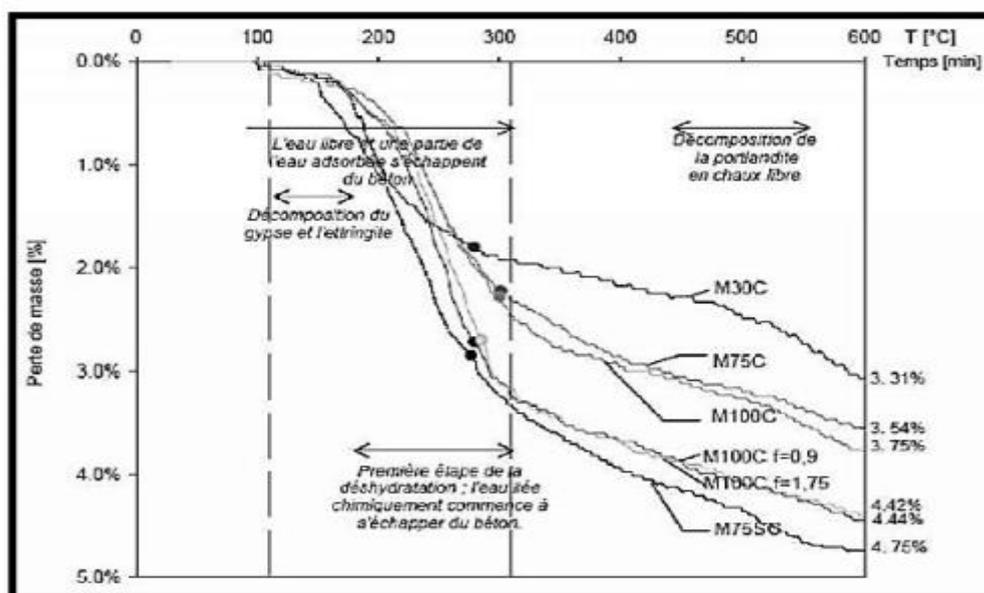


Figure I.20. Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons, [Hager. I, 2004] source [Chouiter. Y, 2016]

Des études menées par plusieurs auteurs montrent que la perte de masse du BHP est toujours inférieure à celle du BO. Ceci est lié à la quantité d'eau initiale contenue dans le mélange du béton [Kanema. M, 2007]. En effet, avec un chauffage à $1^\circ\text{C}/\text{min}$ et un palier de température constante à 600°C d'une durée de 1h, la perte de masse mesurée par, [Kanema. M, 2007] est approximativement celle de la teneur en eau initiale. Avec un chauffage rapide et en l'absence d'un palier de temps pour 600°C , le béton n'est pas totalement séché. La perte de masse mesurée par, [Khalifa. P et al, 2000] est inférieure à la teneur en eau initiale (figure I.21).

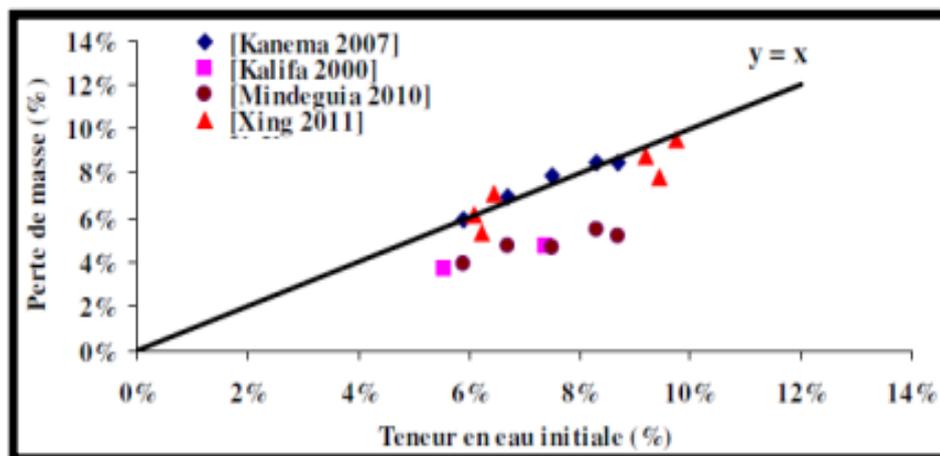


Figure I.21. Comparaison de la perte de masse et de la teneur en eau initiale des bétons soumis à 600°C [Xing. Z, 2011], [Kanema. M, 2007], [Khalifa. P et al, 2000] source [Chouiter. Y, 2016]

L'effet de la vitesse de chauffage a été étudié par [Kanema. M, 2007] (figure I.22). L'auteur remarque que lorsque la vitesse de chauffage est lente, la quantité d'eau évacuée est plus grande à chaque température entre 100 et 300°C.

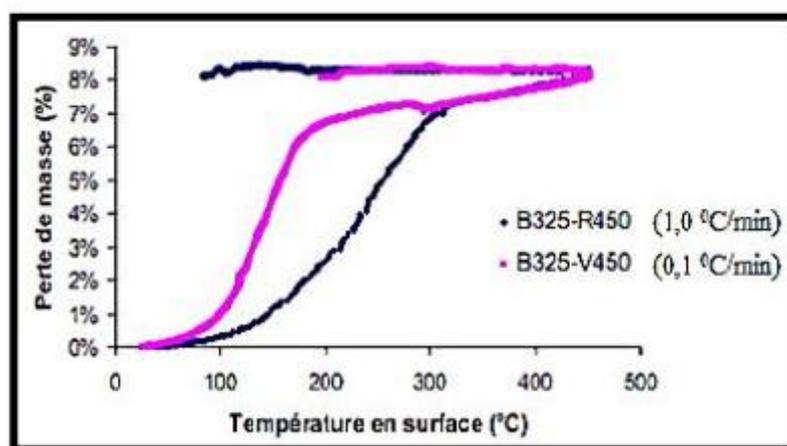


Figure I.22. Evolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage [Kanema. M, 2007] source [Chouiter. Y, 2016]

L'influence de la perte de masse suivant la nature des granulats est liée au coefficient d'absorption des granulats [Xing. Z, 2011]. L'auteur constate que, étant très peu poreux, les granulats de quartzite perdent peu d'eau lors du chauffage. Par contre, la plus grande perte de masse des bétons de granulat silico-calcaire provient du départ d'eau absorbée par les carbonates poreux présents dans ce granulat et du départ d'eau des silex après 450°C.

I. 5. Conclusion

L'objectif du premier chapitre a été de présenter on premier lieu des notions générales sur les (BHP) et les (BFHP), ainsi que leurs caractéristiques surtout mécaniques, en deuxième lieu de faire la synthèse des résultats expérimentaux et des connaissances existantes mettant en scène l'évolution du comportement du béton à haute température.

Lorsque le béton est soumis à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et a produit une déstructuration de la pâte de ciment et des granulats qui affecte directement les propriétés mécaniques.

L'eau qui se présente dans le béton sous forme libre, liée ou adsorbée, lors de la montée en température, s'échappe du béton, et entraîne la déstructuration de la matrice. Celle-ci se traduit sur le plan macroscopique par une modification de la résistance en compression, de la résistance en traction, du module d'élasticité.

Les BHP sont plus sensibles à l'écaillage que les BO. La perte de module n'est pas ralentie par l'addition des fibres. Au contraire, à des températures élevées les fibres métalliques ne présente aucun apport supplémentaire à la résistance du béton. Malgré que l'addition des fibres de polypropylène a un effet négatif sur l'évolution des propriétés mécaniques du béton, notamment le module d'élasticité, il n'a pas subi d'écaillage. L'instabilité thermique du béton se traduit par un comportement explosif ou un écaillage. Cette instabilité est influencée par des paramètres parmi ces derniers : la vitesse de chauffage, les propriétés physico-mécaniques du béton, la teneur en eau, la nature des granulats.

Chapitre II :

Etude

Expérimentale

II. 1. Introduction :

Dans toute étude sur les bétons ou autres matériaux, la présentation et la caractérisation des différents matériaux et matériels utilisés est une tâche indispensable pour que le travail soit valable, strict et dans les normes.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la montée de la température dans les bétons fibrés (BFHP). Des éprouvettes de différentes compositions de béton ont été confectionnées, conservées, puis soumises à un traitement thermique. Des mesures de la perte de masse, de la vitesse ultrasonique, de la résistance à la compression et à la traction ont été effectuées avant chauffage et après refroidissement. Afin d'évaluer l'évolution des propriétés mécaniques et physiques des bétons fibrés aux hautes températures.

Nous commençons par présenter les caractéristiques des matériaux utilisés (graviers, sables, ciment et fibres de polypropylène) et les compositions des bétons testés avant de décrire les dispositifs expérimentaux utilisés dans le cadre de cette étude. Aussi on va décrire les différents essais destructifs et non destructifs avec leurs procédures et normes.

II. 2. Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire pédagogique de Génie Civil et d'Hydraulique à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

II. 3. Caractérisation des constituants :

II. 3. 1. Caractérisation des graviers :

Les deux graviers utilisés pour la confection des bétons ont les fractions suivantes: **(5/15)**, **(15/25)** issus de la carrière de « Ben Djerah » (wilaya de Guelma).



Figure II.1. Les fractions des graviers utilisés.

II. 3. 1. 1. Analyse granulométrique : [NA 2607]

❖ But :

L'analyse granulométrique d'un échantillon a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages des différents grains constituant l'échantillon testé.

❖ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

❖ Critères que doit l'échantillon comblé :

La quantité utilisée doit répondre aux différents impératifs qui sont contradictoires, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée répond au critère suivant :

$$M \geq 0,2 D_{\max}.$$

D_{max} : Diamètre maximal du gros granulat en (mm) ;

M : La masse de l'échantillon en (kg).

❖ **Mode opératoire :**

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.



Figure II.2. Photo de la tamiseuse utilisée.

Les résultats obtenus pour les deux graviers sont récapitulés dans le tableau II.1 et schématisés sur la figure II.3.

Tableau II.1 : analyse granulométrique des graviers.

Diamètre du tamis en (mm)	Les Graviers			
	5/15		15/25	
	Refus cumulé en (%)	Tamisât cumulé en (%)	Refus cumulé en (%)	Tamisât cumulé en (%)
25	/	/	0	100
20	0	100	5.1	94.9
14	25.9	74.1	50.3	49.7
10	71.3	28.7	86.9	13.1
6.30	98.5	1.5	98.6	1.4

5	99.7	0.3	98.9	1.1
Fond	100	0	100	0

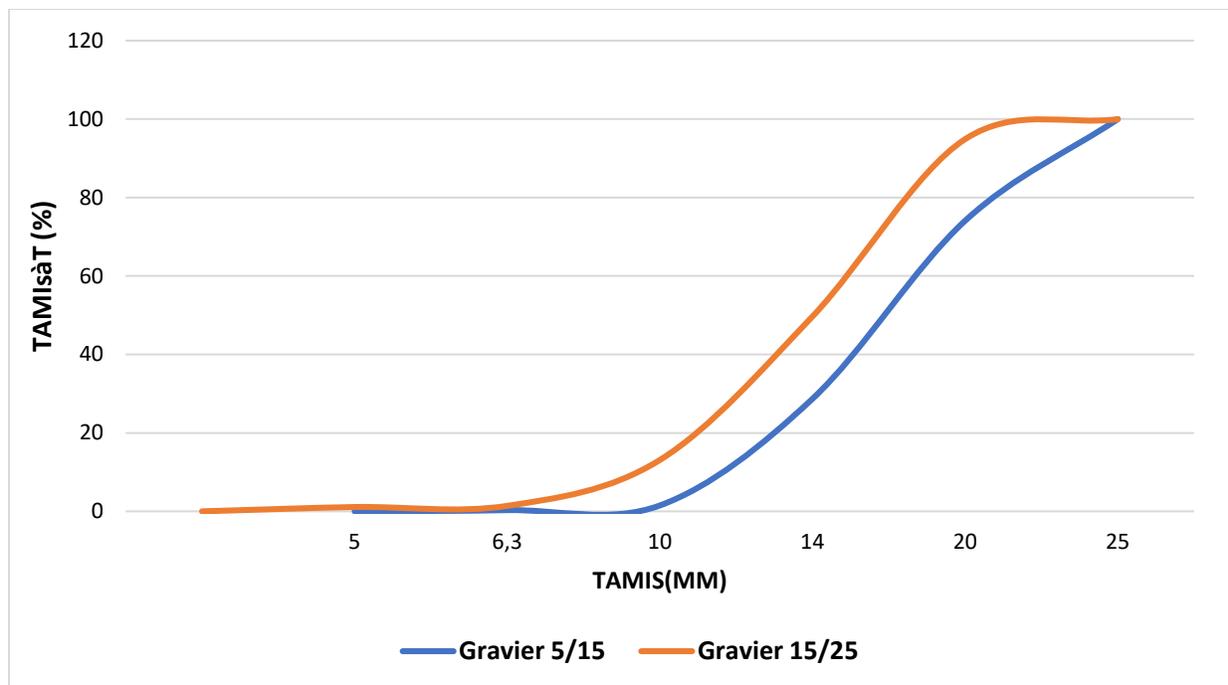


Figure II.3. Courbes analyse granulométriques des graviers [5/15, 15/25].

- Les deux graviers sont contenus et non serrés.

II. 3. 1. 2. Masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (ρ_{Abs}) :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide du corps et les vides contenus dans les grains (volume apparent).

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ_{App}) :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu ou volume réel).

Les masses volumiques s'expriment en fonction des unités courantes des masses et des volumes : t/m^3 , kg/m^3 , g/cm^3 .

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité.

II. 3. 1. 2. 1. La masse volumique apparente (ρ_{App}) : [NA 255]

❖ **Principe :**

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Peser le récipient à vide et noter M_1 ,
- ✓ Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- ✓ Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- ✓ Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- ✓ Araser à la règle,
- ✓ Peser le contenu et noter M_2 .
- ✓ L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.

Il résulte que :

$$\rho_{App} = (M_2 - M_1) / V \dots\dots\dots (II.1)$$

M_1 : masse du récipient vide ;

M_2 : masse du récipient et gravier ;

V : volume de récipient.



Figure II.4. Essais de la masse volumique apparente des graviers.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.2 : La masse volumique apparente (ρ_{App}) des graviers [(5/15), (15/25)].

Matériaux	ρ_{App} (g/cm ³)
5/15	1.485
15/25	1.49

Les deux valeurs de la masse volumique apparente des graviers 5/15 et 15/25 sont dans l'intervalle [1.4-1.65] g/cm³, donc d'après [Fiches techniques] c'est des granulats de nature silico-calcaires.

II. 3. 1. 2. 2. La masse volumique absolue (ρ_{Abs}) : [NF P 18-555]

❖ Principe :

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau, sauf pour les corps réagissant avec l'eau qui conduisent à utiliser un autre liquide (Benzène en principe).

nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (400 ml),
- ✓ Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Bien éliminer les bulles d'air,
- ✓ Lire le nouveau volume V_2 ,
- ✓ Le volume absolu ou réel est : $V = V_2 - V_1$ (II.2)

La masse volumique réelle est : $\rho_{Abs} = M / (V_2 - V_1)$ (II.3)



Figure II.5. Essais de la masse volumique absolue des graviers.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.3 : La masse volumique absolue (ρ_{Abs}) des graviers [(5/15), (15/25)].

Matériaux	ρ_{Abs} (g/cm ³)
5/15	2.46
15/25	2.71

Les deux valeurs de la masse volumique absolue des graviers 5/15 et 15/25 sont dans l'intervalle $[2.6-2.7] \text{ g/cm}^3$ et $> 2 \text{ g/cm}^3$, donc d'après la littérature c'est des granulats de nature silico-calcaires designé pour les bétons lourds.

II. 3. 2. 3. Propreté :

La norme P18-301 [Dreux et al 1998] prescrit que dans les granulats le pourcentage des impuretés ne doit pas excéder 5%. George Dreux avise qu'elle ne doit pas dépasser 2% dans les granulats pour bétons de qualité.

La propreté des graviers a été déterminée conformément à la norme NF P18-591 [CERIB 2005] dans le laboratoire pédagogique de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université 8 Mai 45 de Guelma.

❖ **Equipement utilisé :**

- Une balance.
- Un séchoir (Etuve de marque ELE international à Thermo – régulateur digital)
- Un récipient d'une hauteur de 300mm au moins.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Sécher l'échantillon qui doit être de 5Kg au moins jusqu'au poids constant, le peser, soit (g).
- ✓ Remplir le récipient au niveau plus haut que celui des agrégats avec l'eau, agiter le contenu du récipient.
- ✓ Laisser reposer pendant 2mn, verser l'eau en plus.
- ✓ Répéter l'opération jusqu'au ce que l'eau soit claire après l'agitation.
- ✓ Sécher à nouveau jusqu'au poids constant. Soit (g').

La masse des impuretés est :

$$G = g - g' \dots\dots\dots (II.4)$$

Le pourcentage est :

$$(G/g') \times 100\% \quad [N-E. KEDJOUR 2003] \dots\dots\dots (II.5)$$

Les résultats des essais sont rassemblés dans le tableau II.4

Tableau II.4 : Résultats des essais de propreté.

Matériaux	Impuretés (%)
5/15	12.36
15/25	3.39

D'après les résultats donnés au tableau II.4, nous pouvons constater que :

- Le gravier 15/25 est propre et sa propreté d'après la norme P18-301 est admissible pour la confection des bétons de qualité. Mais d'après George Dreux le pourcentage des impuretés à excéder les 2% donc le granulats doit être lavé avant utilisation.
- L'impureté du gravier 5/15 est supérieure à 5%, ceci montre que notre gravier n'est pas propre et il doit être lavé avant utilisation.

II. 3. 2. Caractérisation des sables :

Les sables utilisés sont :

- Un sable concassée 0/5 de la Carrière de « Ben Djerah » (Wilaya de Guelma)
- Un sable roulé de Tébossa 0/4 de la carrière de « Ben Djerah » (Wilaya de Guelma)
- Un sable roulé de dune 0/1 vient de la carrière de « Boussaâda » (Wilaya de M'sila),



Figure II.6. Photo des trois sables utilisés.

D’où leurs caractéristiques sont les suivantes :

II. 3. 2. 1. Analyses granulométrique : [NA 2607]

❖ **But de l’essai :**

Permettre la détermination des grosseurs ainsi les pourcentages respectifs des différents grains constituant l’échantillon.

❖ **Principe de l’essai :**

Faire passer l’échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

❖ **Mode opératoire :**

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers.

En prépare une masse de 2kg pour chaque échantillon de sable.

Le tableau suivant montre les résultats d’analyse granulométrique obtenus pour les trois sables utilisés.

Tableau II.5 : Analyse granulométrique des sables.

Diamètre du tamis en (mm)	Les Sables					
	Sable Tébessa 0/4		Sable Dune 0/1		Sable Carrière 0/5	
	Refus cumulé en (%)	Tamisât cumulé en (%)	Refus cumulé en (%)	Tamisât cumulé en (%)	Refus cumulé en (%)	Tamisât cumulé en (%)
5.6	0.21	99.78	0.21	99.78	2.33	97.66
4.00	0.86	99.13	0.42	99.57	4.94	94.05
3.55	1.077	98.92	0.42	99.57	7.21	92.78
2.00	3.01	96.98	0.42	99.57	26.32	73.67
1.40	6.03	93.96	0.42	99.57	40.97	59.02

1.00	12.28	87.71	0.42	99.57	50.74	49.25
0.500	62.71	37.28	0.63	99.36	67.51	32.48
0.355	79.52	20.47	3.8	96.19	74.09	25.90
0.125	98.28	1.72	99.57	0.42	87.47	12.52
Fond	100	0	100	0	100	0

Les courbes granulométriques des sables utilisés sont tracés ci-dessous :

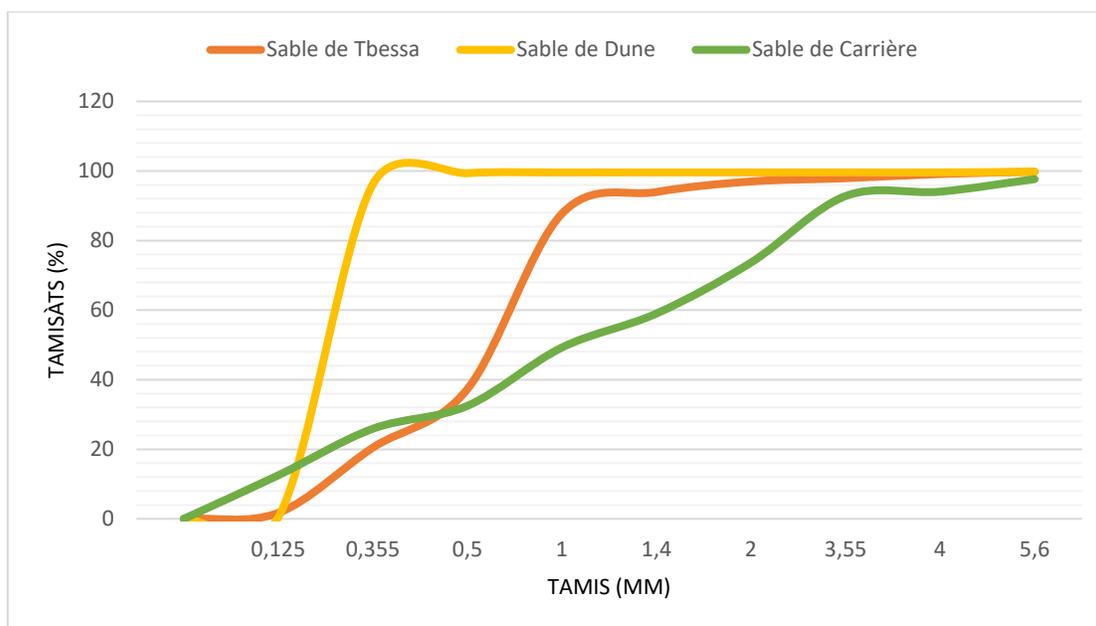


Figure II.7. Courbes analyse granulométrique des sables [0/4, 0/1 et 0/5].

D'après les résultats donnés au tableau II.5 et figurés sur la figure II.6, nous pouvons constater que :

1. Plus de 95% des grains de sable de dune ont un diamètre compris entre 0.125 et 0.355 avec une allure trop serrée, donc c'est un sable très fin.
2. Pour le sable de Tbessa on remarque que les grains de diamètre compris entre 0.125 et 1 présentent plus de 87% avec une allure un peu étalée ce qui montre que c'est un sable fin.
3. Par contre le sable de carrière est étalé sur toute l'intervalle du sable ce qui prouve que c'est un sable normal. En plus le pourcentage des fines (particules inférieures à 0.08 mm) est

inférieur à 5%, ceci montre que notre sable est propre et il n'est pas besoin d'être lavé avant son utilisation du point de vue de la granularité.

II. 3. 2. 2. Equivalent de sable : [NA 455]

❖ But de l'essai :

L'essai permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm.

Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

❖ Mode opératoire :

- ✓ Remplir l'éprouvette d'une solution lavante jusqu'au premier repère.
- ✓ À l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- ✓ Laisse reposer pendant 10 min.
- ✓ Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontales en 30s à la main ou à l'aide de l'agitateur mécanique.
- ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- ✓ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- ✓ Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- ✓ Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\% \quad \dots\dots (II. 6)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat ;

h_2 : hauteur du sable.

- ✓ Introduire le piston taré dans l'éprouvette et le laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sv} = (h'_2/h_1) 100\% \quad \dots\dots (II. 7)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat ;

h'_2 : hauteur du sable.

❖ **Interpretations des resultants :**

Tableau II.6 : Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable E_{sv} et E_{sp} .

E_{sv}	E_{sp}	Nature et qualité du sable
$E_{sv} < 65$	$E_{sp} < 60$	Sable argileuse: risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq E_{sv} < 75$	$60 \leq E_{sp} < 70$	Sable légèrement argileux: de propreté admissible pour bétons de qualité courante quant on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq E_{sv} < 85$	$70 \leq E_{sp} < 80$	Sable propre: à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$E_{sv} \geq 85$	$E_{sp} \geq 80$	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau.



Figure II.8. Essai de l'équivalent de sable.

Les résultats sont regroupés dans le tableau (7) ci-dessous :

Tableau II.7 : Résultats d'essais d'équivalent des sables.

	Les sables		
	Sable Tébessa 0/4	Sable Dune 0/1	Sable Carrière 0/5
Esv (%)	78.07	85.97	80.61
ESP (%)	71.92	99.56	76.53

Les sables testés donnent les résultats suivants :

Sable de Tébessa	Esv (%) = 78.07	Sable propre: à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
	ESP (%) = 71.92	
Sable de Dune	Esv (%) = 85.97	Sable très propre: l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau.
	ESP (%) = 99.56	
Sable de Carrière	Esv (%) = 80.61	Sable propre: à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
	ESP (%) = 76.53	

- En plus d'après [Dreux et al 1998] les sables très propres et ne contient que très peu de fines, il est préférable de ne l'employer qu'avec des dosages en ciment assez élevés ($C \geq 350 \text{ kg/m}^3$)

II. 3. 2. 3. La masse volumique du sable :

I. 3. 2. 3. 1. Masse volumique apparent : [NA 255]

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{\text{APP}} = (M_2 - M_1) / V_R \dots\dots\dots (\text{II.8})$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_R : Volume du récipient ($V_R = 1\text{L}$).



Figure II.9. Essais de la masse volumique apparent des sables utilisés.

Le tableau suivant montre les résultats obtenus de la masse volumique apparente :

Tableau II.8 : La masse volumique apparente (ρ_{App}) des sables.

	Les sables		
	Sable Tébessa 0/4	Sable Dune 0/1	Sable Carrière 0/5
ρ_{App} (g/cm ³)	1.39	1.44	1.50

Les trois valeurs de la masse volumique apparente des sables utilisés sont dans l'intervalle [1.4-1.65] g/cm³, donc d'après [Fiches techniques] c'est des granulats de nature silico-calcaires.

I. 3. 2. 3. 2. Masse volumique absolue : [NF P 18-555]

La masse volumique absolue « ρ » est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides qui pouvant exister entre les grains.

La formule qui nous permis la détermination de la masse volumique est :

$$\rho_{Abs} = M / (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (II.9)$$

ρ_{Abs} : Masse volumique absolue;

M : Masse des grains solides ;

V_1 : Volume de l'eau ;

V_2 : Volume total (grains solide + eau).



Figure II.10. Essai de la masse volumique absolue des sables utilisés.

Les résultats obtenus de la masse volumique absolue sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.9 : La masse volumique absolue (ρ_{Abs}) des sables.

	Les sables		
	Sable Tébessa 0/4	Sable Dune 0/1	Sable Carrière 0/5
ρ_{Ab} (g/cm ³)	2.83	2.51	2.71

D'après [Dreux et al 1998] on peut constater que :

- Le sable de Tbéssa est un sable de nature basalte, car sa masse volumique absolue appartient à l'intervalle [2.8 – 3] g/cm³.
- Le sable de dune est un sable de nature calcaire, car sa masse volumique absolue est dans l'intervalle [2.5 – 2.65] g/cm³.
- Le sable de carrière est un sable de nature silex, car sa masse volumique absolue est dans l'intervalle [2.6 – 2.7] g/cm³.

Et d'après la littérature les trois valeurs de la masse volumique absolue sont > 2 g/cm³, donc c'est des granulats designés pour les bétons courants.

II. 3. 2. 4. L'humidité :

L'eau existant dans les agrégats [Sables – Graviers] doit être pris en compte dans la quantité d'eau de gâchage. Pour cela, on doit déterminer cette quantité d'eau par des essais d'humidité.

❖ Equipement utilisé :

- Une balance de précision.
- Un séchoir (étuve).

❖ Mode opératoire :

- Peser une quantité d'environ 2000g pour chaque sable et de même pour chaque gravier, soit (g').
- Les mettre dans des plateaux, sécher jusqu'au poids constant (g).

L'humidité est obtenue, à 0.1% près, par la formule suivante :

$$W = [(g' - g)/g] \times 100\% \dots\dots\dots (II.10)$$

- La valeur adoptée sera la moyenne arithmétique résultant de deux prises d'échantillons différentes [N–E. KEDJOUR 2003].

Les résultats obtenus sont les suivantes :

Tableau II.10 : Résultats des essais d'humidité.

	Les sables			Les graviers	
	S Tébessa 0/4	S Dune 0/1	S Carrière 0/5	G 5/15	G 15/25
W (%)	14.16	1.31	1.69	7.52	0.60

II. 3. 3. Caractéristiques du ciment utilisé : [NA 443]

Le ciment utilisé pour tous les bétons confectionnés dans cette étude est un ciment Portland composé de type (CPJ-CEM II/ A 42,5). Ce ciment est principalement constitué de 75% de Clinker, 5% de gypse et 20% de laitier de haut fourneau, de provenance de la Société des Ciments de « Hdjar – Esoud » (wilaya de Skikda). Ses analyses physiques, chimiques et minéralogiques communiquées par le producteur sont représentées respectivement dans le tableau suivant [Aissaoui. W, 2018] :

Tableau II.11 : Caractérisation de ciment.

Composition chimique (%)		Caractéristique physique	
CaO	58.6	Densité absolue	3.11
Si O ₂	24.92	Densité apparente	1.09
Al ₂ O ₃	6.58	Surface spécifique blaine	3371
Fe ₂ O ₃	3.65	Consistance normale (%)	25.6
MgO	1.21	Début de prise (mn)	123
K ₂ O	0.85	Fin de prise (mn)	180
Na ₂ O	0.08	Expansion à chaud (mm)	1.80
SO ₃	2.17	Refus au tamis 45	17.40
PAF	1.7		
MnO	/		

**Figure II.11.** Sac de ciment utilisé « GICA ».

II. 3. 4. L'eau de gâchage : [NA 1966]

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre laboratoire pédagogique de Génie Civil et d'Hydraulique à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

II. 3. 5. Adjuvant : super-plastifiant le « MEDAPLAST- SP 40 » : [NA 774]

Le super-plastifiant – haut réducteur d’eau (Sp) utilisé est le MEDAPLAST- SP 40 (produit GRANITEX) (voir annexe), qui est conforme à la norme EN 934-2 ainsi qu’aux normes établi par le (CNERIB) en janvier 2007. Ses propriétés sont les suivantes :

- Forme..... Liquide.
- CouleurMarron
- PH 8,2
- Densité1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore< 1g/L



Figure II.12. Photo du superplastifiant utilisé.

II. 3. 6. L'ajout en fumée de silice le « MEDAPLAST HP » : [NF P 18-502]

Le MEDAPLAST HP (voir annexe) est un ajout en poudre pour confection des bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- ✓ D’obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées.
- ✓ D’obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Forme..... Poudre.
- Couleurgris.
- Densité0,5.

- Composants
 - SiO₂ > 85 (%)
 - SO₃..... < 2,5 (%)
 - Cl < 0,5 (%)
- Humidité par étuve à 105°C< 1.
- Taille des produits< 0,1 (microns).



Figure II.13. Photo de la fumée de silice utilisée.

II. 3. 7. Fibre de polypropylène :

On utilise des fibres synthétiques (polypropylène 12/32) commercialisées par la société SIKA appelées SIKAFIBRE.

Les SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32 (voir annexe) sont à base de polypropylène spécialement traité, présentant en sachets pulpables prédosés pour 1 m³ de béton. Ils permettent :



Figure.14. Photo des fibres de polypropylène utilisés.

- ✓ D'améliorer la cohésion du béton à l'état frais,
- ✓ De dissiper l'énergie due aux contraintes de retrait,
- ✓ D'augmenter la résistance aux chocs et l'imperméabilité du matériau durci,
- ✓ D'améliorer le comportement au feu du béton.

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Densité0,91

Nature.....Polypropylène

Longueur.....12 mm

Diamètre.....32 μ m

Résistance à la traction....270 à430 MPa

Module d'élasticité.....3000 à 6000 MPa

II. 4. Fabrication des bétons et conditionnement :

Dans cette partie, on va procéder à l'élaboration d'un béton témoin (BHP) et de trois (BFHP) en caractérisant chaque composition à l'état frais et à l'état durci.

II. 4. 1. Compositions des bétons :

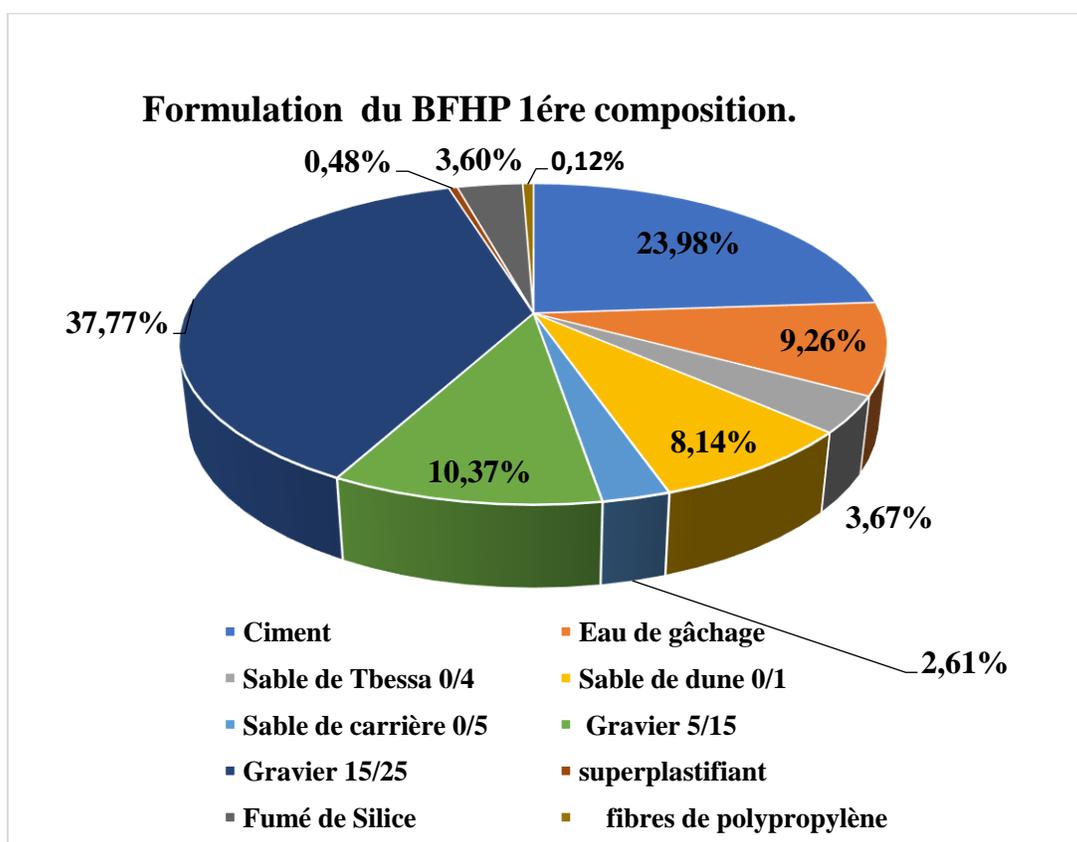
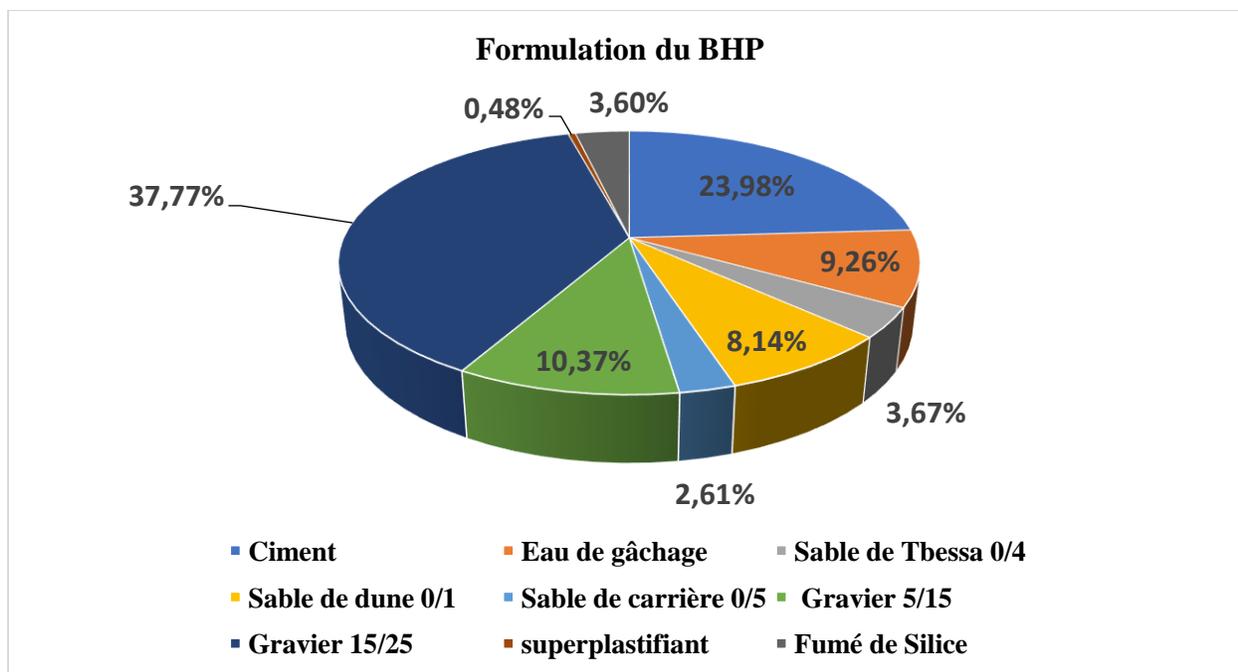
L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différentes granules dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage en cause. Notre choix s'est porté sur la méthode pratique Dreux-Gorisse [Dreux et al 1998], qui est fondée sur deux hypothèses principales :

- Résistance souhaitée fixée au départ.
- Affaissement et dosage en ciment fixés.

Avec quelques modifications :

- Augmentation du dosage en ciment.
- La recherche d'un bon mélange granulaire qui peut nous conduire à une matrice plus compacte.
- Faire des modifications si c'est nécessaire après les résultats au laboratoire.

Pour mieux comprendre les mélanges granulaires des différentes compositions des bétons à testés, on a essayé de les schématiser en secteurs avec le pourcentage de chaque composant.



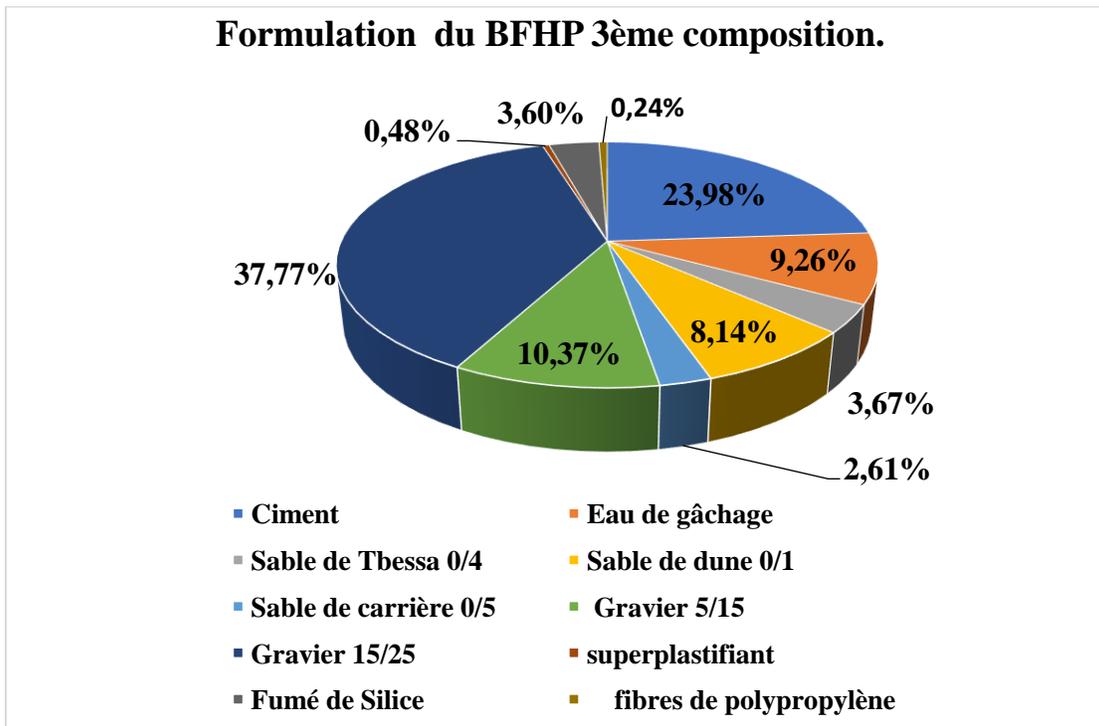
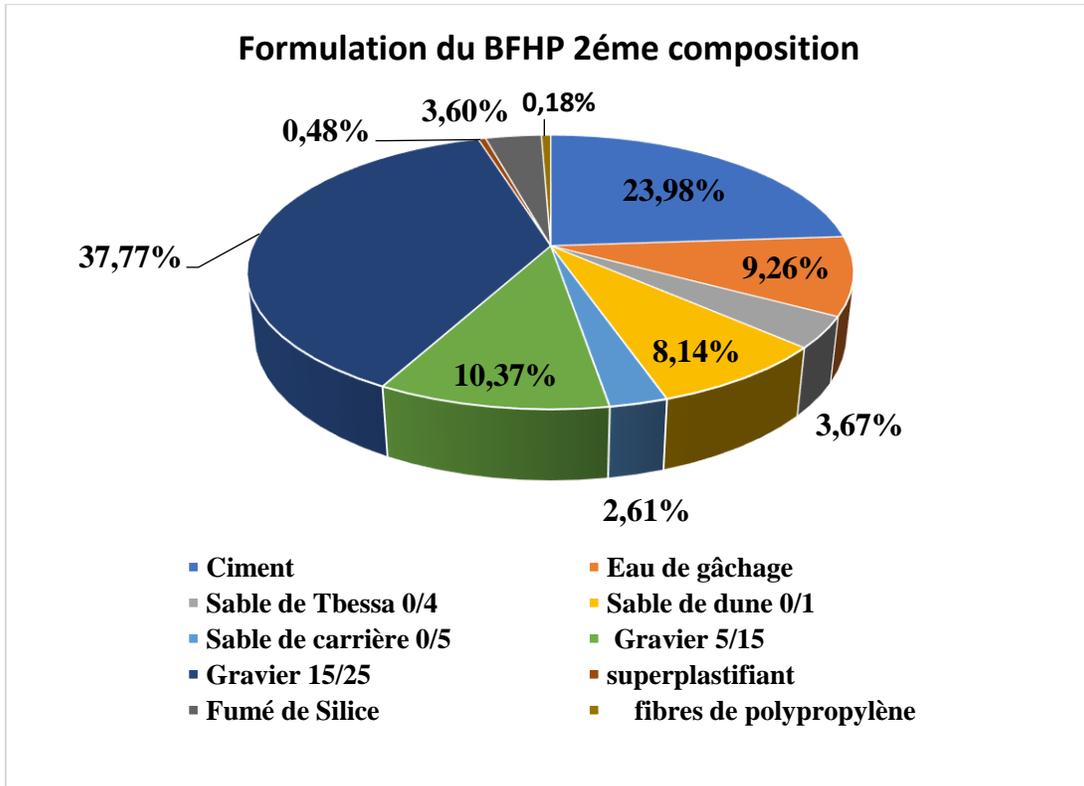


Figure II.15. Secteurs des bétons testés.

La composition du BHP témoin et des trois compositions du BFHP sont récapitulées dans le tableau II.12.

Tableau II.12 : Composition du (BHP) et des (BFHP) étudiés.

		BHP	BFHP
Composants		Quantité en volume (kg/m³) dans 1m³	Quantité en volume (kg/m³) dans 1m³
Ciment		500	500
Eau de gâchage		193.05	193.05
Sable de Tbessa 0/4		76.49	76.49
Sable de dune 0/1		169.60	169.60
Sable de carrière 0/5		549.35	549.35
Gravier 5/15		216.09	216.09
Gravier 15/25		787.39	787.39
Super-plastifiant		10	10
Fumé de Silice		75	75
fibres de polypropylène	1 ^{ère} composition	/	0.6
	2 ^{ème} composition	/	0.9
	3 ^{ème} composition	/	1.2

II. 4. 2. Préparation des moules :

Les moules utilisés ont une forme cubique et des dimensions de (15 x 15 x 15) cm³. Ont été ramenés du laboratoire de recherche de génie civil et d'hydrauliques (LGCH) de l'université 8 Mai1945 de Guelma.

Les moules sont bien nettoyés, montés et bien serrés puis l'huilés avant chaque confection des éprouvettes.



Figure II.16. Photo des moules cubiques utilisés.

III. 4. 3. Gâchage du béton :

Le nombre important d'essais retenus pour caractériser le comportement à haute température des bétons nécessite la préparation d'une quantité conséquente de bétons. Il est donc important de s'assurer de la reproductibilité des gâchées à différentes périodes de la journée ou de l'année. Pour y parvenir, nous avons mis en place un protocole précis basé essentiellement sur la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams, pour assurer la similarité des gâchées.

Nous rappelons ci-après la procédure de fabrication tout en respectant les références normatives [NF EN 12390-1]; [NF EN 12390-2].

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est une bétonnière à axe incliné de marque GUYNOEL avec cuve tournante ; sur les parois intérieures sont fixées des palettes hélicoïdales assurant le brassage du mélange et permettant la vidange par inversion du sens de rotation. D'une capacité de 120 litres.



Figure II.17. Photo du malaxeur de béton utilisée.

Les séquences de malaxage suivies sont les suivantes :

- ✓ On commence par un mélange des granulats secs pendant 30 secondes.
- ✓ Introduction du ciment et fumé de silice et malaxage pendant 1 minute.
- ✓ On verse 1/2 de l'eau de gâchage pendant 1 minute avec un malaxeur toujours en marche.
- ✓ On ajoute progressivement le 1/2 d'eau restant, mélangé avec le super-plastifiant afin d'assurer une bonne dispersion de l'adjuvant, et on laisse tourner pendant 3 minutes.
- ✓ Ajouter les fibres, cette opération se fait manuellement et d'une manière progressive afin d'éviter la formation d'oursins.

Pour le BHP : Le protocole de fabrication est le même que les trois BFHP en éliminant l'étape de l'ajout des fibres.

II. 5. Essais sur béton à l'état frais :

II. 5. 1. Affaissement au cône d'Abrams : [NA 5102]

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il se réalise à l'ordre suivant :

- ✓ Introduire le béton dans le moule tronconique légèrement l'huilé en trois couches égales, placé au-dessus d'une plaque humidifiée.
- ✓ Piquer chaque couche 25 coups avec une tige de $\Phi = 16\text{mm}$.
- ✓ Raser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule.
- ✓ Démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre.



Figure II.18. Mesure de l'affaissement avec le cône d'Abrams.

Les résultats de l'affaissement obtenus pour les bétons testés sont les suivants :

Tableau II.13 : L'affaissement des bétons étudiés.

	Les bétons			
	BHP	BFHP1	BFHP2	BFHP3
Affaissement (cm)	12	14	17	22

D'après les résultats de l'affaissement au cône d'Abrams on peut constater que :

- Le BHP et le BFHP1 sont des bétons très plastique qui nécessite une vibration faible destinés de préférence pour les ouvrages courants à résistances élevés.
- Le BFHP2 et le BFHP3 sont des bétons fluides qui nécessite juste un léger piquage pour leur emplacement destiné pour les fondations profondes et les dalles ainsi que pour les voiles minces.

II. 5. 2. Confection des éprouvettes :

Pour la confection des gâchés, nous avons utilisé plusieurs équipement et fournitures courants afin d'avoir un composant bien homogène (malaxeur, balance, récipient, spatules, truelles, huiles de coffrage..).

On remplit les moules, qui sont préalablement huilés afin de permettre un décoffrage plus facile, en une seule couche pour les éprouvettes cubiques (15x15x15) cm³ des bétons testés, vibrées suivant le serrage conseillé pour chaque ouvrabilité.

II. 5. 3. Conservation des éprouvettes : [NA 5033]

Les éprouvettes cubiques démoulés des moules après 24 heures marquées puis conservées à l'eau jusqu'à l'âge de 21 jours, puis conservées à l'air mais couvertes avec un plastique pour éviter le retrait jusqu'à l'âge de 28 jours débuts des essais, de cette date et au-delà la conservation est au milieu ambiant du laboratoire.



Figure II.19. Photo du bassin de la conservation des éprouvettes.

II. 6. Traitement thermique et programme des essais :

II. 6. 1. Cycle de chauffage – refroidissement :

Le chargement thermique se fait en trois phases : la phase de montée en température à la vitesse de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à la température de consigne, le palier à température constante pendant une heure, et la phase de refroidissement.

Le palier à température constante permet d'uniformiser la température au sein de l'éprouvette et de stabiliser la masse de l'éprouvette. Le refroidissement des éprouvettes se fait naturellement à l'intérieur du four maintenu fermé. La (figure II.19) montre les phases du chargement thermique.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi un cycle de chauffage – refroidissement de la température ambiante jusqu'à la température de (250°C). Afin de déterminer la résistance en compression, la résistance en traction, la vitesse des ultrasons (le module d'élasticité dynamique), ainsi que la perte de la masse des bétons étudiés en fonction de cette température. Cette température a été choisie suivant le four disponible au niveau de notre laboratoire.

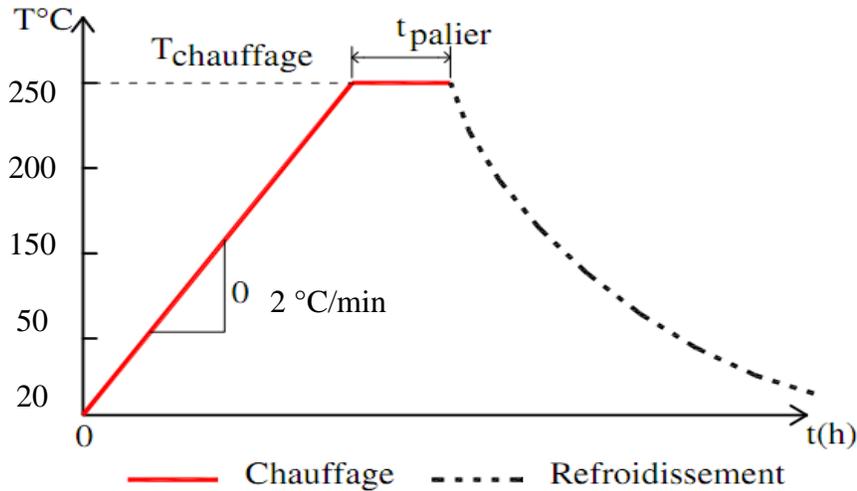


Figure II.20. Courbe de chargement thermique.

II. 6. 2. Equipment utilisé :

Un four industriel permet d'obtenir une chaleur intense, obtenue grâce à de l'énergie thermique ou électrique. Convainc avec son séchage délicat dû à une distribution thermique homogène.



Figure II. 21. Photo du four utilisé.

II. 6. 3. Programme des essais :

Chaque composition de béton et chaque cycle thermique (20°C, 250°C) nécessite l'utilisation de trois éprouvettes qui seront testés à : la pesée, l'essai ultrasonique, l'essai de la compression et l'essai de la traction.

II. 6. 3. 1. Essais réalisés à l'âge de 28 jours (20°C) :

Avant la réalisation des essais programmés à haute température, il faut caractériser les deux bétons (BHP, BFHP) à l'âge de 28 jours à la température d'ambiance (20°C). Cette caractérisation est la référence pour l'étude l'effet de la température sur les bétons fibrés.

Les résultats de ces essais seront regroupés dans le tableau II.13 après une brève explication de chaque essai.

II. 6. 3. 1. 1. Suivi du poids :

Avant de procéder aux autres essais programmés dans ce travail chaque éprouvette doit être pesée.

II. 6. 3. 1. 2. Contrôle non destructif par ultrasons : [EN 12504-4]

❖ **Principe :**

Il s'agit d'évaluer la résistance du béton à partir de la vitesse de propagation d'ondes. Il est en effet reconnu et prouvé qu'il existe un rapport étroit entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à l'intérieur de matériaux homogènes, et la qualité de ceux-ci.

La vitesse est le quotient entre la distance séparant les transducteurs émetteur et récepteur par le temps de propagation de l'onde.



Figure II.22: Essai non destructif ultrasonique (transmission directe).

Après les mesures des vitesses ultrasoniques on peut estimer le module d'élasticité dynamique en utilisant la formule empirique suivante :

$$E_d = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho \cdot V^2 \dots\dots\dots (II.11)$$

Avec :

ν : Coefficient de Poisson ;

ρ : Masse volumique en kg/m^3 ;

V : Vitesse de propagation d'onde en m/s.

II. 6. 3. 1. 3. Résistance à la compression (essai d'écrasement) : [NA 5076]

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de nos bétons.

La presse utilisée répond aux normes NA 5076, elle comporte deux parties :

- ✓ Unité de commande constituée de :
 - Un cadran pour valeur maximal de charge ;
 - Interrupter principal;
 - Commande de réglage de la vitesse ;
 - Clapet de charge – décharge.
- ✓ Unité de pression : où on met l'éprouvette d'essai.



Figure II.23. Photo de la presse utilisée du (LGCH).

L'essai lui-même doit être conduit rigoureusement pour obtenir de bons résultats. On observera en particulier :

- ✓ Un bon centrage de l'éprouvette.
- ✓ Une vitesse de chargement donnée.
- ✓ On met la presse en marche de nouveau avec la même vitesse (0.5 KN/s) jusqu'à la rupture, on décharge et on note la charge de rupture **F** et la résistance **R_c**.

On calcule la résistance avec cette formule :

$$R_c = F/S \dots\dots\dots (II.12)$$

R_c: résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm²).

II. 6. 3. 1. 4. Résistance à la traction par fendage : [NA 430], [mbodj93]

❖ **But de l'essai :**

Déterminer la résistance à la traction par fendage d'éprouvettes cylindriques ou cubique de béton durci.

❖ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette de béton durci à un effort de compression appliqué sur une zone étroite au moyen d'un dispositif de fendage qui permet la rupture de l'éprouvettes.

❖ **Appareillage et éprouvettes :**

- ✓ Machine de compression.
- ✓ Dispositif de fendage.
- ✓ Bandes de chargement.
- ✓ Les éprouvettes essayées sont de forme cubique.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Essayer toute humide ou corps étrange de l'éprouvette, des bandes de chargement et des plateaux de la machine.
- ✓ Placer le dispositif de fendage dans la machine de compressions placer l'éprouvettes mettre les bandes de chargements puis centrer l'ensemble entre le plateau inférieur et supérieur de la machine.
- ✓ Choisir une vitesse de 0,05 MPa/s puis mettre en charge.

La résistance en traction sera

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \dots\dots\dots (II.13)$$

D'où

- f_{tj}** : est la résistance en traction par fendage en MPa ;
- P** : est la charge maximale en N ;
- L** : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette en mm ;
- D** : est le diamètre de l'éprouvette en mm.

Tableau II.14 : Caractérisation des bétons étudiés à 28 jours et à 20 °C.

	BHP	BFHP 1	BFHP 2	BFHP 3
M_{moy28} (Kg)	7,99 ± 0,26	7,98 ± 0,06	8,10 ± 0,06	8,076 ± 0,65
V_{moy28} (m/s)	4460,62 ± 92,72	4358,66 ± 51,41	4245,88 ± 124,76	4372,88 ± 88,62
E_{d28} (MPa)	47860,13 ± 1691,45	44810,508 ± 851,90	41821,24 ± 1985,93	44496,76 ± 205,73
f_{C28}(MPa)	70,11 ± 5,078	68,42 ± 1,02	44,91 ± 6,14	62,694 ± 3,68
f_{t28}(MPa)	2,11 ± 0.15	1,72 ± 0.02	2,68 ± 0.36	2,64 ± 0.11

II.7. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation du BHP et des BFHP, leurs propriétés physico-chimiques ont été déterminées et les procédures expérimentales exposées.

Les méthodes de formulations des bétons utilisés prennent en compte les caractéristiques des matières premières utilisées. Les compositions des bétons étudiés ont été formulées selon la méthode de Dreux Gorisse avec quelques modifications. La confection des mélanges a été effectuée selon les normes en vigueur. Après caractérisation du BHP et des BFHP, le chapitre suivant discutera les résultats obtenus.

Chapitre III :

Résultats et

Interprétations

III. 1. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter les différents résultats expérimentaux obtenus durant la période de la réalisation de ce projet de fin d'étude. Les essais ont été réalisés en collaboration entre les deux laboratoires de génie civil et d'hydraulique (pédagogique et de recherche) de l'université 8 mai 1945 de Guelma.

Afin de répondre aux problématiques posées, un programme expérimental a été envisagé. Quatre mélanges ont été préparés ; un BHP témoin et trois autres BFHP avec des différents dosages de fibre de polypropylène (F. PP) qui varient de 600 g/m^3 (0.12%), 900 g/m^3 (0.18%) et 1200 g/m^3 (0.24%) respectivement pour chaque béton.

A partir des essais non destructifs et destructifs faisant suite au traitement thermique des quatre bétons, nous tentons par cette étude, en première étape d'interpréter les résultats obtenus pour les différents bétons à la température étudiée (l'effet des fibres) et en deuxième étape d'exploiter ces résultats pour en tirer les conclusions adéquates. On procèdera à des comparaisons du comportement des quatre bétons utilisés et à des corrélations entre les propriétés résiduelles de ces bétons à la température cible.

III. 2. Influence de la température sur les bétons fibrés :

III. 2. 1. L'effet de l'ajout des fibres :

En vas commencer en premier lieu a étudié l'effet de l'ajout des fibres polypropylène (FPP) sur la masse comme caractéristique physique et sur : la vitesse ultrasonique, module d'élasticité dynamique, résistance à la compression et à la traction comme caractéristiques mécaniques. Les différents résultats sont regroupés dans des tableaux et illustrés par des figures ci-dessous.

III. 2. 1. 1. La masse :

Tableau III. 1 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur la masse (M_{20}).

	BHP	BFHP1	BFHP2	BFHP3
20°C	7,993±0,267	8,143 ±0,063	8,101 ± 0,066	8,076±0,656

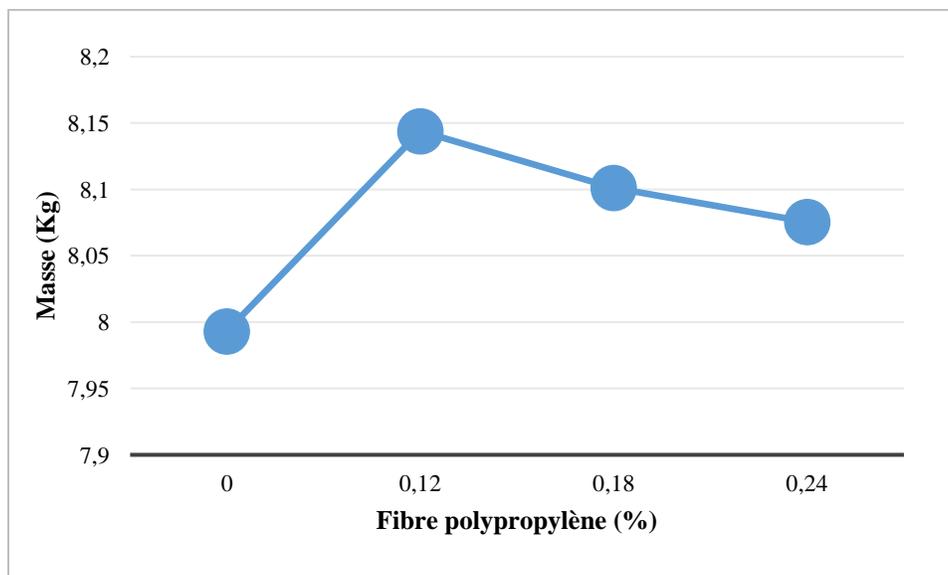


Figure III.1. Evolution de la masse (M_{20}) en fonction des fibres polypropylène.

- Pour le BFHP1 on remarque une augmentation très remarquable par rapport aux deux autres bétons fibrés, malgré que c'est le béton qui contient moins de fibre. Ce qui peut être expliqué par l'emplacement des fibres sans aucun remplacement des constituants de la matrice.
- Le BFHP2 de 0.18% de fibres polypropylène a marqué aussi une augmentation de la masse par rapport à la masse du BHP témoin, et une diminution de cette dernière par rapport au BFHP1 de 0.12% de fibres polypropylène. Du même le BFHP3 de 0.24% de FPP par rapport au BHP témoin et aux (BFHP1, BFHP2).
- On peut conclure que au-delà d'un ajout de 0.12% de fibres polypropylène la masse diminue en fonction du pourcentage des fibres, pour atteindre la masse du BHP témoin à un pourcentage à déterminer. En plus, on peut dire aussi que les fibres au-delà de ce pourcentage remplacent un certain volume de la matrice.

III. 2. 1. 2. La vitesse :

Tableau III.2 : Effet de l’ajout des fibres polypropylène sur la vitesse ultrasonique (V_{20}).

	BHP	BFHP1	BFHP2	BFHP3
20°C	4460,625 ± 92,720	4358,667 ± 51,415	4245,889 ± 124,760	4372,889 ± 88,622

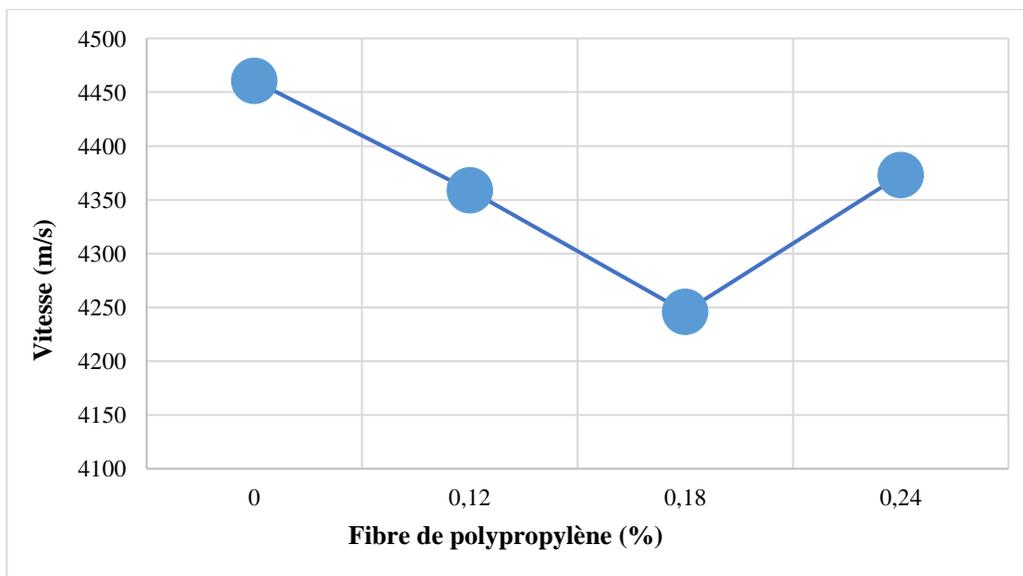


Figure III.2. Evolution de la vitesse ultrasonique (V_{20}) en fonction des fibres.

- On remarque que la vitesse ultrasonique diminue en fonction du pourcentage des fibres polypropylène jusqu’au 0.18% (BFHP2) pour augmenter au-delà.
- On a remarqué une perturbation lors des essais ultrasoniques (valeurs des vitesses non stables) qui confirme les remarques citées à la littérature concernant la perturbation des ondes soniques à la présence des fibres polypropylène. Mais on a essayé à prendre les valeurs qui figures plusieurs fois sur l’écran.

III. 2. 1. 3. Le module d’élasticité dynamique :

Tableau III.3 : Effet de l’ajout des fibres polypropylène sur le module d’élasticité dynamique (E_{dyn20}).

	BHP	BFHP1	BFHP2	BFHP3
20°C	47860,135±1691,453	44810,508 ± 851,905	41821,248 ± 1985,935	44496,768 ± 2058,731

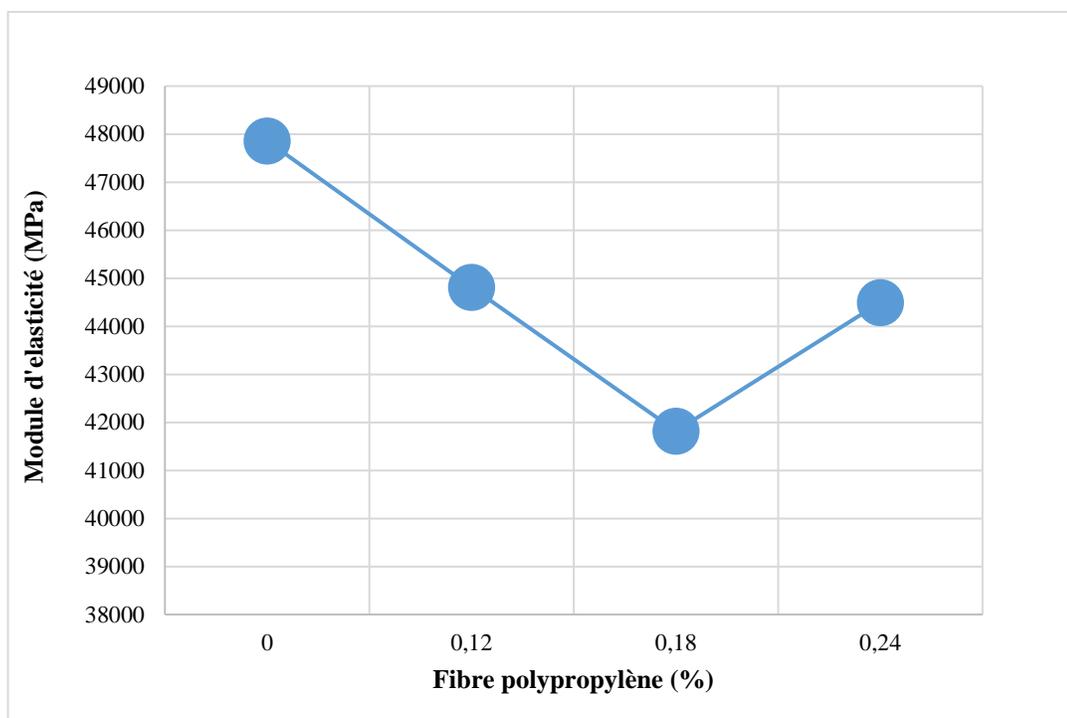


Figure III. 3. Evolution du module d'élasticité dynamique (E_{dyn20}) en fonction des fibres.

- L'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction des fibres est similaire à celle de la vitesse ultrasonique à force de la relation entre les deux caractéristiques.
- Alors on constate que l'incorporation de 0.18% de fibre polypropylène diminue le module d'élasticité dynamique de 12.62% à celui du BHP témoin.
- Par contre l'incorporation de 0.12%, 0.24% de fibre polypropylène diminue le module d'élasticité dynamique respectivement de 6.37%, 7.03% à celui du BHP témoin.

III. 2. 1. 4. La résistance à la compression :

Tableau III.4 : Effet de l'ajout des fibres polypropylène sur la résistance à la compression (f_{c20}).

	BHP	BFHP1	BFHP2	BFHP3
20°C	70,119 ± 5,0784	68,424 ± 1,0234	44,91 ± 6,143	62,694 ± 3,687

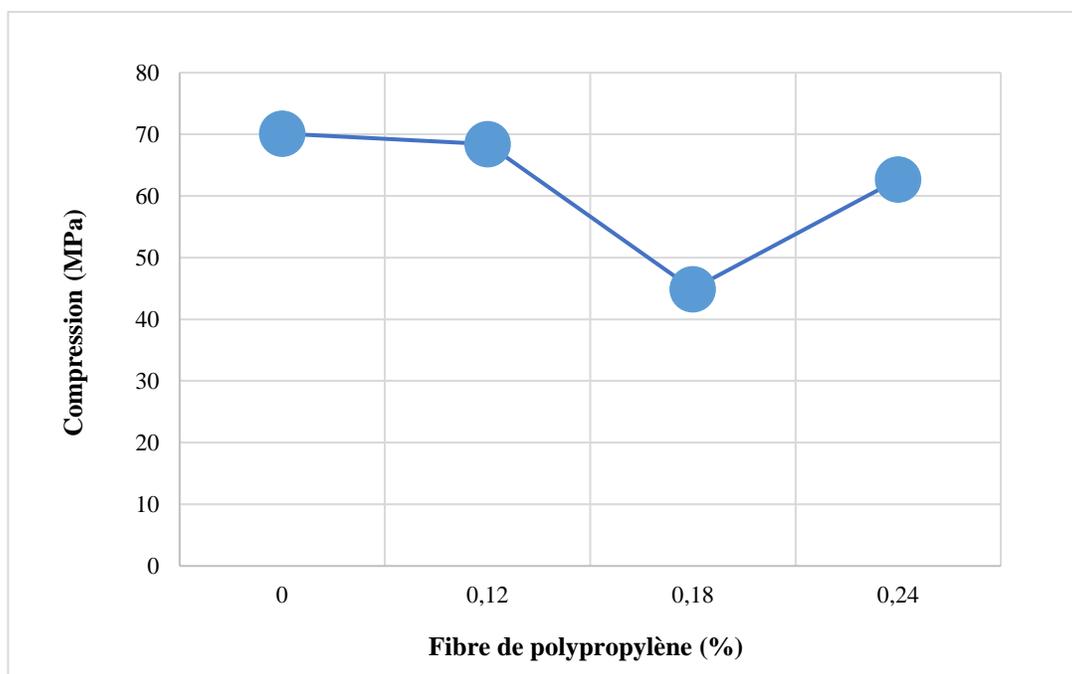


Figure III.4. Evolution de la résistance à la compression (f_{c20}) en fonction des fibres.

- La résistance à la compression a légèrement chuté (2.42%) pour une incorporation de 0.12% de fibre polypropylène, par contre à l’incorporation de 0.18% (FPP) la chute de la résistance est très remarquable (35.95%) par rapport à la résistance à la compression du béton témoin (BHP).
- La chute de la résistance à la compression du BFHP3 est 10.59% par rapport à celle du béton témoin (BHP).
- En ce qui concerne la rupture de la matrice on a remarqué une rupture même aux granulats conformément à la littérature pour les quatre bétons, avec la présence des fibres comme des fils de cheveux qui tiennent les morceaux du béton fibré après rupture (figure III.6).

III. 2. 1. 5. La résistance à la traction :

Tableau III.5 : Effet de l’ajout des fibres polypropylène sur la résistance à la traction (f_{t20}).

	BHP	BFHP1	BFHP2	BFHP3
20°C	2,114± 0.153	1,726± 0.026	2,681± 0.367	2,644± 0.115

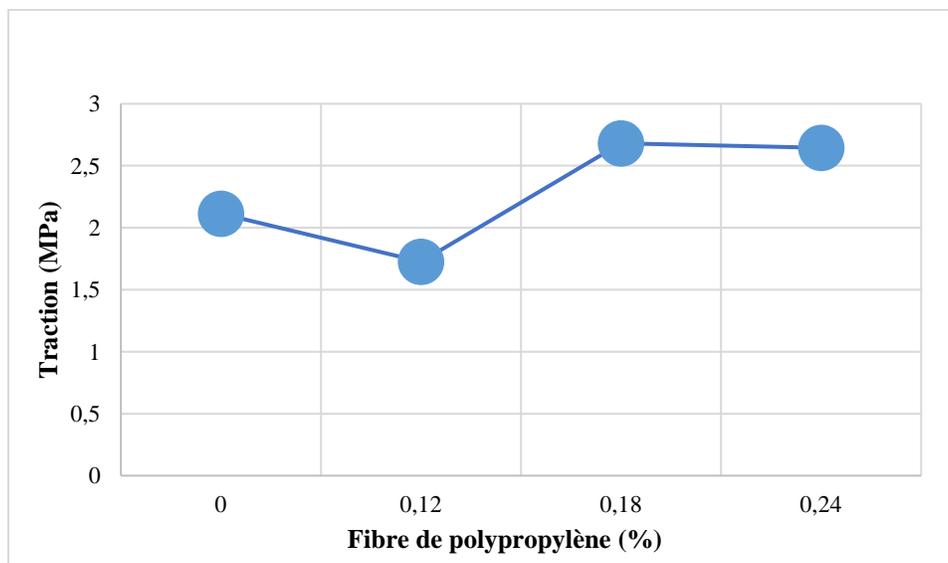


Figure III.5. Evolution de la résistance à la traction (f_{t20}) en fonction des fibres.

- On remarque clairement que l'incorporation de 0.12% de fibre polypropylène (BFHP1) a diminué la résistance à la traction de 18.35% par rapport à celle du béton témoin (BHP), par contre l'incorporation de 0.18% (BFHP2) de FPP a augmenté la résistance de 26.82% par rapport à la résistance à la traction du béton témoin (BHP). Avec une légère diminution pour une incorporation de 0.24% (BFHP3) de FPP par rapport au (BFHP2).
- En ce qui concerne la rupture de la matrice la même remarque citée ci-dessus pour la résistance à la compression (figure III.7).



BHP



BFHP 1



BFHP 2

BFHP 3

Figure III.6. Rupture des éprouvettes à la compression des différent béton à 20°C.



BHP

BFHP 1



BFHP 2

BFHP 3

Figure III.7. Rupture des éprouvettes à la traction par fendage des différent béton à 20°C.

III. 2. 2. L'effet de la température :

Les résultats des essais effectués après le cycle thermiques (250°C) et à la température d'ambiance (béton de référence) sont regroupés dans les tableaux qui suivent et illustrés par les figures ci-dessous. Ces résultats concernent la masse, les résistances à la compression et à la traction ainsi que la vitesse ultrasonique et le module élastique dynamique.

Tableau III.6 : Effet de la température sur des propriétés résiduelles des différents bétons.

T (°C)	M (kg)	V (m/s)	Ed (MPa)	fc (MPa)	ft (MPa)
BHP					
20°C	7,993 ± 0,267	4460,62 ± 92,72	47860,13 ± 1691,45	70,11 ± 5,07	2,11 ± 0
250°C	7,98 ± 0,24	4352,8 ± 170,30	44911,63 ± 3577,63	50,11 ± 8,04	1,98 ± 0,67
BFHP1					
20°C	8,14 ± 0,06	4358,66 ± 51,41	44810,50 ± 851,90	68,42 ± 1,02	1,72 ± 0
250°C	8,05 ± 0,06	4365,4 ± 82,39	45129,63 ± 1711,48	59,63 ± 2,26	3,21 ± 0,09
BFHP2					
20°C	8,10 ± 0,06	4245,88 ± 124,76	41821,25 ± 1985,93	44,91 ± 6,14	2,681 ± 0
250°C	8,038 ± 0,06	4378,6 ± 71,34	45399,67 ± 1478,57	69,45 ± 8,09	3,91 ± 0
BFHP3					
20°C	8,07 ± 0,65	4372,88 ± 88,62	44496,76 ± 2058,73	62,69 ± 3,68	2,644 ± 0
250°C	8,01 ± 0,08	4443,4 ± 156,38	46789,77 ± 3327,34	54,96 ± 14,12	4,11 ± 0,72

Et pour une meilleure interprétation, les résultats sont présentés sous forme de rapports des différentes propriétés à la température étudiée par rapport aux résultats du béton de référence à 20°C. Les rapports obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous et illustrés par les figures ci-après. Et comparais aux résultats normatifs, celles de Eurocode (EC2) et du Document unifiée (DTU).

Tableau III.7 : Rapport des différentes propriétés résiduelles en fonction de la température.

Propriétés	BHP	BFHP 1	BFHP 2	BFHP 3
M (kg)	0,988 ± 0,003	0,9917 ± 0,034	0,9913±0,007	0,9912 ± 0,005
V (m/s)	0,988±0,053	1,003 ± 0,017	1,042± 0,036	1,025± 0,019
Ed (MPa)	0,941 ± 0,105	1,007± 0,034	1,088 ± 0,076	1,050 ± 0,040
fc (MPa)	0,719±0,148	0,786 ± 0,147	1,560 ± 0,224	0,872 ± 0,186

ft (MPa)	0,937±0,317	1,860 ± 0,054	1,458 ± 0	1,557 ± 0,274
-----------------	-------------	---------------	-----------	---------------

III. 2. 2. 1. La masse :

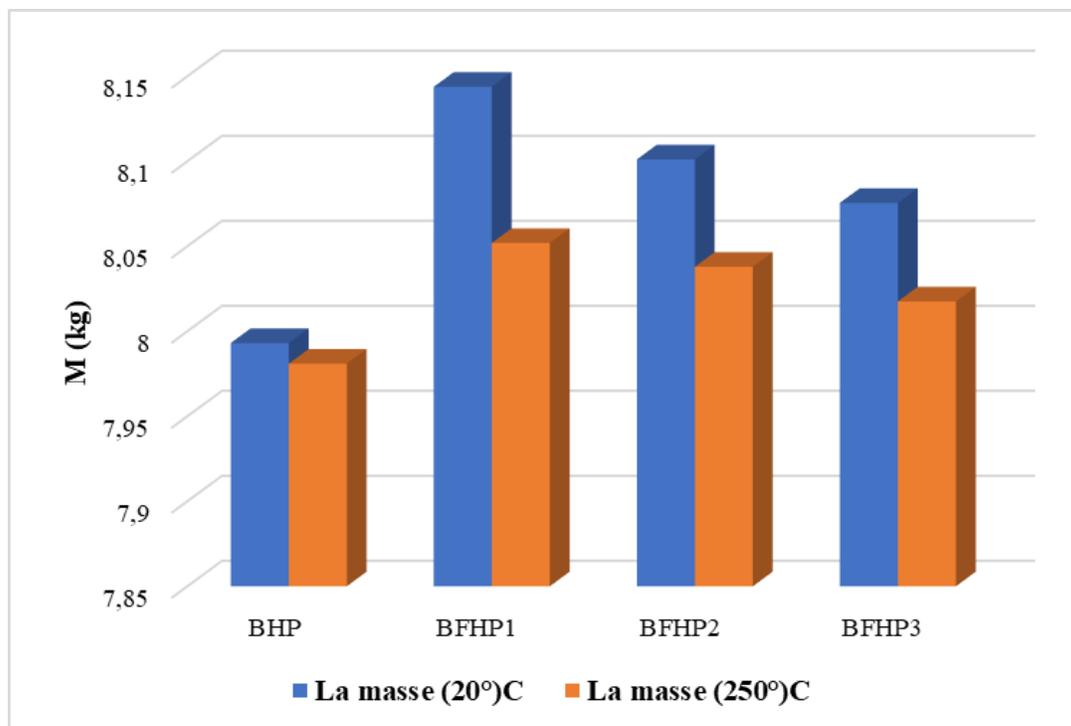


Figure III.8. Perte de la masse à 250°C.

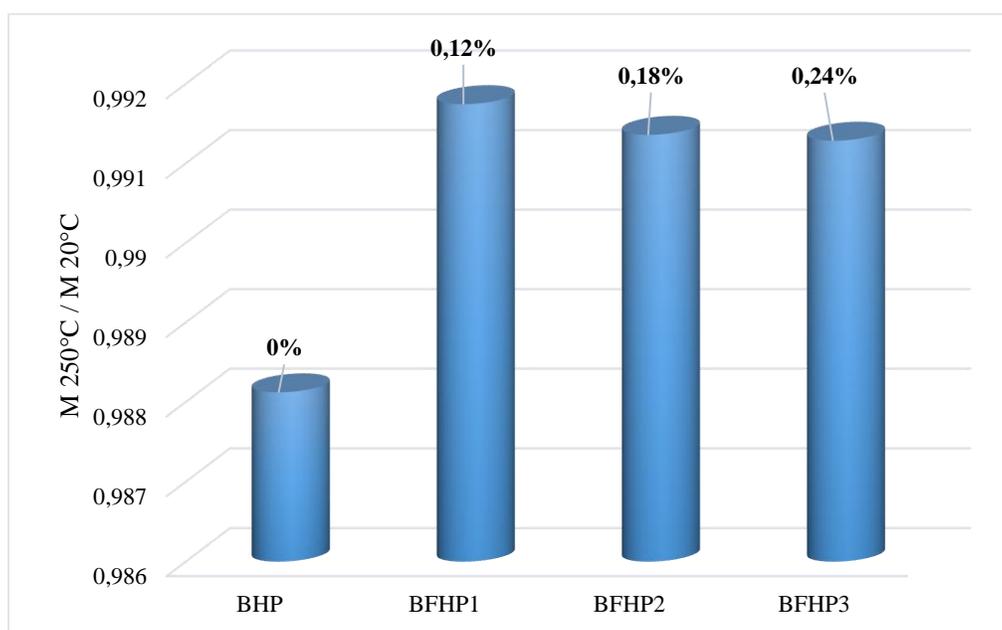


Figure III. 9. Rapport de la masse à 250°C.

- La perte de masse du BHP (0.62%) est la plus petite par rapport aux autre bétons fibrés, les BFHP1 et BFHP2 ont presque la même perte de masse (0.76%, 0.74%), par contre le BFHP1 présente une perte de (1.10%). Cela s'explique notamment par la teneur en eau libre volumique des éprouvettes avant chauffage et aussi, probablement, par un effet favorable des FPP pour le transport d'humidité.
- La perte de masse du quatre bétons est presque nulle à 250°C, elle n'a pas dépassé les 2%, celle valeur est un peu moins que celle trouver par [Chouiter. Y, 2016] ceci est dû à la meilleure compacité de ces bétons et à leur porosité très faible résultant d'un rapport E/C faible.

III. 2. 2. 2. La vitesse :

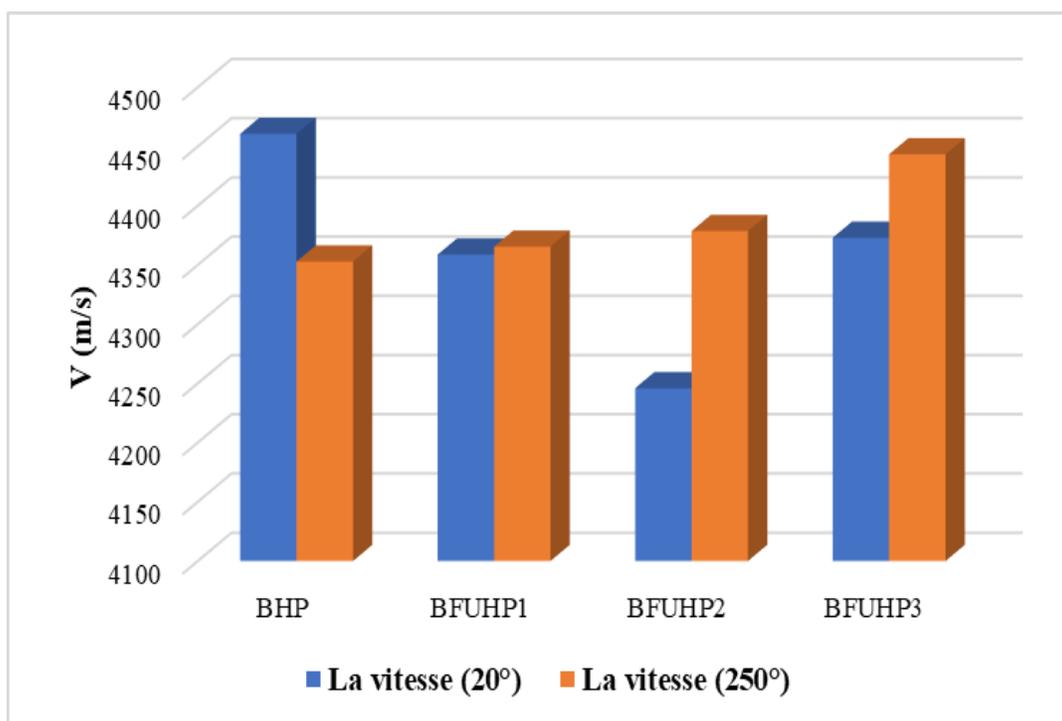


Figure III.10. Perte de la vitesse ultrasonique à 250°C.

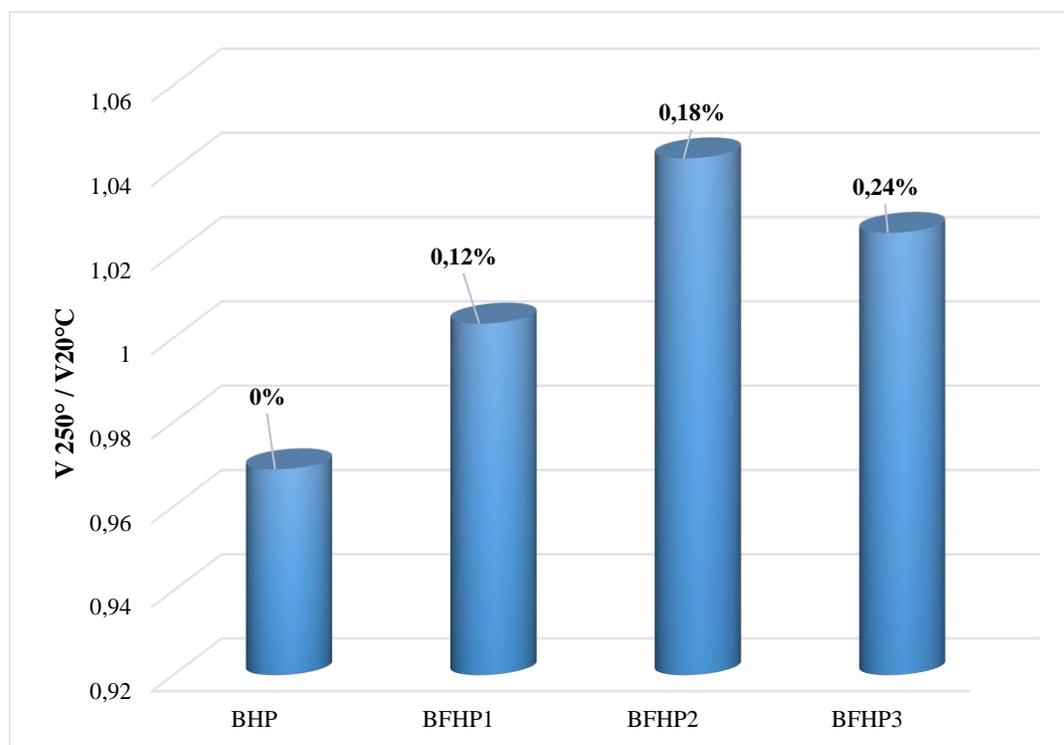


Figure III. 11. Rapport de la vitesse ultrasonique à 250°C.

- Après le cycle thermique 250°C, on remarque une diminution des vitesses des ultrasons de l'ordre de 2.42% pour le BHP, une valeur plus basse que d'autres auteurs [Aidoud. A, 2018] (9%), qu'on peut l'expliquer par une matrice plus compacte.
- Par contre pour les trois bétons fibrés on remarque une augmentation de (0.15%, 3.12%, 1.61%) respectivement pour (BFHP1, BFHP2, BFHP3), cette résultats qui n'est pas logique confirme que l'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire engendre plus d'hétérogénéité dans le béton ce qui fait ralentire et disperser les ondes ultrasonique [Chouiter. Y, 2016].

III. 2 .2. 3. Le module d'élasticité :

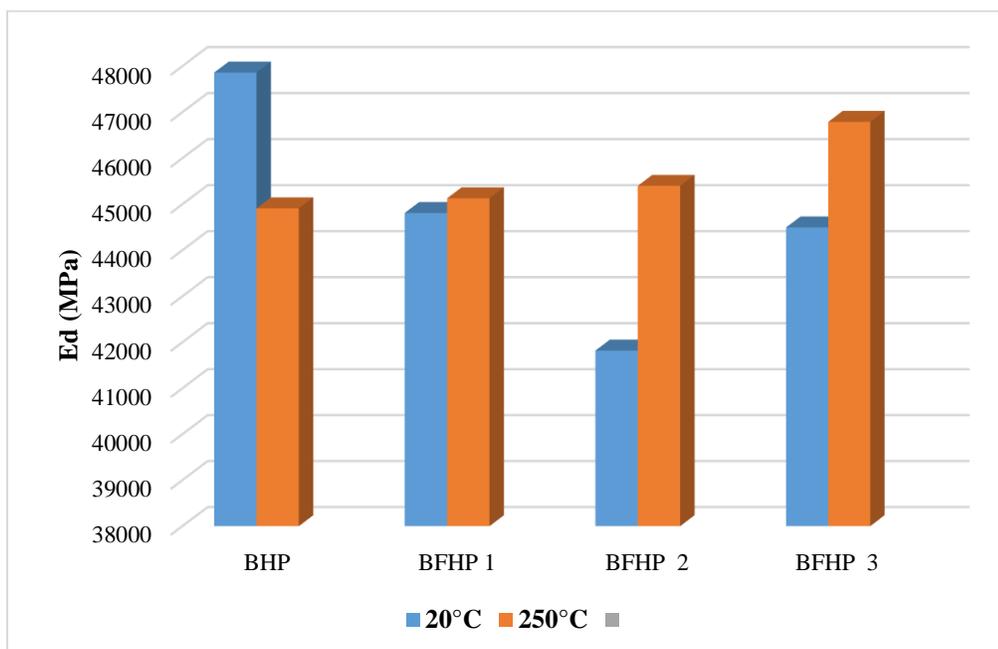


Figure III. 12. Perte du module d'élasticité dynamique à 250°C.

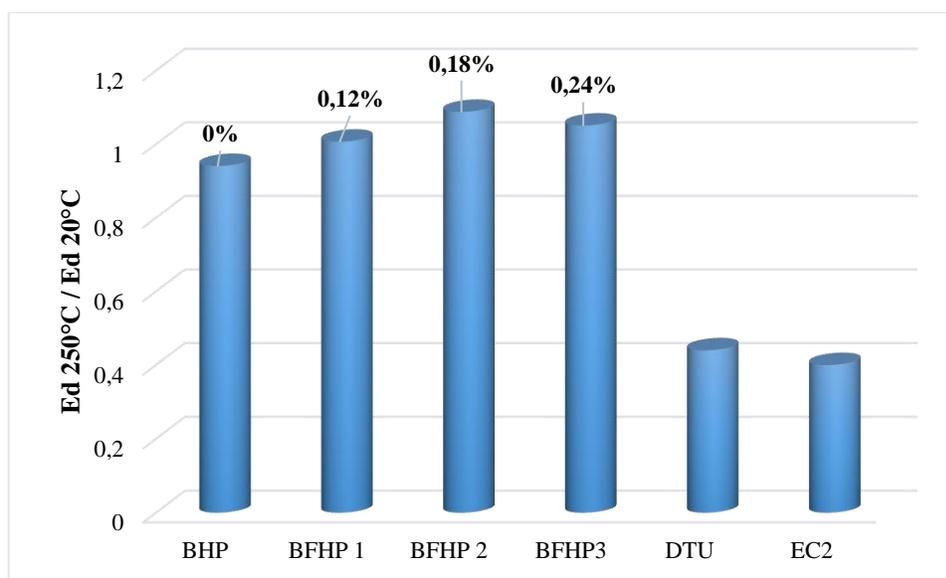


Figure III.13. Rapport du module d'élasticité dynamique à 250°C.

- Les remarques sont similaires à ceux des vitesses ultrasoniques. On peut dire que la perte du module d'élasticité dynamique à 250°C a atteint 5.9% pour le BHP. Cette perte représente jusqu'à cette température le double de celle de la vitesse des ultrasons tout en respectant la proportionnalité avec elle, conformément aux résultats de [Aidoud. A, 2018] mais avec des valeurs différentes.
- Et toujours les trois bétons fibrés ont marqués des augmentations du module d'élasticité dynamique à 250°C de (0.7%, 8.8%, 5%) respectivement pour (BFHP1, BFHP2, BFHP3).
- Tous les rapports déterminés pour les quatre bétons présente des valeurs plus élevées que celles du DTU et de l'EC2 à la température (250°C), et même plus que le double. Mais il faut remarquer que nous modules élastiques sont déduits à partir des vitesses des ultrasons (modules dynamiques) donc les résultats dépendent aussi des modes opératoires et formules utilisées comme l'indiquent Pimienta et al. [Pimienta et al 2012].

III. 2. 2. 4. La résistance à la compression :

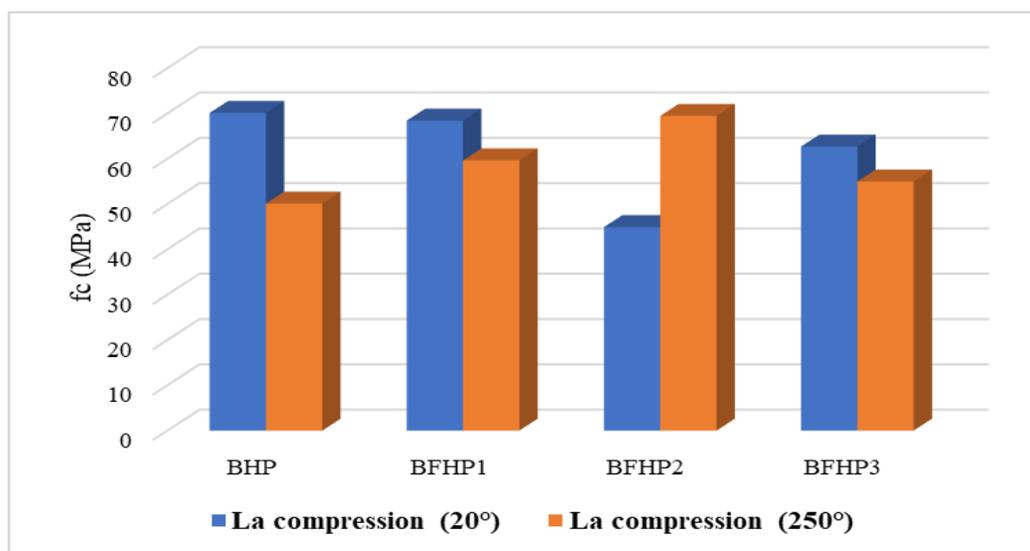


Figure III.14. Perte de la résistance à la compression à 250°C.

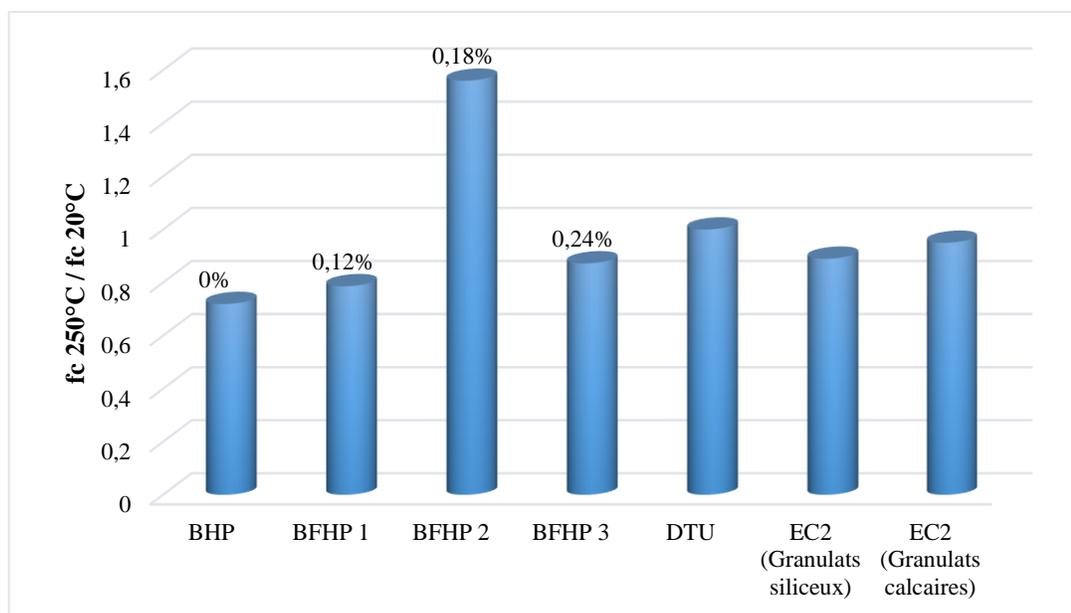


Figure III.15. Rapport de la résistance à la compression à 250°C.

- Trois bétons présentent à 250°C, des chutes de résistances à la compression relativement moins importantes. Pour ce niveau de température. Elles atteignent les 28.1% pour le BHP Témoin, 21.4% pour le BFHP1 et pour le BFHP3 12.8%. Ces chutes sont relativement proches à ceux avancées par l'Eurocode où elles ne dépassent pas les 25%.
- Par contre le BFHP2 présente une amélioration remarquable (56%) à cette température et avec une incorporation de 0.18% de (FPP). Donc on peut constater que l'effet de l'ajout de 0.18% des (FPP) est plus favorable après un cycle de 250°C que celui à 20°C.
- L'évolution en fonction du pourcentage (FPP) de la résistance à la compression après 250°C a subi une légère augmentation sur le palier (0% à 0.12%), puis un saut au point de (0.18%) de (FPP), pour chuté à (0.24%) de (FPP).
- Les valeurs des rapports déterminées pour les trois bétons sont avoisinantes et plus faibles que les valeurs de DTU et de EC2 (siliceux ou calcaires).
- Après 250°C les fibres polypropylène sont devenue comme une colle, ça été remarquer après les différentes ruptures des éprouvettes (figure III.16). [Yagoub. M, 2009] indique que les (FPP) fusionne à environ 160 °C.



Figure III.16. Rupture des éprouvettes par compression à 250°C.

III. 2. 2. 5. La résistance à la traction :

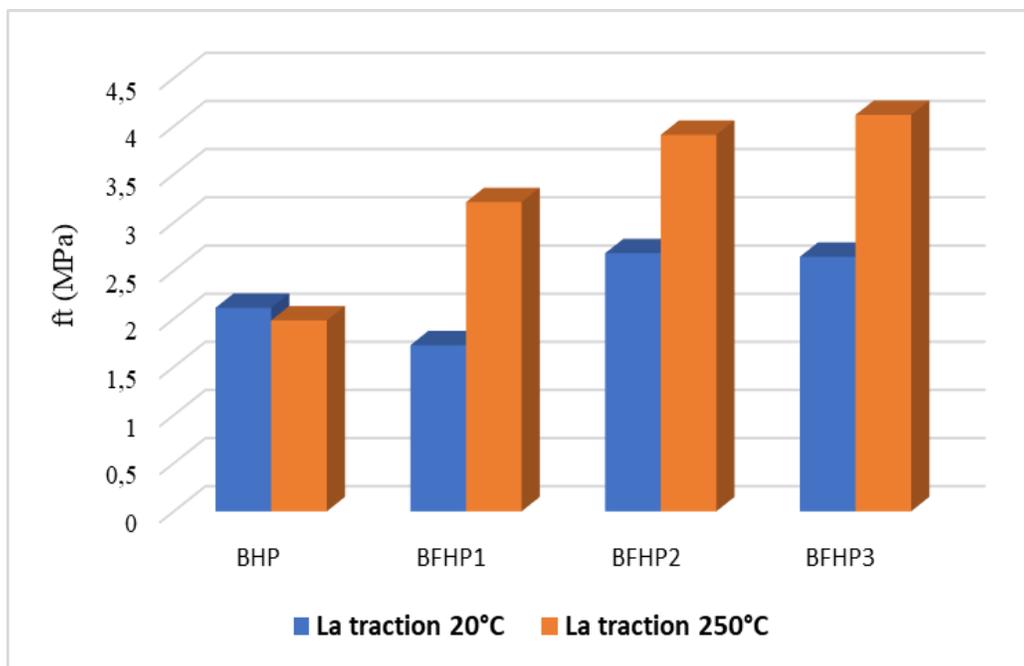


Figure III.17. Perte de la résistance à la traction à 250°C.

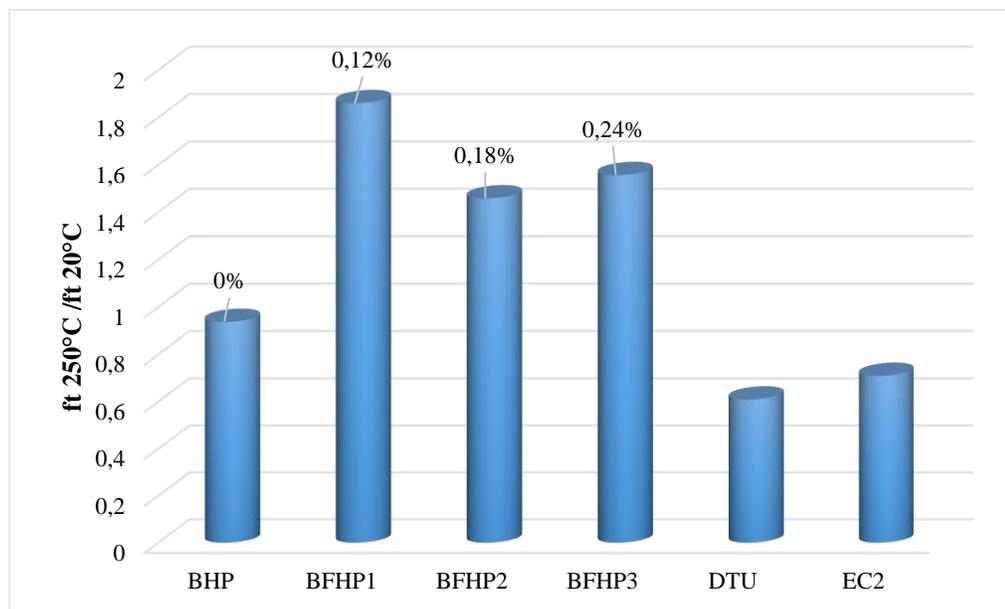


Figure III.18. Rapport de la résistance à la traction à 250°C.

- On remarque qu'à 250°C la perte de la résistance à la traction pour BHP (6.3%) est relativement similaire à celle à la compression.
- Par contre les trois bétons fibrés ont subi des augmentations remarquables qui à dépasser aux moyen 50%. Les augmentations sont respectivement (86%, 45.8%, 55.7%) pour BFHP1, BFHP2, BFHP3.
- Les bétons testés présentent des valeurs très supérieures à celles du DTU et de l'EC2.

III. 3. Effet de la température et des fibres sur les relations entre les propriétés des bétons :

Les relations entre les résistances (à la compression et à la traction) et entre les résistances en compression et les modules d'élasticité peuvent être influencées par l'élévation de la température et même l'incorporation des fibres. On a peu remarqué à travers les résultats de ces propriétés qu'elles peuvent présenter des valeurs différentes. Dans cette partie du travail, on prospecte l'effet de la température et les fibres sur ces relations, entre les résistances en compression et celles en traction d'une part et entre les résistances en compression et les modules élastiques d'autre part. Ces relations entre propriétés vont aussi situées par rapport à celles données par les règlements.

III. 3. 1. Les relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction :

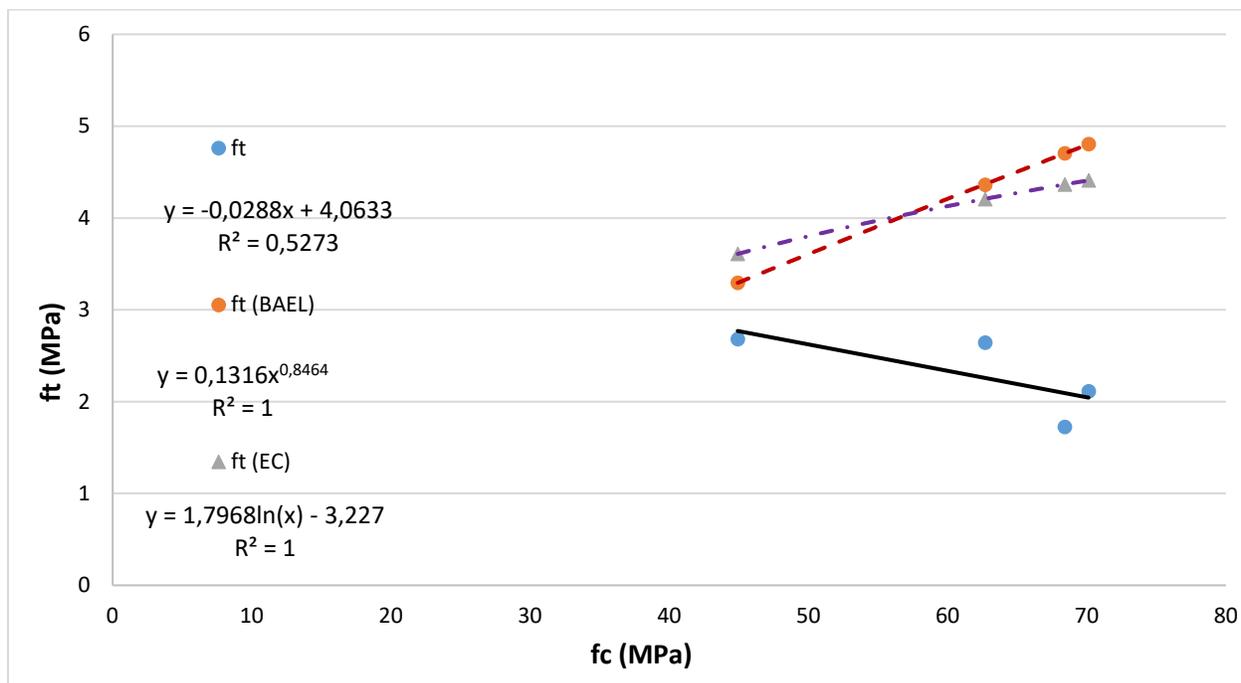


Figure III.19. Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction à 20°C.

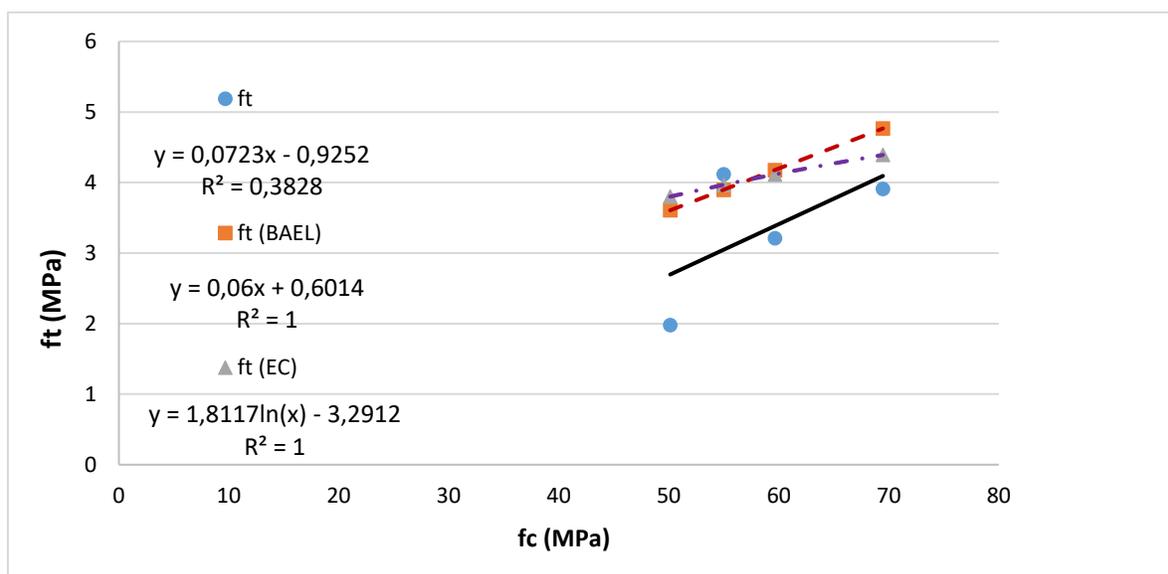


Figure III.20. Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction à 250°C.

- Les courbes précédentes présentent les relations Ft-Fc pour les BFHP (0%, 0.12%, 0.18%, 0.24%) de (FPP) à 20°C et 250°C. On remarque que l'écart entre les courbes réglementaires et la courbe expérimentale des BFHP à 250°C n'est pas aussi important que à 20°C. par contre on remarque l'inverse pour la qualité de la régression Ft-Fc ($R^2=0.5273$ à 20°C et $R^2=0.3828$).
- Aux deux températures (20°C et 250°C) les relations Ft-Fc pour les BFHP donne toujours des valeurs sous estimées, mais à 250°C les relations Ft-Fc ont la même allure que celles du règlementations. Et à 20°C les relations Ft-Fc commence a s'éloigner en diminuant au-delà de 40MPa.
- On constate que les relations Ft-Fc sont influencés par le pourcentage d'incorporation des fibres (FPP).

III. 3. 2. Les relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité :

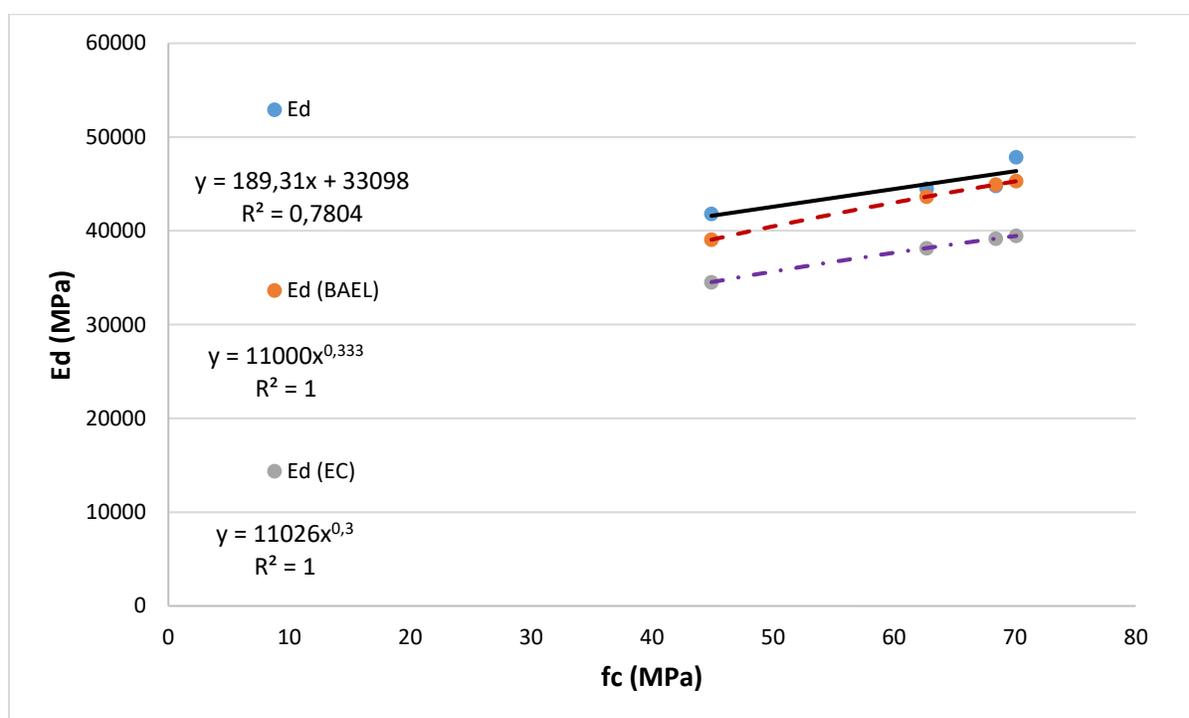


Figure III.21. Relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique à 20°C.

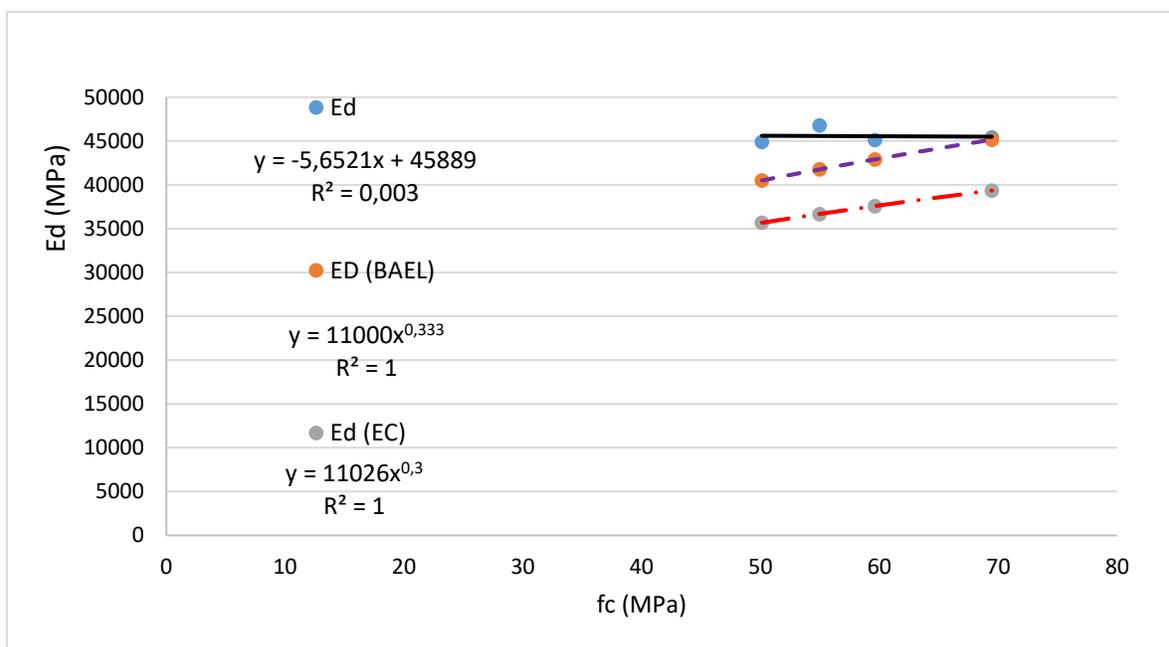


Figure III.22. Relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique à 250°C.

- On peut remarquer clairement que la majorité des points reliant E_d à F_c soit à 20°C ou à 250°C sont situés en dessus des courbes données par les règlements (BAEL et EC).
- On a par contre à 20°C une amélioration de la relation pour les BFHP ($R^2=0.780$), avec un rapprochement de l'estimation de E_d avec celles de règlements pour des résistances en compression avoisinant les 65 MPa.
- Mais malgré que la relation E_d - F_c à 250° tend a se confondre avec celle de (EC) sa qualité de la regression est très petite ($R^2=0.003$).

III. 4. Conclusion :

A travers les résultats des différentes propriétés de ces bétons (BHP Témoin et bétons fibrés), on remarque que leurs comportements avec l'élévation de la température à 250°C et avec l'incorporation de différent pourcentage de fibre (FPP) présentent des différences.

L'effet de l'incorporation des fibres polypropylène été clairement remarqué sur la masse à (0.12% de FPP) et à (0.18% de FPP) été la diminution maximale pour la vitesse des ultrasons et le module élastique dynamique. Cette effet été défavorable aussi à (0.18% de FPP) pour la résistance

à la compression, par contre à (0.18%, 0.24% de FPP) l'effet été très acceptable pour la résistance à la traction.

Les pertes de la masse sont plus importantes dans BFHP que le BHP Témoin. Ces chutes (BFHP) sont faible pour une incorporation de (0.18% à 0.24%) de FPP. Ces pertes de masse à cette température (250°C) restent relativement faibles et sont beaucoup plus liées à l'évacuation de l'eau. Généralement, l'altération des granulats commencent à des températures supérieures à 600°C.

Les vitesses des ultrasons et Les modules dynamiques des BFHP ont présentés un comportement très favorable à la température étudiée, avec des augmentations précieuses. Les quatre bétons présents des valeurs des vitesses des ultrasons et des modules dynamiques plus élevées que celles du DTU et de l'EC2 à (250°C).

La résistance à la compression été favorablement influencée (plus de 50%) à 250°C et avec une incorporation de 0.18% de FPP, les chutes des autres bétons sont relativement proches à ceux avancées par l'Eurocode.

La perte de la résistance à la traction est relativement similaire à celle à la compression pour le BHP. Par contre celle des bétons fibrés à subit des augmentations remarquables qui à dépasser aux moyen 50%. Les bétons testés présentent des valeurs très supérieures à celles données par les documents techniques et normatifs a cette température (250°C).

Les corrélations reliant les propriétés des bétons qui figurent dans les documents réglementaires (BAEL, EC) valables à la température d'ambiante pour les bétons courants ne le sont plus aux hautes températures. On doit considérer dans ces relations d'autres paramètres comme la composition par exemple et comme l'incorporation des fibres (FPP), qui a été étudié dans ce travail à 250°C.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Cette étude a mis en exergue la différence du comportement vis-à-vis des hautes températures (250°C) entre un béton à haute performance et trois bétons fibrés par des fibres polypropylène. Dont le premier est beaucoup plus influencé par l'augmentation de la température par rapport aux derniers.

La chute de la résistance en compression a dépassé les 28% pour le BHP, alors que cette chute est entre 12% à 22% pour le BFHP (0.12, 0.24) % de FPP, et une augmentation de 56% (BFHP à 0.18% FPP).

En traction, l'amélioration atteint 50% on moyen pour les BFHP. Ce qui implique que la résistance à la traction pour les BFHP est plus améliorée par la montée de la température que la résistance en compression.

L'augmentation des modules d'élasticité dynamiques se situent entre 0.5% et 9% (BFHP) et la chute de ceux du BHP a atteint presque 6%. Donc jusqu'à cette température les modules d'élasticité dynamiques des BFHP sont plus améliorés par la montée de la température que ceux des BHP. Alors ont conclu que les propriétés mécaniques résiduelles des bétons BFHP sont plus élevées que celles du BHP Témoin.

L'effet de l'incorporation de FPP est favorable en général pour la masse et la résistance à la traction, par contre il été plus favorable après le cycle thermique étudié pour toutes les propriétés résiduelles étudiés, cette dernière conclusion peut être expliqué par les transformation chimiques qui a subi le FPP sous température.

Les relations entre la résistance en compression et celle en traction à 20°C et à 250°C en prenant en considération la présence des FPP présentent des sous estimations par apport à celles des documents normatifs, donc les FPP influence ces relations même à la température d'ambiance.

Les relations entre la résistance en compression et le module élastique dynamique présentent des estimation plus grandes que celles des documents normatifs, avec des similitudes à ces derniers.

Les bétons testés présentent des différences dans le comportement de leurs propriétés avec la température comparativement à celles données par les documents techniques et normatifs. Les corrélations reliant les propriétés des bétons qui figurent dans les documents réglementaires (BAEL, EC) valables à la température d'ambiante pour quelques bétons, mais ils ne le sont plus aux hautes températures et aux bétons fibrés avec FPP.

Références

Bibliographique

Références bibliographique

- [1] Cinéma les enfants du paradis à chartres [Photo] In : petit-patrimoine.com. Disponible sur :
« https://www.petitpatrimoine.com/photos_pp/photo_pp_final/thumbs/sem_2010_2/280_5_8_photo1_g.jpg » (Consulter le 20/06/2019).
- [2] Fondation de louis Vuitton à paris [Photo] In : vosgesmatin.fr. Disponible sur :
« https://cdn-s-www.vosgesmatin.fr/images/6C385354-C4E7-4BA5B161-5EAAB7BF1969/VOM_19/la-fondation-louis-vuitton-a-paris-capture-gsv-1543583631.jpg »
(Consulter le 20/06/2019).
- [3] Pont de la chabotte [Photo] In : encrypted-tbn0.gstatic.com. Disponible sur :
« https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT56obufTg860G_L6aKVZCN0HdA-yq6RXAtxk8CalslfcptuswX » (Consulter le 20/06/2019).
- [4] Couverture de la gare de péage du viaduc de Millau [Photo] In : encrypted-tbn0.gstatic.com.
Disponible sur :
« <https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSZvDZLQQobGW9ILyrK6I6oFVKIzXfjl-6fBAHH-cvE7ZX5IycC> » (Consulter le 20/06/2019).
- [AFGC, 2002] Association Française de Génie Civil. ‘Béton fibrés à ultra performances’. *Documents Scientifiques Et Techniques*, 2002, P7. Disponible sur : « <http://www.afgc.asso.fr/index.php/publications/41-publications/documents-scientifiques-et-techniques/37-documents-scientifiques-et-techniques-edition-afgc> » (Consulter de 13/03/2019)
- [Aidoud. A, 2018] Aidoud. A ‘ Evolution des caractéristiques des bétons et des BHP aux hautes températures’ *Thèse de doctorat*. Génie civil. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2018, 92p
- [Aissaoui. W, 2018] Aissaoui. W, ‘ Etude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats en caoutchoc’, *Mémoire en Master*. Génie Civil. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2018, p58.
- [Alarcon-Ruiz. L et al, 2005] Alarcon-Ruiz. L, Platret. G, Massieu. E et Ehlacher. A, “The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of

Temperature on a Cement Paste.” *Cement and Concrete Research*, Vol 35, 2005: 609–13.

- [Alonso. C et al, 2004] Alonso. C et Fernandez. L, "Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments", *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, n°9, p. 3015-3024.
- [Andeberg. Y, 1997] Anderberg. Y, Spalling phenomena de HPC et OC, “International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete”, NIST, Gaithersburg, 1997.
- [Arab. A, Rafai. H, 2017] Arab. A et Rafai. H. “Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice”, *Mémoire de Master [En ligne]*. Génie des Matériaux. Boumerdes : Université M’hamed Bougara, 2017, 121p. Disponible sur :
« <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/4279/1/M%C3%A9moire%20BFUP%20complet.pdf>. » (Consulter de 09/03/2019).
- [Arupfire, 2005] Arupfire. “Fire resistance of concrete enclosures”, London, 2005.
- [Bazant. Z-P et al, 1997] Bazant. Z-P et Kaplan. M-F ‘Concrete at high temperatures. Material properties and mathematical models’, Longman House, Burnt Mill, England, 1997.
- [Behnood. A et al, 2009] Behnood. A et Ghandehari. M, ‘Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, *Fire Safety Journal*, 2009. vol. 44, n°8
- [Bourema. M, 2015] Bourema .M, ‘Etude des caractéristiques d’un BHP à base de déchet de brique rouge à l’état frais et durci.’ *Mémoire de Master [En ligne]*. Matériaux de Construction. Skikda : Université 2à Aout

1955, 2015, 120p. Disponible sur :

« https://www.researchgate.net/publication/301221235_Etude_des_caracteristiques_d'un_BHP_a_base_de_dechet_de_brique_rouge_a_l'etat_frais_et_durci » (Consulter de 09/06/2019).

[Charette. N, 2017]

Charrette. N, Réparations minces de parapets de ponts avec des bétons fibrés à ultra-hautes performances BFHP. Maitrisées sciences appliquées. Génie Civil. : Université de Montréal, 2017, 257p. Disponible sur : « <https://publications.polymtl.ca/2709/>. » (Consulter de 05/04/2019).

[Charron. J-P et Desmettre. C, 2013]

Charron. J-P et Desmettre. C, 'Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrage d'art durables', SR13-01. Montréal, École Polytechnique de Montréal, 2013.

[Castellote. M et al, 2004]

Castellote. M, Alonso. C, Andrade. C, Turrillas. X, Campo. J, 'Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating', as studied by neutron diffraction, *Cement and Concrete Research*, 2004, vol. 34, n°9.

[CERIB, 2005]

Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton. Normalisation – BNIB, Réglementation, 2005. Disponible sur : « <http://www.cerib.com/normalisation/norma-beton.html>. » (Consulter le 04/05/2005 à 13h 45min)

[Chen. B et Liu. J, 2004]

Chen. B et Liu. J, 'Residual strength of hybrid-fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperatures', *Cement and Concrete Research*, 2004. vol. 34, n°6,

[Chouiter. Y, 2016]

Chouiter. Y, « Etude du comportement d'un béton à haute performance (BHP) avec fibres de verre soumis à haute température. » *Mémoire de Master [En ligne]*. Matériaux. M'sila : Université Mohamed Boudiaf, 2016, 113p. Disponible sur : « <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/624>. » (Consulter le 31/03/2019).

- [CIM béton, 2013]** Les formulation fabrication et mise en œuvre. Fiche Technique, Tome I. Chapitre 2 : Les constituants des bétons et des mortiers, Paris : Centre D'information sur le Ciment et ses Applications, 2007. Disponible sur :
« <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G10.30-41.pdf> » (Consulter le 10/06/2019 à 15h37min).
- [CIM béton, 2013]** Les formulation fabrication et mise en œuvre. Fiche Technique, Tome II. Paris : Centre D'information sur le Ciment et ses Applications, 2007, 135p. Disponible sur :
« <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G11.pdf> » (consulter de 10/03/2019).
- [Consolazio. G-R et al, 1997]** Consolazio. G-R, Mcvay. M- C, Rish. J-W, “Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature.”, *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, 1997.
- [De schutter. G, 2007]** De schutter. G, « Les bétons à haute performance » , 2007, 12p. Disponible sur :
« https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/40fr_01.pdf. » (Consulter de 13/03/2019).
- [Diederichs. U et al, 1989]** Diederichs. U, Jumppanen. U, Penttala. V, ‘Behaviour of high strength concrete at high temperatures’, Report n°92, Helsinki, University of Technology, Department of structural engineering, 1989.
- [Dreux. G et al 1998]** Dreux. G, Festa. J, *New concrete guide*, ISBN 13: 978-2-212-10231-4, 1998, p 418.
- [DTU, 2007]** Document Technique Unifie (DTU) 1987. Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton + Amendement A1. Règles de calcul FB. AFNOR DTU P92-701

October 1987, décembre 1993, décembre 2000, CD-DTU V2-
Edition 150 – Décembre 2007.

- [ENV 1992-1-2]** EUROCODE 2 : Calcul des structures en béton. Partie 1-2 : règles générales – calcul du comportement au feu, Février 2001.
- [Habel. K, 2004]** Habel. K, ‘Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete’, *thèse de doctorat* Faculté de l'environnement Natural, Architectural et Construit. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- [Habel. K et al, 2006]** ‘Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part I: experimental results’, *Magazine of Concrete Research*, 2006.
- [Hager. I, 2004]** Hager. I, ‘Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques’, *thèse de doctorat ENPC*, Paris, 2004.
- [Hager, I. et Pimienta. P, 2004]** Hager, I. et Pimienta. P, “Mechanical Properties of HPC at High Temperature. Fib Task Group 4.3 “, *Fire Design of Concrete Structures.*” Milan, Italy, 2004.
- [Hertz. K-D, 2003]** Hertz. K-D, ‘Limits of spalling of fire – exposed concrete. *Fire safety journal*, 2003, vol. 38.
- [Kanema. M, 2007]** Kanema Tshimanga. M, ‘Influence des paramètres de formulations sur le comportement à haute température des bétons, *thèse de doctorat*, l’université de Cergy-pontoise, décembre 2007.
- [Kalifa. P et al, 2000]** Kalifa. P, Quenard. D, ‘Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures’, *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, n°12.
- [Khaliq. W et al, 2011]** Khaliq. W, Kodur. V, ‘Thermal and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High Performance Self-Consolidating Concrete at

- Elevated Temperatures’, *Cement and Concrete Research*, 2011, Vol. 41, n°11.
- [Khoury. G-A, 1992]** Khoury. G-A ‘Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment’, *Magazine of Concrete Research*, vol. 161, 1992 : 291–309.
- [Khoury. G A, 1995]** Khoury. G-A, ‘Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle, *Nuclear Engineering and design*, 1995, vol. 156, n°1-2.
- [Kodur. V-K-R, 2014]** Kodur. V, 2014. “Properties of Concrete at Elevated Temperatures”, *ISRN Civil Engineering*, 2014 :1–15
- [Lakhal. R, 2011]** Lakhal Ridha. Elaboration des bétons à hautes performances a base des sous-produit locaux formulation et caractérisation physico-mécanique. *Mémoire de magister [En ligne]*. Matériaux. Annaba : Université Badji Mokhtar, 2011, 117p. Disponible sur :
 « <http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/06/memoire-final.pdf> »
- [Li. M et al 2004]** Li. M, Qian. C, Sun. W, ‘Mechanical properties of high-strength concrete after fire, *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, n°6.
- [Lau. A et al, 2006]** Lau. A, Anson. M, “Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete.” *Cement and Concrete Research*, 2006, vol. 36, n°9.
- [mbodj93]** transféré par mbodj93. Disponible sur :
 « <https://fr.scribd.com/doc/204946544/BETON-Traction-Par-Fendage> » (Consulter le 20/05/2019).
- [Menou. A, 2004]** Menou. A, ‘Etude Du Comportement Thermomécanique Des Bétons à Haute Température Approche Multi échelles de

- L'endommagement Thermique.' *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des Pays de L'Andour, 2004.
- [Mindeguia. J-C, 2009]** Mindeguia. J-C, 'Contribution Expérimentale à La Compréhension Des Risques D'instabilité Thermique Des Bétons.' *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des pays de l'Adour, 2009.
- [N-E. KEDJOUR 2003]** N-E. KEDJOUR. « Le Laboratoire du Béton », *O.P.U*, Mars 2003.
- [NF EN 12390-1]** 'Essais pour béton durci - Partie 1: forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules. Indice de classement : P18-430-1, Novembre 2012.
- [NF EN 12390-2]** Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance - Indice de classement P18-430-2, Avril 2012.
- [Nguyen. V-T, 2013]** Nguyen. V-T, "Comportement Des Bétons Ordinaire et à Hautes Performances Soumis à Haute Température : Application à Des éprouvettes de Grandes Dimensions." *Thèse de doctorat*, Université de Cergy Pontoise, 2013.
- [Nonna. Y, 2015]** Nonna. Y, 'Comportement à haute températures des bétons additionnés de fibres.' Thèse de doctorat **[en ligne]**. Génie Civil. Paris : Université de cergy-pontoise, 2017, 215p. Disponible sur : « https://www.u-cergy.fr/_attachments/theses/article/Th%25C3%25A8se%2520Nonna%2520YERMAK.pdf?download=true (Consulté de 13/03/2019).
- [Noumowé. N-A, 1995]** Noumowé. A, 'Effet Des Hautes Températures (20-600°C) Sur Le Béton. Cas Particulier Du Béton à Hautes Performances.' *Thèse de doctorat*, INSA de Lyon, 1995.
- [Phan. L-T, 2008]** Phan. L-T, 'Pore Pressure and Explosive Spalling in Concrete.' *Materials and Structures*, 2008, Vol. 41. n°10.

- [Phan. L-T et al, 2001]** Phan. L. T et N. J. Carino. "Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures", *Report NISTIR 6726*, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2001.
- [Pimienta et al 2012]** Pimienta P., Mindeguia J-C., Simon A., Behloul M., Felicetti R., Bamonte R., Gambarova P-G., Performances du béton soumis à haute température, du matériau à la structure, *Colloque, 23 oct. 2012*, Université Cergy-Pontoise, France, (2012).
- [Piasta. J, 1989]** Piasta. J, "Heat Deformation of Cement Phases and Microstructure of Cement Paste, Materials and Structures: Research and Testing." RILEM, Vol.17, 1989 : 415–20.
- [Pliya. P, 2010]** Pliya. P "Contribution Des Fibres de Polypropylène et Métalliques à L'amélioration Du Comportement Du Béton Soumis à Une Température élevée." *Thèse de doctorat*, Université de Cergy Pontoise, 2010.
- [Sensal. B, 2010]** Sensal. B,"Recueil des normes algériennes secteurs des travaux publics. " Algérie : *IANOR*, Décembre 2010, 28p.
- [Suhaendi. S-L et al, 2006]** Suhaendi. S. et Horiguchi. T, "Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced High Strength Concrete after Heat Exposition." *Cement and Concrete Research*, 2006 Vol. 36, n°9: 1672–78.
- [Sideris. K et al 2009]** Sideris. K, K., P. Manita, K., P and E. Chaniotakis, 2009. "Performance of Thermally Damaged Fiber Reinforced Concretes." *Construction and Building Material*, 2003. Vol. 23, n°3: 1232–39.
- [Schneider. U et al. 1982]** Schneider. U, Diederichs. U et Ehm. C "Effect of Temperature on Steel and Concrete for PCRV's." *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 67, 1982: 245–58.

- [Robert. F et al, 2008]** Robert. F, Colina. H. et Debicki. G,
"La durabilité des bétons face aux incendies", Paris, *Ed. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées*, 2008.
- [Toumi. B, 2010]** Toumi, B "Étude de L'influence Des Hautes Températures Sur Le Comportement Du Béton." *Thèse de doctorat*, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [Xing. Z, 2011]** Xing. Z "Influence de La Nature Minéralogique Des Granulats Sur Leur Comportement et Celui Du Béton à Haute Température." *Thèse de doctorat*, Université de Cergy Pontoise.
- [Xiao. J et Falkner. H, 2006]** Xiao. J. et Falkner. H, 'On Residual Strength of High-Performance Concrete with and without Polypropylene Fibers at Elevated Temperatures." *Fire Safety Journal*, 2006, Vol. 41, n°2: 115–21.
- [Yagoub. M, 2009]** Chapitre-1- ' Le béton de fibres' Partie I Revue bibliographique, 2009
Disponible sur : « Thesis.univbiskra.dz/1328/4/partieI%20chapitre%2001.pdf »

Annexes

MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- Forme Poudre
- Couleur Grise
- Densité apparente 0,5
- Composants SiO₂ > 85 (%)
..... SO₃ < 2,5 (%)
..... Cl- < 0,2 (%)
- Aire massique > 15 (m²/gr)
- Humidité par étuve à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST HP** permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la cohésion
- d'éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques
- d'obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- d'augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- d'augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (**MEDAPLAST SP, SP40**) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

DOSAGE

Le dosage du **MEDAPLAST HP** varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST HP** est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (toile de jute + arrosage ou **MEDACURE**) surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST HP** est conditionné en sacs de 2kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex
فرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1 et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

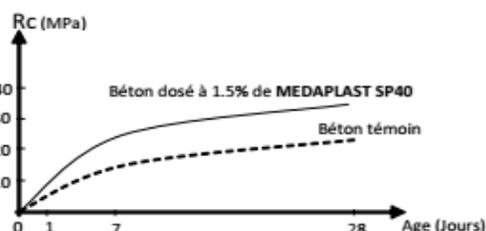
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Notice technique
Edition Mars 2009
Numéro 1.961
Version n° 1.2009
SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32

SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32

Fibres synthétiques pour bétons.

Présentation	Les SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32 sont à base de polypropylène spécialement traité, se présentant en sachets pulpables prédosés pour 1 m ³ de béton.
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bétons de dallages, chaussées, parkings, pistes, dans lesquels les fibres SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32 jouent un rôle d'anti-fissurant. ■ Bétons désactivés. ■ Bétons soumis aux chocs. ■ Bétons nécessitant une forte cohésion à l'état frais, tels que les bétons extrudés ou dallage à forte déclivité. ■ Bétons préfabriqués pour améliorer la manipulation des pièces au démoulage et limiter le rebut de dalles, pavés, bordures, regards, tuyaux, etc.
Caractères généraux	<p>Les SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32 se dispersent très facilement et créent un réseau fibré haute densité qui a pour conséquences :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ d'améliorer la cohésion du béton à l'état frais, ■ de dissiper l'énergie due aux contraintes de retrait, ■ d'augmenter la résistance aux chocs et l'imperméabilité du matériau durci, ■ d'améliorer le comportement au feu du béton. <p>Nota : les fibres n'assurent pas un renforcement structural du béton, mais peuvent se substituer au treillis anti-fissuration lorsque ce dernier est utilisé afin de limiter les risques de fissuration plastique.</p>
Caractéristiques	
Conditionnement	Carton de 15 doses de 900 g en sacs papier pulpables.
Conservation	A l'abri de l'humidité, le produit se conserve 3 ans.
Données techniques	
Densité	0,91
Nature	Polypropylène
Longueur	12 mm
Diamètre	32 µm
Résistance à la traction	270 à 430 MPa
Module d'élasticité	3000 à 6000 MPa



Conditions d'application

Consommation / Dosage 1 dose de 900 g de SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32 par m3 de béton.

Mise en œuvre

Introduire le sachet dose pulvable de SIKA® FIBRES POLYPROPYLENE 12/32 directement avec les agrégats ou dans le camion toupie. Dans ce dernier cas, faire tourner la toupie à grande vitesse à la fin du chargement, au minimum 1 minute par m3 de béton, afin de bien répartir les fibres dans le béton et de désagréger complètement le sac papier.

Pour améliorer les caractéristiques de mise en place à l'état frais et les performances finales du matériau durci, il est conseillé d'associer les fibres à un adjuvant superplastifiant SIKAMENT®, SIKAFUID® ou SIKA® VISCOCRETE® (nous consulter).

L'utilisation d'un produit de cure est recommandée par temps chaud ou en présence de vent.

Précautions d'emploi

Manipulation non dangereuse.

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika Maroc S.A.
Z.I. Ouled Saleh, BP 191 - 20180 Bouskoura - Casablanca
Tél. : 022 33 41 54 - Fax : 022 59 07 99
info@ma.sika.com



SIKAFIBRE POLYPROPYLENE 12/32