

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: Génie Civil

Par

TOUAHRI Ahmed

Thème

Les structures en béton armé exposées à des charges extrêmes

Soutenue le 18/11/2023, devant le jury composé de :

BOUGARA Abdelkader	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
KENAI Said	Professeur	Université Saad Dahlab, Blida 1	Examineur
MENADI Belkacem	Professeur	Université Saad Dahlab, Blida 1	Examineur
BRANCI Taieb	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Rapporteur

Dédicaces

A Allah, notre Créateur,

Je souhaite commencer cette dédicace en exprimant ma gratitude infinie envers Vous, Allah, qui m'a donné la vie, la capacité de réfléchir et la persévérance pour mener à bien cette thèse de doctorat. C'est grâce à Votre guidance et à Ta bénédiction que j'ai pu franchir chaque étape de ce parcours académique.

A mes défunts parents,

A vous, mes chers parents, je dédie cette thèse avec un mélange d'amour, de reconnaissance et de nostalgie. Votre soutien inconditionnel, vos sacrifices et votre enseignement m'ont toujours inspiré et encouragé à atteindre l'excellence. Bien que vous ne soyez plus présents physiquement, je sens votre présence spirituelle à chaque instant de ma vie et à travers chaque ligne de ce travail.

A ma femme et mes enfants, Maria, Mohammed Akram et Hadjer,

Ma chère épouse et mes merveilleux enfants, vous êtes ma source de force et d'inspiration. Votre amour, votre soutien inébranlable et votre compréhension pendant les moments où j'ai dû me consacrer à mes recherches ont été inestimables. Vous avez été mes piliers, m'encourageant à persévérer dans les moments de doute et de découragement. Cette thèse est également la vôtre, car vous avez fait partie intégrante de ce voyage.

A mon frère Aberrahmane et ses enfants,

A toi, mon cher frère, et à tes enfants, je dédie ce travail en reconnaissance de ton soutien inébranlable et de ta présence constante dans ma vie. Tu as toujours été là pour m'encourager, me guider et me rappeler l'importance de l'équilibre entre la vie professionnelle et la vie personnelle. Je suis reconnaissant de t'avoir comme frère et de pouvoir partager cette réalisation avec toi et tes enfants.

Que cette thèse, dédiée à Allah, à mes défunts parents, à ma femme et mes enfants, ainsi qu'à mon frère et ses enfants, soit un hommage à ceux qui ont joué un rôle si crucial dans ma vie. Puissent leurs esprits être en paix et puissent-ils partager ma joie et ma réussite.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse. Vos encouragements, vos conseils et votre soutien ont été inestimables.

A tous ceux qui m'ont accompagné dans cette aventure, je vous adresse mes sincères remerciements.

Que cette thèse soit une modeste contribution au savoir et à l'humanité, dans l'espoir de faire progresser notre compréhension et notre impact dans le monde qui nous entoure.

Fi amanillah.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements au professeur Taieb BRANCI, directeur de cette thèse, pour ses conseils avisés, son aide précieuse, sa compréhension, sa présence constante et sa confiance en moi tout au long de mon doctorat. Ses orientations éclairées ont été d'une valeur inestimable pour l'avancement de ma recherche.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers le ministère de l'enseignement supérieur qui a généreusement financé la réalisation de ce travail. Leur soutien financier a permis la concrétisation de ce projet académique.

Un grand merci à Abdelkader BOUGARA, Professeur à l'Université de Chlef, pour avoir accepté de présider le jury. Merci aux examinateurs Said KENAI et Belkacem MENADI, Professeurs à l'Université de Blida 1 d'avoir accepté d'examiner cette thèse et dont leur présence au jury a donné une dimension supplémentaire à cette thèse.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux professeurs Karim EZZIANE et Bensaid BOULEKBACHE pour leurs soutiens indéfectibles durant ma soutenance de doctorat. Votre présence, vos encouragements et conseils ont été d'une importance capitale pour moi.

Un remerciement spécial est adressé au professeur Ammar YAHIA pour sa collaboration précieuse. Son soutien inestimable dans mon travail expérimental et ses conseils avisés dès le début de ma thèse ont grandement contribué à son succès. Sa participation active dans la fourniture des matériaux et la planification des essais a été remarquable.

Mes remerciements vont également aux techniciens du département de génie civil de l'université de Sherbrooke, notamment Ghislaine LUC, Denis BOLDUC, Rajko VOJNOVIC et Jean-Yves ROY. Leur soutien technique tout au long des essais a été essentiel à la réalisation de mes expérimentations.

Je suis également reconnaissant envers les membres du jury de correction qui ont consacré gracieusement leur temps pour lire et corriger cette thèse, contribuant ainsi à la rendre plus lisible et compréhensible.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, même si leur nom n'a pas été mentionné ici. Leurs encouragements et leur soutien ont été précieux tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, je voudrais exprimer ma sincère gratitude à ma famille, en particulier à ma femme et mes enfants, pour leur amour indéfectible, leur soutien inconditionnel et leur encouragement constant. Leur présence et leur compréhension m'ont permis de poursuivre mes études avec détermination.

Que ces remerciements témoignent de ma profonde reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette thèse et à mon développement académique et personnel.

Résumé

Cette étude a visé à évaluer les performances des fibres de polypropylène recyclées (FPR) dans le béton et à comprendre leur comportement dans différentes conditions. Trois aspects ont été abordés : l'influence des FPR sur les performances mécaniques du béton, l'amélioration de l'adhérence entre les fibres de polypropylène recyclées et le béton par le biais de traitements chimiques de surface, ainsi que l'effet des hautes températures sur le béton renforcé avec des FPR. Les résultats ont montré que l'utilisation de FPR à des fractions volumiques (0,1%; 0,2% et 0,3%) permet d'obtenir des performances mécaniques comparables à celles des fibres de polypropylène commerciales (FPP). Cependant, l'incorporation de fibres dans le béton a entraîné une diminution de la résistance à la compression (jusqu'à 20 %), une augmentation de la résistance à la flexion (jusqu'à 27 %) et une diminution du module d'élasticité (de 16 %). Dans le but d'améliorer l'adhérence entre les fibres de polypropylène recyclées et le béton, deux traitements chimiques de surface ont été utilisés : le Dichromate de Potassium, le Permanganate de Potassium. Le Dichromate de Potassium s'est révélé être la technique la plus efficace pour renforcer l'adhérence.

En ce qui concerne l'effet des hautes températures, les deux types de béton (ordinaire et à haute performance) renforcés avec des FPR ont été exposés à des températures allant de 20 °C à 600 °C. Les résultats ont montré que la résistance à la compression, la traction et le module d'élasticité diminuaient avec l'augmentation de la température. Cependant, l'ajout de FPR avait un effet limité sur la résistance du béton aux hautes températures. Bien que les échantillons renforcés aient montré une résistance légèrement supérieure aux températures élevées par rapport aux échantillons non renforcés, cette différence n'était pas significative. De plus, la vitesse de chauffage n'a pas eu d'effet significatif sur les propriétés mécaniques des deux types de béton, soulignant que la température elle-même est le principal facteur déterminant de l'impact sur les propriétés du béton.

Mots-clés : Fibres de polypropylène recyclées, Fibres de polypropylène, traitement chimique de surface, hautes températures, fractions volumiques, propriétés mécaniques.

Abstract

This study aimed to assess the performance of recycled polypropylene fibers (RPF) in concrete and understand their behavior under different conditions. Three aspects were addressed: the influence of RPF on the mechanical performance of concrete, the enhancement of bond between recycled polypropylene fibers and concrete through surface chemical treatments, and the effect of high temperatures on RPF-reinforced concrete. The results demonstrated that using volume fractions of RPF (0.1%, 0.2% and 0.3%) can achieve mechanical performance comparable to that of commercial polypropylene fibers (PPF). However, the incorporation of fibers in concrete led to a decrease in compressive strength (up to 20%), an increase in flexural strength (up to 27%), and a reduction in the modulus of elasticity (16%). In order to improve the bond between recycled polypropylene fibers and concrete, two surface chemical treatments, namely Potassium Dichromate, Potassium Permanganate, were compared, with Potassium Dichromate proving to be the most effective technique for enhancing bond strength.

Regarding the effect of high temperatures, both types of concrete (ordinary and high-performance) reinforced with RPF were exposed to temperatures ranging from 20 °C to 600 °C. The results showed that compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity decreased with increasing temperature. However, the addition of RPF had a limited effect on the resistance of concrete to high temperatures. Although the reinforced samples exhibited slightly higher resistance at elevated temperatures compared to the unreinforced samples, this difference was not significant. Additionally, the heating rate had no significant effect on the mechanical properties of both types of concrete, emphasizing that temperature itself is the primary determinant of the impact on concrete properties.

Keywords: Recycled polypropylene fibers, Polypropylene fibers, surface chemical treatment, high temperatures, volume fractions, mechanical properties.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء ألياف البوليبروبيلين المعاد تدويرها (FPR) في الخرسانة وفهم سلوكها تحت ظروف مختلفة. تم التركيز على ثلاثة جوانب: تأثير FPR على الأداء الميكانيكي للخرسانة، تحسين التماسك بين ألياف البوليبروبيلين المعاد تدويرها والخرسانة من خلال معاملات كيميائية سطحية، وتأثير درجات الحرارة العالية على الخرسانة المقواة بـ FPR. أظهرت النتائج أن استخدام FPR بتركيز حجم (0.1%، 0.2%، و 0.3%) يمكن أن يحقق أداء ميكانيكي مقارن بألياف البوليبروبيلين التجارية (FPP) ومع ذلك، أدى إدماج الألياف في الخرسانة إلى انخفاض في مقاومة الضغط (تصل إلى 20%)، وزيادة في مقاومة الانحناء (تصل إلى 27%)، وانخفاض في معامل المرونة (16%). بهدف تحسين التماسك بين ألياف البوليبروبيلين المعاد تدويرها والخرسانة، تمت استعمال مادتين كيميائيتين هما: ديكرومات البوتاسيوم و برمونغانات البوتاسيوم، وتبين أن ديكرومات البوتاسيوم هي التقنية الأكثر فعالية في تعزيز التماسك.

بالنسبة لتأثير درجات الحرارة العالية، تم تعريض كلاً من أنواع الخرسانة (العادية وذات الأداء العالي) المقواة بـ FPR إلى درجات حرارة تتراوح بين 20 درجة مئوية و 600 درجة مئوية. أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط ومقاومة الشد ومعامل المرونة تتناقص مع تزايد درجة الحرارة. فيما يتعلق بتأثير درجات الحرارة المرتفعة، تعرض نوعا الخرسانة (عادية وعالية الأداء) المقواة بـ FPR لدرجات حرارة تتراوح من 20 درجة مئوية إلى 600 درجة مئوية. أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط والشد ومعامل المرونة تقل مع زيادة درجة الحرارة. ومع ذلك، فإن إضافة FPR كان لها تأثير محدود على مقاومة درجات الحرارة العالية للخرسانة. على الرغم من أن العينات المقواة أظهرت مقاومة أعلى قليلاً لدرجات الحرارة المرتفعة مقارنة بالعينات غير المقواة، إلا أن هذا الاختلاف لم يكن معنوياً. علاوة على ذلك، لم يكن لمعدل التسخين تأثير كبير على الخواص الميكانيكية لنوعين من الخرسانة، مما يبرز أن درجة الحرارة نفسها هي المحدد الرئيسي للتأثير على خصائص الخرسانة.

الكلمات المفتاحية : ألياف البوليبروبيلين المعاد تدويرها، ألياف البوليبروبيلين التجارية، المعاملة الكيميائية السطحية، درجات الحرارة العالية، نسب الحجم، والخصائص الميكانيكي.

Table des matières

Résumé	iv
Abstract.....	v
ملخص	vi
Liste des figures	x
Liste des tableaux.....	xii
Liste des symboles	xiii

Introduction générale.....2

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1.1. Introduction	5
1.2. Histoire des fibres dans les matériaux de construction	7
1.3. Fibres de polypropylène	8
1.3.1. <i>Propriété des fibres de polypropylène.....</i>	<i>8</i>
1.3.2. <i>Classification et performance des fibres de polypropylène.</i>	<i>9</i>
1.3.3. <i>Domaine d'utilisation et ratio des fibres de polypropylène.....</i>	<i>9</i>
1.4. Importance du béton fibré.....	10
1.5. Rôle des fibres.....	11
1.5.1. <i>Retrait plastique.....</i>	<i>12</i>
1.5.2. <i>Tassement plastique.....</i>	<i>12</i>
1.5.3. <i>Domages causés par le gel et dégel.....</i>	<i>12</i>
1.6. Effet des fibres de polypropylène sur le béton frais.....	13
1.7. Effets des fibres de polypropylène sur le béton durci	13
1.8. Modification de la surface des fibres de polypropylène.....	16
1.9. Béton exposé à de hautes températures.....	18
1.9.1. <i>Evolution de la matrice cimentaire.....</i>	<i>20</i>
1.9.2. <i>Effet des hautes températures sur le béton.....</i>	<i>20</i>
1.10. Propriétés mécaniques du béton exposé à de hautes températures	22
1.11. Influence de l'addition des fibres	22
1.11.1. <i>Résistance à la compression résiduelle</i>	<i>22</i>
1.11.2. <i>Résistance à la traction résiduelle.....</i>	<i>24</i>
1.11.3. <i>Module d'élasticité résiduel</i>	<i>26</i>
1.11.4. <i>Perte de masse</i>	<i>27</i>
1.11.5. <i>Conclusion</i>	<i>29</i>

Chapitre 2 : Protocole expérimental

2.1. Introduction	31
2.2. Etapes du travail expérimental	31
2.3. Matériaux	32
2.3.1. Gros granulats.....	32
2.3.2. Sable	32
2.3.3. Ciment	33
2.3.4. Adjuvant	34
2.3.5. Fibres	34
2.4. Procédures d'essai du traitement chimique des FPR.....	35
2.5. Présentation des fibres.....	35
2.6. Méthode de l'épaisseur du mortier couvrant pour formulation des bétons	36
2.7. Formulation et proportions des mélanges.....	38
2.7.1. Formulation des bétons ordinaires et à haute performance.....	38
2.7.2. Séquence de malaxage.....	40
2.7.3. Essais de caractérisation des bétons à l'état frais	41
2.7.4. Echantillonnage.....	41
2.7.5. Murissement.....	42
2.8. Essais sur béton durci	44
2.8.1. Résistances mécaniques.....	44
2.8.2. Porosité à l'eau.....	45
2.8.3. Traitement des éprouvettes avant les mesures	45
2.8.4. Mode opératoire de l'essai.....	46
2.8.5. Expression du résultat	46
2.8.6. Cycle de chauffage – refroidissement	47

Chapitre 3 : Effet de la fibre de polypropylène recyclée sur les propriétés du béton

3.1 Introduction	50
3.2 Programme expérimental	52
3.3 Résultats et discussion.....	53
3.3.1 Résistance à la compression.....	53
3.3.2 Résistance à la flexion	54
3.3.3 Module d'élasticité	57
3.4. Porosité à l'eau	58
3.5. Retrait de séchage	59
3.6. Conclusion.....	62

Chapitre 4 : Effet du traitement de surface des FPR sur les propriétés mécaniques du béton

4.1. Introduction	65
4.2. Programme expérimental	66
4.3. Résultats et discussions	66
4.3.1. <i>Propriétés mécaniques</i>	67
4.3.2. <i>Analyse des FPR avec le Profilomètre à laser et au MBE</i>	70
4.4. Résultats de la rugosité des FPR	71
4.4.1. <i>Présentation des FPR</i>	71
4.4.2. <i>Caractérisation de la rugosité (Profilométrie)</i>	72
4.4.3. <i>Observation au MEB</i>	75
4.5. Conclusion	76

Chapitre 5 : Effet des hautes températures sur le béton renforcé de FPR

5.1. Introduction	79
5.2. Programme expérimental	81
5.3. Cycle de chauffage et refroidissement	81
5.4. Résultats et discussion	81
5.4.1. <i>Résistance à la compression</i>	82
5.4.2. <i>Résistance à la traction</i>	83
5.4.3. <i>Module d'élasticité</i>	85
5.4.4. <i>Perte de masse</i>	86
5.5. Conclusion	88

Conclusion générale	91
----------------------------------	-----------

Références bibliographiques	94
--	-----------

Liste des figures

Figure 1. 1 : Consommation des matières plastiques en Algérie (Source: CNI, plasAlger)	5
Figure 1. 2 : Environnement à Ain-Temouchent	7
Figure 1. 3 : Image de pontage des fissures par des fibres de polypropylène (Faula, 2020).....	7
Figure 1. 4 : Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons (Hager, 2004).	28
Figure 1. 5 : Evolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage (Kanema 2007).	29
Figure 2. 1 : Courbe granulométrique des gros granulats.....	32
Figure 2. 2 : Sacs tissés et fibres de polypropylène recyclées (FPR) utilisées.	34
Figure 2. 3 : Observation visuelle des fibres.	36
Figure 2. 4 : Conservation des prismes utilisés pour l'essai de retrait de séchage.	42
Figure 2. 5 : Appareil de compression.....	44
Figure 2. 6 : Découpage des éprouvettes.	45
Figure 2. 7 : Mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau par immersion.	47
Figure 2. 8 : Four "KEITH" utilisé pour le chauffage des cylindres.	48
Figure 2. 9 : Cycle de chauffage et de refroidissement.	48
Figure 3. 1 : Variation de la résistance à la compression pour les BO et BHP en fonction du type et de la teneur en fibres.	54
Figure 3. 2 : Variation de la résistance à la flexion pour les BO et BHP en fonction du type et de la teneur en fibres.....	55
Figure 3. 3 : Variation du module d'élasticité pour les BO et BHP renforcés de FPR.....	57
Figure 3. 4 : Variation de la porosité des BO et BHP renforcés de FPR.....	59
Figure 3. 5 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité à l'eau des bétons renforcés de FPR.	59
Figure 3. 6 : Variation du retrait séchage des BO renforcés de FPR.....	61
Figure 3. 7 : Variation du retrait séchage des BHP renforcés de FPR.	61
Figure 3. 8 : Variation du retrait séchage des BO et BHP renforcés de FPR.....	62
Figure 4. 1 : Résistance à la compression du BO renforcé des FPR traitées avec du DP.	68
Figure 4. 2 : Résistance à la compression du BO renforcé avec des FPR traitées avec du PP.	68
Figure 4. 3 : Résistance à la traction par flexion du BO renforcé de FPR traitées avec du DP.	68
.....	68
Figure 4. 4 : Résistance à la traction par flexion du BO renforcé de FPR traitées avec du PP.....	69
Figure 4. 5 : Profilometre à laser Contour GT BRUCKER.....	70
Figure 4. 6 : Rugosité Ra.....	71
Figure 4. 7 : Observation visuelle des FPR.	72
Figure 4. 8 : Résultats du Profilomètre à laser des FPR non traitées.	73
Figure 4. 9 : Résultats du Profilomètre à laser des FPR traitées au DP.	74
Figure 4. 10 : Résultats du Profilomètre à laser des FPR traitées au PP.	75
Figure 4. 11 : Résultats du MEB des FPR Fibre non traitées.....	75

Figure 4. 12 : Résultats du MEB des FPR traitées au DP.	75
Figure 4. 13 : Résultats du MEB des FPR traitées au PP.	76
Figure 5. 1 : Résistance à la compression du béton ordinaire.	83
Figure 5. 2 : Résistance à la compression du béton à haute performance.	83
Figure 5. 3 : Résistance à la traction du béton ordinaire.	84
Figure 5. 4 : Résistance à la traction du béton à haute performance.	85
Figure 5. 5 : Module d'élasticité du béton ordinaire.	86
Figure 5. 6 : Module d'élasticité du béton à haute performance.	86
Figure 5. 7 : Perte de masse en % du béton ordinaire.	88
Figure 5. 8 : Perte de masse en % du béton à haute performance.	88

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Quantité de FPP pour la production de 1 m ³ de béton (Karahan, 2006).	10
Tableau 1. 2 : Analyse de la littérature.	27
Tableau 2. 1 : Granulométrie du sable.....	33
Tableau 2. 2 : Caractéristiques physiques et chimiques du ciment.	33
Tableau 2. 3 : Propriétés physiques de différentes fibres utilisées.....	35
Tableau 2. 4 : Composition des bétons (BO et BHP) en kg/m ³	39
Tableau 2. 5 : Essais des bétons à l'état frais	41
Tableau 3. 1 : Comparaison des résultats des propriétés mécaniques du béton renforcé de FPR et PPF.....	56
Tableau 4. 1 : Résistance à la compression et de la traction par flexion.	67

Liste des symboles

BHP : Béton à hautes performances

BO : Béton ordinaire

BRFDP : Béton de fibres de polypropylène recyclées traitées au dichromate de potassium.

BRFNT : Béton de fibres de polypropylène recyclées non traitées.

BRFPP : Béton de fibres de polypropylène recyclées traitées au permanganate de potassium.

DP : Dichromate de Potassium

FPP : Fibres de polypropylène

FPR : Fibres de polypropylène recyclées

PP : Permanganate de Potassium

R_a : Paramètre de rugosité

T_{cm} : Epaisseur moyenne de la couche de mortier.

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde entier en raison de sa durabilité, de sa résistance et de sa disponibilité. Cependant, il présente également des inconvénients tels que la faible résistance à la traction, la fissuration et la fragilité. Pour pallier ces inconvénients, le béton renforcé de fibres a été développé, qui consiste à incorporer des fibres dans le mélange pour améliorer les propriétés mécaniques et physiques du béton.

L'utilisation de fibres de polypropylène recyclées dans le béton renforcé présente plusieurs avantages, tels que la réduction des coûts et l'utilisation de matériaux recyclés, ce qui est bénéfique pour l'environnement. Cependant, avant d'utiliser ces fibres dans la construction, il est nécessaire d'évaluer leur performance en termes de propriétés mécaniques et physiques par rapport aux fibres de polypropylène commercialisées.

Cette étude vise à évaluer la performance des fibres de polypropylène recyclées dans le béton renforcé et à les comparer avec les fibres de polypropylène commercialisées en utilisant des tests de laboratoire. Cette évaluation sera réalisée en trois étapes distinctes, chacune abordant un aspect différent du sujet.

Première étude : évaluation comparative des propriétés mécaniques et physiques.

La première étude consistera à évaluer les propriétés mécaniques et physiques du béton renforcé avec des fibres de polypropylène recyclées et des fibres de polypropylène commercialisées. Pour ce faire, des échantillons de béton seront préparés avec différentes proportions de fibres de polypropylène recyclées et commercialisées. Les échantillons seront soumis à des tests de compression, de flexion et de traction pour évaluer leur résistance mécanique.

En outre, les propriétés physiques du béton, telles que la densité, la porosité et la résistance à l'eau, seront également mesurées. Les résultats des tests seront ensuite comparés pour déterminer la performance des fibres de polypropylène recyclées par rapport aux fibres de polypropylène commercialisées.

Deuxième étude : amélioration des caractéristiques de liaison entre les fibres de polypropylène recyclées et le béton ordinaire

La deuxième étude vise à améliorer les caractéristiques de liaison entre les fibres de polypropylène recyclées et le béton ordinaire. Pour ce faire, deux traitements chimiques de

surface seront comparés : le dichromate et le permanganate de potassium. Ces traitements chimiques visent à améliorer la rugosité de la surface des fibres de polypropylène recyclées, ce qui améliorera leur adhérence au béton.

Des échantillons de béton renforcé seront préparés avec des fibres de polypropylène recyclées traitées avec les deux traitements chimiques, et leur résistance mécanique sera mesurée à l'aide de tests de compression, de flexion et de traction. Les résultats des tests seront comparés pour déterminer l'effet de chaque traitement chimique sur les propriétés mécaniques du béton renforcés de fibres de polypropylène recyclées.

Troisième étude de cette étude porte sur l'effet des hautes températures sur le béton ordinaire et à haute performance renforcés de fibres de polypropylène recyclées à des volumes de 0,2%; 0,4% et 0,6% et une vitesse de chauffage de 1°C/minute. L'exposition à des températures élevées peut avoir un impact significatif sur les propriétés du béton. Les fibres de polypropylène sont utilisées dans le béton pour améliorer sa résistance à la fissuration et sa durabilité. Cependant, leur comportement à haute température est peu connu. Cette étude vise donc à évaluer la résistance à la température des différents bétons renforcés de fibres de polypropylène recyclées et à déterminer l'effet des fibres sur la résistance du béton à la dégradation thermique. Les résultats de cette étape peuvent aider à mieux comprendre le comportement des fibres de polypropylène recyclées dans les bétons soumis à des températures élevées et à optimiser leur utilisation dans des applications réelles.

Chapitre 1 :

Revue bibliographique

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1.1. Introduction

En raison de la demande croissante, la production mondiale de plastique d'origine fossile a considérablement augmenté, passant de 1,5 million de tonnes en 1950 à 288 millions de tonnes en 2012 et 322 millions de tonnes en 2015. Il est raisonnable de supposer que cette tendance à la hausse se poursuivra. Plusieurs facteurs contribuent à cette croissance rapide de la consommation de plastique, tels que sa faible densité, ses capacités de fabrication, sa longue durée de vie, sa légèreté et son faible coût de production (Siddique et al., 2008). Si cette tendance mondiale de production et de consommation de matières plastiques est à la hausse, l'Algérie ne fait pas exception. Selon les statistiques du Centre International de Conférences d'Alger (CNI), la consommation de plastique en Algérie a augmenté d'environ 9% par an au cours des dernières années, atteignant une consommation annuelle de 23 kg par habitant en 2017, contre 10 kg par habitant en 2007. On estime qu'elle atteindra 25,8 kg par habitant d'ici la fin de l'année 2020. De plus, en 2017; 59,1% des matières plastiques produites étaient utilisées dans les emballages, ce qui a entraîné une augmentation considérable des déchets plastiques (Fig. 1.1).

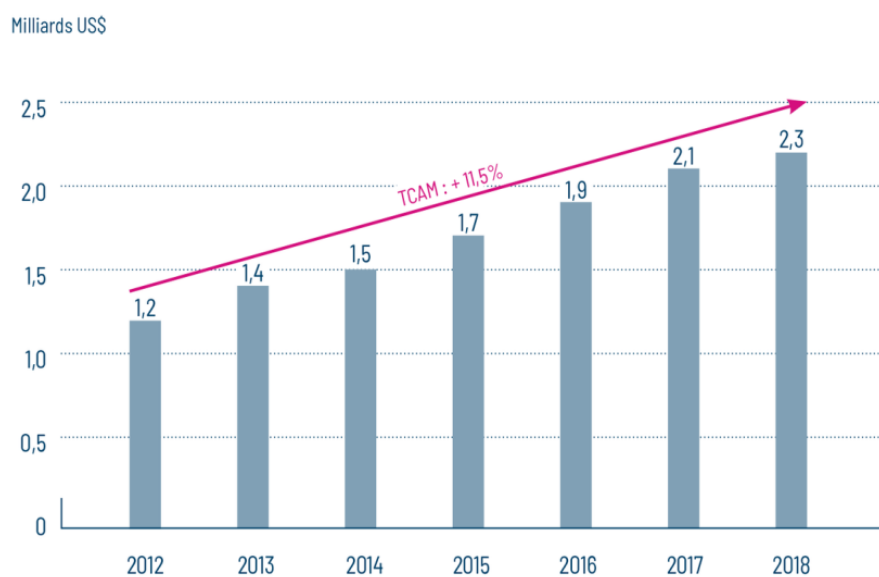


Figure 1. 1 : Consommation des matières plastiques en Algérie (Source: CNI, plasAlger)

La valorisation des déchets consiste à leur donner une seconde vie à travers la réutilisation, la récupération ou encore le recyclage. De plus, le plastique, qui n'est pas corrosif, est souple, flexible, durable et possède des caractéristiques d'isolation thermique et électrique élevées (Akcaozog, 2015). L'utilisation répandue du plastique dans la plupart des activités quotidiennes entraîne une augmentation du volume de déchets plastiques (Fig. 1.2) (Wahab et al., 2007). En effet, la moitié des produits en plastique sont à usage unique, ce qui génère différents types de déchets plastiques qui mettent des centaines d'années à se dégrader (Huysman et al., 2017). Cette situation engendre de graves problèmes environnementaux tels que des risques pour la santé humaine, des effets sur la vie animale et l'eau (entre 8 et 24 tonnes de déchets plastiques se retrouvent dans les océans chaque minute) (Haward, 2018 ; Daana et al., 2008).

Une solution efficace pour améliorer cette situation est de gérer de manière adéquate les matériaux polymères dans divers secteurs de l'économie. De nos jours, de grandes quantités de déchets plastiques sont utilisées dans l'industrie de la construction. Le béton joue un rôle important dans le processus de recyclage des déchets (Roslowaski et al., 2018; Kadela et al., 2015), en particulier des déchets plastiques, dans la construction. Les déchets plastiques peuvent être utilisés dans le béton sous forme d'agrégat (dans le béton ou le béton bitumineux), d'agents synthétiques, de liants par fusion, de résidus dans le béton, de poudre et de fibres synthétiques (Kadela et al., 2017; Pacheco et al., 2019; Zalegowski et al., 2020). Selon Czanecki, le remplacement des fibres de polymère vierges par des fibres de plastique recyclé semble devenir une pratique courante. Les propriétés des fibres recyclées peuvent même être supérieures à celles des fibres vierges et dépendent de la méthode de fabrication, de la composition et d'autres facteurs (Kadela et al., 2017).



Figure 1. 2 : Environnement à Ain-Temouchent

Traditionnellement, les fibres sont utilisées dans le béton pour améliorer ses performances après fissuration en pontant les fissures (Fig. 1.3) et en empêche la propagation des fissures de retrait (Balaguru 1992, Bentur et al 2006; Brandt et al. 2009).

Le mécanisme d'absorption d'énergie et de contrôle des fibres dans le béton a été étudié par (Kozłowski et Kadela 2015, Kozłowski et al., 2015; Zollo 1997).



Figure 1. 3 : Image de pontage des fissures par des fibres de polypropylène (Faula, 2020).

1.2. Histoire des fibres dans les matériaux de construction

Les fibres naturelles les plus couramment utilisés qui entrent dans les bétons de fibre sans la paille et le crin de cheval. Dans les temps anciens, les ingénieurs et les architectes utilisés

de la paille, des poils d'animaux et différentes fibres naturelles pour protéger les structures contre les effets destructeurs (Erba 2003). Les fibres d'acier ont commencé à être utilisées dans la fabrication du béton dans les années 1970. Plus tard, le béton a été testé en ajoutant des fibres artificielles comme le carbone (Zhang et al., 2012), le verre (Alves et al., 2020), l'amiante, le plastique (Anandan et Alsubih 2021), et des fibres naturelles comme le chanvre (Belkadi et al., 2018), le palmier (Tioua et al., 2017) et le bambou (Zhang et al., 2012). Comme chaque fibre a des propriétés différentes, ces diverses fonctions sont apparues. Lorsqu'une étude menée par l'association des ingénieurs appartenant aux forces armées américaines a montré que les fibres résistent à l'abrasion et aux impacts. En outre, le développement des fibres synthétiques est très bénéfique pour l'industrie, et aujourd'hui, de nouveaux types de fibres synthétiques, notamment le polypropylène (Pakravan et al., 2012), la Polyofeline et l'alcool polyvinylique (Scheffler et al., 2013) sont utilisés dans divers projets de construction. A l'heure actuelle, développement de la technologie du béton, différents types de mélange de béton sont produits à des fins diverses. Alors que différents additifs chimiques et minérales sont utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques et de durabilité du béton, différents types de fibres sont utilisés pour augmenter la ductilité.

1.3. Fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère léger produit artificiellement dans la catégorie des matériaux thermoplastiques. Il est utilisé dans la production de nombreux produits dans lesquels la durabilité et l'élasticité sont attendues sous la forme de matières premières. Les produits en polypropylène ont un large éventail d'utilisations en génie civil et d'applications en combinaison avec des matériaux d'ingénierie générale.

1.3.1. Propriété des fibres de polypropylène

Comme il a été souligné précédemment, le polypropylène est utilisé dans la production de fibres qui sont incorporées aux mélanges de béton dans diverses applications de génie civil ainsi que dans les produits textiles. Les raisons de la préférence pour les fibres polypropylène peuvent être énumérées comme leur faible coût, leur facilité de mise en œuvre, leur haute résistance, leur faible densité et leur résistance chimique (Zhu and Yang, 2006). Les fibres de polypropylène sont le système de renforcement le plus léger en comparaison aux autres systèmes de renforcement tel que l'acier. Les fibres de polypropylène ont 1 effet positif sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du béton (Madhavi et al., 2014).

1.3.2. Classification et performance des fibres de polypropylène.

Les fibres de polypropylène sont fabriquées à partir de 100 % d'homo-polypropylène en deux types, à savoir F et M. Les symboles Fet M sont utilisés pour représenter les fibres Fibrilles et Multifilamentées, respectivement. Les fibres de type M sont utilisées dans les chapes intérieures en ce car ils ne sont pas visibles à la surface en raison de leur finesse. Les fibres de polypropylène de type F conviennent mieux aux chapes de béton des sols industriels à usage intensif en raison de leurs propriétés de durabilité et de résistance.

Les fibres de polypropylène sont chimiquement résistantes aux acides et aux alcalis et peuvent être utilisé avec tous les ciments. Une exposition prolongée à la lumière solaire endommage la fibre. Par contre, elle est résistante aux solvants organiques, ce qui rend pratique son utilisation dans les stations de gaz (Celep, 2010). Sa conductivité électrique et sa transmission thermique sont extrêmement basses. Son expansion thermique est négligeable. Comme ses fibres n'absorbent pas l'eau, elle n'affectent pas le rapport E/C. Elles ne sont pas réactives aux acides et aux oxydes, et elles sont résistantes à la corrosion et à la décomposition (Karahana, 2006). Les fibres de polypropylène ne sont pas efficaces pour augmenter la résistance mécanique du béton par rapport aux fibres d'acier. Mais elles offrent 1 propriété d'absorption d'énergie au béton et diminuent le retrait plastique. Lorsque les éléments structurels en béton armé sont exposés à des effets de haute température, une diminution de la résistance à la compression du béton, 1 défaillance et la formation de fissures produisent. Des fibres de polypropylène forment des canaux en fondant à 170 °C et les gaz s'échappent en empruntant ces canaux ; la pression interstitielle diminue le degré de dommages au béton diminue en conséquence (Bahadur, 2010).

1.3.3. Domaine d'utilisation et ratio des fibres de polypropylène

Selon la norme ASTM C 1116 (2000), il est recommandé d'utiliser au moins 0,9 kg de fibres de polypropylène par 1 m³ de béton. La quantité de fibres peut varier de 0,05 % à 2 %, voire jusqu'à 5 %. Si l'on souhaite obtenir un comportement à faible densité et une résistance élevée à l'abrasion, le dosage de fibres de polypropylène peut être augmenté jusqu'à 0,2 % en volume (Karahana, 2006).

Pour obtenir un mélange de béton optimal en termes de performance mécanique et de durabilité, la quantité de fibres utilisée doit être comprise entre 0,5 % et 1,5 % en volume. Ce taux peut être augmenté jusqu'à 2 % en fonction des propriétés du béton produit. Cependant, si le taux est inférieur à 0,5 %, l'effet sera incertain (Simsek, 2016).

Dans le cas du plâtre et du mortier de béton, les fibres de polypropylène peuvent être utilisées à raison de 2 kg par tonne, et jusqu'à 5 kg pour le mortier de réparation et le béton projeté. Elles doivent être uniformément dispersées dans le mélange de béton, sans floculation. La quantité et la longueur des fibres peuvent varier selon les besoins. Le tableau 1.1 présente les recommandations quant à la quantité de fibres de polypropylène pour la préparation d'un mètre cube de béton.

Comme mentionné précédemment, les fibres de polypropylène sont produites artificiellement en tant que textiles et sont largement utilisées dans l'industrie de la construction en tant que renforcement passif (Celep, 2010). Voici quelques domaines d'utilisation des fibres de polypropylène dans l'industrie de la construction :

- Matériaux bitumineux, enduits de plâtre, béton armé, chape de béton et structures hydrauliques (Karahana, 2006).
- Sols industriels, garages, structures marines exposées aux agressions environnementales, aéroports, vibrations, réservoirs d'eau, piscines et sols fins (Tanrioven, 2009).
- Tous les éléments préfabriqués, la fabrication de tuyaux, la production de pots de fleurs, de bordures et de tuiles (Gungor, 2013).

Tableau 1. 1 : Quantité de FPP pour la production de 1 m³ de béton (Karahana, 2006).

Polypropylène	Intérieur	Extérieur	Robuste
Type de fibre	M	F	F
Dosage minimal (g/cm ³)	600	900	1800
Dosage optimal (g/cm ³)	1200	2700	3600
Longueur (mm)	6- 9- 12- 15	6- 9- 12- 15-	19- 25

1.4. Importance du béton fibré

A l'heure actuelle, avec le développement de la technologie du béton, différents types de mélange de béton sont produits à diverses fins (Simsek, 2016). Bien que différents produits chimiques et les ajouts minéraux sont utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons, divers types de fibres sont utilisés pour augmenter la durabilité. Les fibres distribuées de manière aléatoire dans le béton empêchent la formation et la croissance des fissures qui se produisent dans le béton à différents stades, augmenter ainsi la capacité d'absorption d'énergie du béton par la dispersion des contraintes internes. L'efficacité des fibres utilisées varie en fonction du rapport de finesse, de géométrie, de la résistance à la

traction, du type et du volume des fibres (Zenal, 2008). La ductilité du béton fibré dépend de la capacité des fibres dispersées dans le béton à ponter les fissures. La propagation de la fissure est empêchée soit en bloquant les contraintes qui se produisent pendant la formation de la fissure par les fibres, soit en les transférant des zones solides au moyen de la fibre (Mehta et Monteiro, 2014). Le béton fibreux a été utilisé pendant de nombreuses années dans diverses applications telles que les bâtiments industriels, les structures hydrauliques, le béton projeté, la stabilité des pentes revêtement des tunnels, les aéroports et les revêtements en béton des autoroutes. Le béton confiné avec les fibres d'acier est utilisé dans les structures exposées à des conditions de travail difficiles (Barahan et al., 2015).

Les avantages du béton fibré sont énumérés ci-dessous :

- augmente la rigidité à l'impact des charges dynamiques (Simsek, 2016).
- La résistance de l'élément structurel contre les effets sévères dus à la tension causée par la force traction et de flexion dans la structure peut être augmentée de manière significative avec l'utilisation d'armatures en acier et de fibres (Barahan et al., 2015).
- La ductilité de la fibre est élevée par rapport au béton normal. Par rapport à cela, il est plus résistant aux effets des impacts, des charges vibrantes et dynamiques que le béton traditionnel (Celep, 2010).
- Diverses troubles du comportement structurel peuvent être évitées si la fibre est utilisée avec les armatures en acier comme renforcement (Simsek, 2016).
- Résistance à la fatigue, la torsion et à l'effort tranchant (Simsek 2016).
- Outre sa capacité de rétention d'énergie, il présente une résistance élastique, une résistance aux chocs, et une résistance aux fissures élevées (Barahan et al., 2015).
- Ces qualités supérieures du béton fibreux permettent la réduction de la section transversale en profondeur, ce qui permet d'économiser les matériaux (Barahan et al., 2015).

1.5. Rôle des fibres

Les fissures jouent un rôle important car elles transforment les structures en béton en éléments perméables et, par conséquent, en éléments présentant un risque élevé de corrosion. Un risque élevé de corrosion. Les fissures ne réduisent pas seulement la qualité du béton et le rendent esthétiquement inacceptable, mais elles rendent également les structures hors service. Si ces fissures ne dépassent pas une certaine largeur, elles ne sont pas nuisibles à une structure ni à son aptitude au service. Structure ni à son aptitude au service. Il est donc important de

réduire la largeur des fissures, ce qui peut être réalisé en l'ajout de fibres de polypropylène au béton (Bruce, 2004).

Ainsi, l'ajout de fibres dans la matrice du béton de ciment pontes ces fissures et les empêche de s'ouvrir davantage. Afin d'obtenir une plus grande déflexion dans la poutre, des forces et des énergies supplémentaires sont nécessaires pour arracher ou fracturer les fibres. Ce processus, en plus de préserver l'intégrité du béton, améliore la capacité de charge de l'élément structurel au-delà de la fissuration. Cette amélioration crée une longue partie descendante après le pic dans la courbe de charge-flèche. Les barres d'acier d'armature dans le béton ont le même effet bénéfique car elles agissent comme de longues fibres continues. Les fibres discontinues courtes ont toutefois l'avantage d'être mélangées et dispersées uniformément dans le béton.

Les principales raisons de la formation de fissures sur le retrait plastique, le tassement plastique, les dommages causés par le gel et dégel, par le feu, etc.

1.5.1. Retrait plastique

Il se produit lors ce que l'eau de surface s'évapore avant que l'eau de purge n'atteigne la surface. Les fibres de polypropylène réduisent la surface des fissures dues au retrait plastique en raison de leur flexibilité et de leur capacité à se conformer à la forme. L'ajout de 0,1 % en volume de fibres s'avère efficace pour réduire l'étendue des fissures de 5 à 10. L'ampleur de la réduction des fissures est proportionnelle à la teneur en fibres dans le béton.

1.5.2. Tassement plastique

Les fibres de polypropylène peuvent réduire le tassement plastique du béton en améliorant sa résistance à la traction et en réduisant la fissuration. Cependant, le tassement plastique peut également être affecté par la quantité, la longueur et la distribution des fibres dans le mélange de béton. Par conséquent, il est important de choisir la quantité et les caractéristiques des fibres de polypropylène appropriées en fonction des exigences spécifiques du projet de construction.

1.5.3. Dommages causés par le gel et dégel

Un petit ajout de fibres de polypropylène dans le béton réduit le flux d'eau à travers la matrice de béton en empêchant la transmission de l'eau par les modes normaux de pénétration, par exemple les capillaires, les pores dans les structures, etc. les implications de

ces qualités avec l'ajout des fibres de polypropylène dans le béton améliorent l'hydratation du ciment, la séparation des agrégats sera réduite et l'écoulement de l'eau à travers le béton qui cause la détérioration par l'action du gel et dégel sera réduit ainsi que la corrosion des barres d'armatures créant un environnement dans lequel une durabilité accrue peut se produire.

1.6. Effet des fibres de polypropylène sur le béton frais

Les propriétés du béton frais peuvent être améliorées par l'ajout de fibres de polypropylène, comme l'ont montré des études antérieures. En effet, l'ajout de ces fibres peut avoir un effet significatif sur la viscosité et la consistance du mélange, ainsi que sur sa résistance à la ségrégation (Toutoungi & Bayasi, 2004; Al-Jabri et al., 2012; Ganesan et al., 2016).

Par ailleurs, l'ajout de fibres de polypropylène peut également réduire la formation de fissures induites par le retrait plastique, améliorant ainsi la résistance à la fissuration plastique du béton frais (Batayneh & Marie, 2007; Gupta & Sankar, 2018). En outre, des études ont montré que l'ajout de ces fibres peut également améliorer la durabilité du béton en réduisant sa perméabilité et en améliorant la résistance à la corrosion des armatures (El-Tawil & Naaman, 2015).

Il est donc clair que l'ajout de fibres de polypropylène peut avoir des effets bénéfiques sur les propriétés du béton frais, améliorant sa résistance et sa durabilité.

1.7. Effets des fibres de polypropylène sur le béton durci

La résistance à la compression du béton est un paramètre vital car elle détermine les autres paramètres tels que le module d'élasticité, la traction, la flexion etc. L'effet de la fibre de polypropylène sur la résistance à la compression du béton a été discuté dans de nombreuses publications et on a observé que la fibre de polypropylène diminue ou augmente la résistance à la compression du béton.

Cette section comprend la littérature sur diverses recherches qui évaluent la performance du béton renforcé de fibres de polypropylène.

Bayasi et Zeng (1993) ont étudié les propriétés du béton renforcé de fibres de polypropylène. Différentes longueurs et fractions volumiques de fibres de PP fibrillées ont été

incorpore aux mélanges. Les auteurs ont conclu que l'addition de fibres de PP avait tendance à augmenter la perméabilité à l'eau du béton. Les fibres ont eu un effet favorable relativement faible sur la résistance à la compression et la ténacité du béton lorsque des fibres de 1 cm et de 3 cm étaient utilisées, respectivement. Ils ont également conclu que pour des volumes égaux ou inférieurs à 0,3 %, les fibres de 3 cm de longueur étaient plus favorables à l'amélioration de la résistance après post-pic, mais que pour un volume de 0,5 %, les fibres de 1 cm de long étaient plus efficaces.

Kakooei et al. (2012) ont évalué l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés de la structure en béton armé. Dans leur étude, l'influence de différentes quantités de teneur en fibres de polypropylène sur les propriétés du béton a été étudiée en mesurant la perméabilité, la résistivité électrique et la résistance à la compression. Ils ont constaté que la résistance à la compression du béton augmentait proportionnellement à l'augmentation du dosage des fibres de PP. Ils ont conclu que la présence de fibres PP avait retardé le processus de dégradation en réduisant la perméabilité, le retrait et d'expansion du béton qui peut affecter de manière significative la durée de vie de la structure. Ils ont également conclu que la résistivité électrique du béton avec un dosage de 1 et 1,5 kg/m³ avait des valeurs plus élevées par rapport aux autres échantillons.

Les propriétés mécaniques du béton renforcé de fibres de PP et les effets des matériaux pouzzolaniques ont été étudiés par Alhozainy et al. (1996). Des fibres de PP fibrillées à un dosage allant de 0,05 % à 0,3 % ont été ajoutées au mélange contenant différentes compositions de liant cimentaire comprenant du ciment, des cendres volantes, de la fumée de silice et du laitier. Les auteurs ont résumé que la fibre de polypropylène n'avait aucun effet significatif sur la résistance à la compression et la ténacité du béton conventionnel. De plus, les fibres de PP ont eu un effet sur la résistance à la flexion. Avec l'ajout de 0.1 %, 0.2% et 0.3% de fraction volumique de fibres a augmenté la résistance à la flexion de 44 %, 271% et 271% respectivement. En outre, les fibres de PP ont augmenté la résistance du béton à la première fissure et à la rupture par impact. Ils ont également conclu que, bien que les pouzzolanes réduisent généralement la résistance à l'impact du béton, les interactions positives entre les fibres de PP et les pouzzolanes conduisent à une résistance à l'impact accrue du béton fibreux avec pouzzolanes.

L'effet des fibres de PP sur les propriétés du béton frais et durci dans l'environnement du Golfe Arabe a été étudié par Al-Thayib et al. (1998). Ils ont appliqué des fibres de polypropylène commerciales en filament fibrillés de 20 mm d'épaisseur dans un mélange de

béton préparé avec différents rapports eau-ciment. L'effet de l'ajout de fibres sur le retrait plastique, le retrait séchage et les propriétés mécaniques, y compris la résistance à la compression, à la traction et à la flexion des mélanges, a été évalué. Ils ont constaté que l'inclusion de fibres de polypropylène élimine la fissuration due au retrait plastique dans les dalles soumises à une température aussi élevée que 46 °C, mais que ce n'était pas le cas pour le retrait séchage. Ils ont également constaté que l'addition de fibres de PP améliorait légèrement la résistance à la traction et à la flexion, mais pas celle de la compression du béton. Les auteurs ont conclu que la fibre PP n'a pas aidé à réduire la perte de résistance du béton qui se produit en raison du durcissement par temps chaud.

Aly et al. (2008) ont évalué l'effet des fibres de PP sur le retrait et la fissuration des bétons. Ils ont utilisé une fibre PP commerciale sous la forme de filament de fibres fibrillées collées de 19 mm de longueur avec différentes fractions volumiques de fibres allant de 0,05 à 0,5 % dans les mélanges. Ils ont conclu que des dosages croissants de fibres PP dans le béton provoquaient des augmentations faibles mais constantes concernant le retrait du béton. Les augmentations du retrait sont notables dans les bétons sans aucune cure (exposés à 1 jour). Dans les bétons avec une cure humide de 7 jours, les différences de retrait ne sont pas significatives. Les auteurs ont également conclu que les mélanges de béton qui incorporent des fibres de PP sont plus perméables et donc plus vulnérables au séchage et ils ont constaté une perte d'humidité plus importante pendant la période de séchage en les comparant aux mélanges sans fibres.

Poon et al. (2004) ont étudié le comportement en compression d'un béton haute performance renforcé de fibres soumis à une température élevée. Une combinaison de fibres d'acier (accrochées) et de polypropylène (19 mm de longueur) avec différentes fractions volumiques incorporés au mélange. Ces auteurs ont conclu que les fibres de PP augmentaient légèrement la ténacité et la résistance à la compression du béton pour les spécimens non chauffés, mais qu'elles entraînaient une perte plus rapide de la résistance à la compression et de la ténacité après l'exposition à des températures élevées. Ils ont également déclaré que l'utilisation combinée de fibres de PP et de fibres d'acier présentait peu d'avantages par rapport à l'utilisation de fibres d'acier uniquement.

La durabilité du béton avec cendres volantes renforcé par des fibres de polypropylène ont également été étudiées par Karahan et Atis (2011). Les fibres de PP fibrillées ont été ajoutées au mélange de béton dans différentes fractions de volume. Le mélange contenant 15 % et 30 % de cendres volantes en remplacement du ciment sur une base de masse a été préparé en

modifiant le béton de ciment Portland de contrôle. Ils ont conclu que l'influence de la fibre PP sur la résistance à la compression et le module d'élasticité était insignifiante. Les valeurs de la porosité, de l'absorption d'eau et du coefficient de sportivité ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes et en fibres pour tous les mélanges de béton. Ils ont également conclu que la présence de fibres de PP et de cendres volantes dans le béton, que ce soit séparément ou ensemble, réduisait le retrait séchage. La résistance au gel-dégel du béton à base de fibres de PP s'est avérée légèrement accrue par rapport au béton sans fibres.

1.8. Modification de la surface des fibres de polypropylène

La tentative de modifier les propriétés de surface d'un polymère a été étudiée par de nombreux chercheurs. Certains traitements rapportés dans la littérature pour les fibres dans l'application du béton, comprennent le revêtement, le traitement à base de plasma, l'acide et d'autres traitements chimiques. Ces traitements de surface peuvent provoquer une réaction interraciale entre la fibre et la matrice cimentaire.

Le dioxyde de titane (TiO_2), l'alcool polyvinylique (PVA) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) sont parmi les agents d'enduction qui ont été employés pour modifier les caractéristiques de mouillage des tissus ou des fibres de polypropylène. L'augmentation du taux d'hydrophilie à la surface de la fibre pourrait éventuellement améliorer la performance de liaison entre la fibre et l'interface de la matrice de ciment.

Le revêtement de nanoparticules de TiO_2 sur des fibres de polypropylène a été étudié par Szabová et al. (2009). La surface des fibres de polypropylène non-tissé (PPNT) a d'abord été activée par un traitement au plasma sous pression, puis revêtue de TiO_2 à l'échelle nanométrique dans une dispersion aqueuse et une dispersion au chitosan. Le Microscope à Balayage Electronique (MEB) a été utilisé pour comparer la surface des spécimens. Ils ont constaté que la surface de la fibre de polypropylène était plus rugueuse en utilisant la technique de dispersion dans l'eau.

Xu et al. (2012) ont également rapporté que l'application de couches de nano TiO_2 de 60 nm sur la surface de fibres de PET, PP et viscosse affecte significativement les propriétés de surface de la fibre. Les auteurs ont conclu que l'augmentation de l'énergie de surface était plus importante dans la fibre de viscosse en raison de la présence d'un plus grand nombre de groupes hydroxyle. Les propriétés relativement plus lisses et l'énergie de surface plus élevée

du PET par rapport au PP conduisent à un film plus uniforme et à une meilleure adsorption du TiO_2 .

La caractérisation de la surface des fibres de polypropylène traitées au plasma a également été étudiée par Wei (2004). L'auteur a traité les fibres de PP produites en laboratoire avec un plasma gazeux froid et les fibres traitées ont été caractérisées à l'aide d'un spectrométrie photoélectronique à rayons X (XPS), d'un microscope à force atomique (AFM) et d'un microscope électronique à balayage environnemental (ESEM). L'auteur a conclu que les propriétés de surface des fibres de polypropylène traitées au plasma peuvent être considérablement améliorées en changeant leurs caractéristiques physiques et chimiques de surface.

Fialova et al. (2012) ont étudié l'influence du traitement au plasma atmosphérique sur les propriétés de mouillage du polypropylène et la cohésion des fibres de PP à la matrice cimentaire. Ils ont constaté que le traitement au plasma améliore la mouillabilité des fibres de polypropylène. Dans leur essai, les résultats du test de retrait au repos indiquent que la cohésion des fibres de PP traitées au plasma a été significativement améliorée.

Ning et al. (2010) ont étudié la modification des fibres de PP par l'acide acrylique et son influence sur la propriété mécanique du mortier de ciment. Les auteurs ont conclu que les fibres de PP modifiées peuvent améliorer leur effet de renforcement sur le mortier de ciment. La surface des fibres modifiées greffée avec l'acide acrylique améliore sa performance hydrophile.

López-Buendía et al. (2013) ont modifié la surface de la fibre de PP en traitant la fibre avec un traitement de surface alcalin afin d'augmenter l'adhésion des fibres de PP au béton. Ils ont utilisé une fibre PP d'un diamètre de 0,74 mm et d'une longueur de 40 mm. La modification chimique de la fibre PP traitée en surface a été caractérisée par la spectroscopie à infrarouge et l'analyse de la surface de la fibre a été effectuée par la spectroscopie photoélectronique à rayons X. Les auteurs ont conclu que les fibres traitées présentaient des caractéristiques similaires à celles du béton. Les auteurs ont conclu que les fibres traitées présentent des performances supérieures par rapport au béton standard ou lorsque des fibres PP non traitées sont ajoutées au béton.

1.9. Béton exposé à de hautes températures

Le béton est largement utilisé dans l'ingénierie structurelle grâce à sa résistance élevée à la compression, son faible coût et l'abondance de sa matière première. Mais le béton ordinaire présente quelques inconvénients, par exemple, le retrait et la fissuration, une faible résistance à la traction et résistance à la traction et à la flexion, une faible ténacité, une grande fragilité, une faible résistance aux chocs, etc., qui limitent ses applications. En outre, contrairement au bois, le béton est un matériau incombustible, ce qui lui donne une sécurité par rapport à l'incendie et le rend capable de supporter des températures élevées. Le béton a la capacité à consommer de l'énergie à un taux plus élevé que la plupart des autres matériaux de construction.

La plage généralement considérée de la résistance à la compression à 28 jours du béton prêt à l'emploi est de 20 à 40 MPa, et le béton commercialisé se situe généralement entre 28 et 35 MPa. Compte tenu des besoins de la construction moderne, les recherches menées au cours des dernières décennies ont permis d'inventer et de développer l'invention et le développement de plusieurs formes de béton à résistance accrue à la compression. L'une de ces formes est le "béton à haute performance" (BHP). Ces dernières années, le BHP est devenu un substitut du béton ordinaire (BO) conventionnel (Cheng et al., 2004).

Il n'y a pas de différence précise entre la composition du BHP et du BO sauf pour le comportement structurel qui est différent en termes de perte de résistance et d'écaillage explosif (Phan et al., 2003). En raison de sa faible porosité, les BHP sont plus vulnérables à l'écaillage explosif que les BO. Initialement, on considérait que les BHP convenaient pour la construction d'applications offshore et d'infrastructures. Cependant, au cours des deux dernières décennies, sa polyvalence a également attiré les constructeurs à l'utiliser dans les bâtiments de grande hauteur (Kodur et al., 2003). Néanmoins, il y a un manque d'information sur la performance à long terme du béton sous des impacts environnementaux sévères (Basheer et al., 2001). La définition exacte du BHP en termes de valeurs numériques n'est pas possible sans un solide degré de justification (Caldarone., 2008). La version actualisée de l'American Concrete Institute (ACI) "ACI 363R-92 définit le béton avec une résistance à la compression supérieure à 55 MPa ou plus comme le BHP. L'Eurocode 2 permet d'utiliser la résistance du béton jusqu'à 105 MPa de résistance cubique. Il n'y a pas de définition du BHP dans l'Eurocode 2, mais les mesures et les formules changent lorsque la résistance du béton est supérieure à C50/60.

Cependant, la définition du béton à haute résistance évolue continuellement. Aujourd'hui, le BHP d'une résistance à la compression allant jusqu'à 140 MPa est fréquemment utilisé pour les applications structurelles (Cheng et al., 2004).

Avec l'utilisation croissante du béton à haute performance (BHP) pour la construction et d'autres applications structurelles (par exemple, les immeubles de grande hauteur, les ponts et les tunnels), le comportement du matériau à haute température est devenu un sujet important pour de nombreuses recherches au cours de la dernière décennie (Nechnech et al., 2001; Garwin et al., 2003). Les HSC offrent de meilleures performances structurelles, notamment en termes de résistance et de durabilité, par rapport au béton traditionnel à résistance normale (BO). Cependant, de nombreuses études, par exemple (Phan, 1996; Phan et al., 1997; Brite, 1999), ont montré que la performance au feu du béton à haute performance diffère de celle du béton à résistance normale qui présente un comportement plutôt bon dans ces conditions.

Le problème majeur des structures en BHP exposées à des températures élevées est l'écaillage thermique, qui se traduit par une perte rapide des couches superficielles du béton à des températures supérieures à environ 200-300~, le noyau du béton est donc exposé à ces températures élevées, ce qui augmente le taux de détérioration du béton.

Ces températures, augmentant ainsi le taux de transmission de la chaleur à la partie centrale de l'élément et en particulier à l'armature, ce qui peut constituer un risque pour l'intégrité de la structure en béton. On pense généralement que les principales raisons de l'écaillage thermique sont les suivantes.

L'accumulation d'une pression interstitielle élevée près de la surface du béton chauffé, suite à l'évaporation rapide de l'humidité, et la libération de l'énergie stockée due aux contraintes thermiques résultant des valeurs élevées des déformations restreintes causées par les gradients de température (Phan, 1996; Phan et al., 1997; Brite, 1999; Ulm et al., 1999; Garwin et al., 1999). Néanmoins, l'importance relative de ces deux facteurs n'est pas encore établie nécessite encore des études complémentaires, tant expérimentales que théoriques. Les résultats des recherches effectuées jusqu'à présent montrent que la performance au feu des structures en BHP est influencée par plusieurs facteurs (Nechnech et al., 2001, Garwin et al., 2003), comme la teneur en eau initiale du béton, la vitesse d'augmentation de la température (intensité du feu), la porosité (densité) et la perméabilité du béton, sa résistance à la compression, le type de granulats, les dimensions et la forme de la structure, son armature latérale et les conditions de chargement. Récemment, une étude statistique des facteurs susmentionnés et leurs interactions mutuelles ont été analysées à l'aide de la méthode

ANOVA (analyse de la variance) appliquée aux résultats de certaines études expérimentales systématiques et spécialement planifiées (Sullivan, 2001; Garwin et al., 2002).

Les déformations du béton soumises à une température élevée et à une charge mécanique et en particulier au phénomène de fluage transitoire thermique résultant des déformations thermiques induites par la charge, sont d'une grande importance pour l'évaluation correcte de la performance des structures en béton dans ces conditions.

1.9.1. Evolution de la 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. Les principales transformations de la matrice cimentaire observées lors de la montée en température par Schneider (Schneider et al., 1982; Noumowé 1995; Castellote et al., 2004; Alonso and Fernandez, 2004; Toumi, 2010) sont :

- 20-120 °C: départ de l'eau libre et adsorbée (Noumowé, 1995), décomposition de l'ettringite à partir de 60-70 °C (Castellote et al., 2004). Premiers signes de décomposition de C-S-H avant 100 °C (Alonso and Fernandez, 2004) ;
- 130-170 °C: double réaction endothermique lors de la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Alarcon-Ruiz et al., 2005) ;
- 450-550 °C: décomposition de la portlandite (deshydroxylation par déshydratation) (Noumowé 1995) ;
- 600-750 °C: décomposition des C-S-H, formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (Schneider et al. 1982). Décomposition de carbonate de calcium à partir de 600°C ;
- 1200 °C : début de fusion du béton.

Dans la phase de refroidissement, Alonso et al. (Alonso and Fernandez, 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.

1.9.2. Effet des hautes températures sur le béton

Ces dernières années, une attention accrue a été accordée aux propriétés mécaniques et résiduelles du béton exposé à de hautes températures. Le feu provoque des changements physiques et chimiques importants, résultant en la détérioration du béton. Le béton à haute performance (BHP), qui présente une résistance élevée, une grande ténacité ou une résistance accrue aux dommages physiques et chimiques, remplace de plus en plus le béton ordinaire

(BO), en particulier dans les applications exposées à des environnements sévères. Il a été révélé que les avantages des BHP résultent de l'amélioration de la microstructure interne du matériau par rapport aux BO (Xie & Zhou, 2019; Yan et al., 2020) La microstructure dense des BHP assure souvent une résistance élevée et une très faible perméabilité, ce qui est essentiel pour obtenir une bonne durabilité dans des conditions sévères où se trouvent des agents nocifs tels que le chlorure, les sulfates, etc. Cependant, dans certaines situations où les BHP sont soumis à des attaques de feu, la microstructure dense des BHP semble devenir un inconvénient. Les résultats de recherches récentes indiquent qu'il existe une grande différence entre les comportements des BHP et des BO lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées (Banthia & Gupta, 2015; Phan et al., 2016).

Le béton, lorsqu'il est exposé à des températures élevées, provoque de grands changements de volume dus à des dilatations thermiques, des rétrécissements thermiques.

Les propriétés sont améliorées avec l'augmentation des fibres synthétiques. Ceci est pratique car une partie considérable de la matrice est remplacée par un matériau plus faible. Les changements de volume entraînent des contraintes internes plus importantes et conduisent à des microfissures et à des fractures. Les températures élevées entraînent également une migration de l'eau, une déshydratation accrue, une incompatibilité thermique interrassiale et une décomposition chimique de la pâte de ciment durcie. En général, tous ces les changements conduisent à la diminution de la rigidité du béton et l'augmentation d'une déformation irréversible. Le béton renforcé de fibres (BRF) est un mélange de béton contenant de l'eau, du ciment, de sable ; des granulats grossiers et des fibres. Dans le béton renforcé par des fibres (BRF), une température élevée provoque la fusion des fibres synthétiques et augmente ainsi la porosité du béton. L'augmentation de la porosité entraîne l'échappement de la pression de vapeur et diminue ainsi le risque d'écaillage lorsqu'il est exposé à des températures élevées. De plus, l'nuance du renforcement des fibres sur les propriétés résiduelles du béton exposé à différentes températures est relativement peu comprise. L'étude des phénomènes d'écaillage pour le béton en incorporant des fibres de polypropylène, Lura et Terrasi (2012) ont constaté que l'écaillage était considérablement réduit en ajoutant au béton de petites quantités (près de 0,1 % en volume) de fibres fabriquées à partir d'un polymère à faible point de fusion. Noumowe et Sahmaran (2019) ont étudié les propriétés mécaniques et microstructurelles du BHP face à des températures élevées. Il a été constaté que la structure des pores à haute température peut avoir une influence considérable sur le comportement d'écaillage du béton de fibre de polypropylène à haute résistance.

Les fibres de polypropylène fondent lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées, et la création de canaux dans la masse de béton empêche la formation d'une pression de vapeur élevée dans les pores du béton, ce qui réduit l'écaillage du béton. En outre, le béton fibreux refroidit plus lentement et améliore la résistance à la traction (Mobasher & Li, 2007; Wang et al., 2014). Parmi les avantages de ce type de fibre sont l'amélioration de la résistance du béton aux contraintes, à la fatigue, à la chaleur, et augmente la résistance à la traction, au cisaillement et à la flexion du béton.

1.10. Propriétés mécaniques du béton exposé à de hautes températures

En raison des modifications micro-structurelles du béton soumis à des températures élevées, les propriétés mécaniques varient en fonction de la température, ce qui influence le comportement du béton dans les structures. Les propriétés mécaniques étudiées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction, la relation contrainte-déformation et le module d'élasticité. Eurocode 2 (CEN, 2004) fournit certaines relations mathématiques pour estimer les propriétés mécaniques comme la résistance à la compression, la résistance à la traction, etc. du béton ainsi que de l'acier à température élevée, ce qui peuvent être utiles pour comprendre et modéliser le comportement du béton à hautes températures. La résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage diminuent avec l'augmentation température, aussi bien dans le béton ordinaire (BO) et le béton à haute performance (BHP).

1.11. Influence de l'addition des fibres

1.11.1. Résistance à la compression résiduelle

L'inclusion de fibres de polypropylène (PP) dans le mélange de béton améliore légèrement les propriétés mécaniques résiduelles du béton. La résistance à la compression relative des bétons contenant des fibres de PP était plus élevée que celle des bétons sans fibres de PP, tandis que l'ajout de fibres de PP était plus efficace pour la résistance à la compression que pour la résistance à la traction par fendage du béton au-dessus de 200 °C (Behnood et al., 2008). (Eidan et al., 2019) sont également d'accord sur le fait que le béton renforcé de fibres de polypropylène présente une résistance mécanique résiduelle plus élevée par rapport au béton ordinaire. Leurs résultats ont montré que les fibres de PP neutralisent l'effet de la

dégradation physico-chimique du ciment lorsque le niveau de chauffage est supérieur à 400 °C. La résistance résiduelle à la compression du béton renforcé par des fibres de PP avec une longueur de 12 mm et un dosage volumique de 0,2 % de béton a conservé une résistance résiduelle à la compression plus élevée de 25 % de sa résistance initiale, tandis que le béton renforcé par des fibres de PP avec une longueur de 6 mm et le béton ordinaire ont conservé 21% et 12 % respectivement pendant la plage de température d'exposition de 400 à 600 °C. Ils ont également noté que la résistance résiduelle à la compression de tous les mélanges renforcés de fibres est inférieure à celle du béton ordinaire en dessous de 300 °C, attribuant ceci au fait que la matrice n'a pas été affectée par les fibres jusqu'à la température de 300 °C et que la pression des pores n'a pas atteint son niveau critique, alors que les fibres de PP ont déjà fondu et laissé des canaux microscopiques dans la matrice du béton renforcé de fibres, ce qui entraîne finalement une réduction de la résistance à la compression. La fibre d'acier et la fibre de polypropylène ont toutes deux été efficaces pour minimiser l'effet néfaste des hautes températures sur la résistance à la compression du béton (Dong et al., 2008). De même, l'ajout de fibres de PP à un dosage de 0,45-1,8 kg/m³ montre peu ou pas d'influence sur la résistance résiduelle à la compression du béton soumis à des températures élevées avec une résistance résiduelle à la compression conservée supérieure à 25% de la valeur à température ambiante (Kim et al., 2013). Cependant, (Poon et al., 2004) ont contredit cette affirmation et ont suggéré que de telles différences pourraient provenir de conditions d'essai ou d'environnements différents. Cela correspond également à l'observation de (Suhaendi et al., 2006). Bien qu'ils aient reconnu l'existence d'un mécanisme d'atténuation significatif avec l'ajout de PP en termes d'apparition d'écaillage, en particulier dans les CSH, en raison de la fusion des fibres de polypropylène à une température de 160-170 °C, ce qui fournit un mécanisme d'atténuation important, des passages pour que la vapeur d'eau s'échappe, réduisant ainsi la pression des pores sous exposition à la chaleur. Néanmoins, ils ont conclu que les propriétés résiduelles du CSH renforcé par des fibres de polypropylène diminuent en raison des pores supplémentaires générés intentionnellement dans le béton.

Les propriétés du béton exposé à une température élevée ont été considérablement améliorées par l'ajout de deux fibres distinctes (fibres hybrides) dans le béton (Dong et al., 2008). En particulier, l'addition de PP avec d'autres types de fibres comme les fibres d'acier et de carbone. Le mélange de fibres d'acier et de PP a donné de meilleurs résultats à des températures élevées parce que la fusion des fibres de PP pendant le processus d'augmentation rapide de la température crée des microcanaux qui facilitent la libération de la pression de

vapeur élevée due à l'humidité interne du béton (Chen et al., 2004). Les résistances résiduelles des bétons renforcés par des fibres hybrides ont diminuées de l'ordre de 36% de leur résistance initiale à une température élevée de 800°C. La compréhension de la bonne synergie de l'acier et de la fibre de polypropylène dans le mélange de béton est soutenue par les résultats de (Peng et al., 2008; Plye et al., 2011; Varona et al., 2018) ont observé que le NSC avec des fibres hybrides (PP et acier) a donné une meilleure résistance résiduelle jusqu'à 650 °C que le NSC avec seulement des fibres d'acier. Par contre, le NSC ordinaire présente une résistance résiduelle à la compression plus faible par rapport à Eurocode 2 et la courbe d'Aslani & Bastami pour les NSC calcaires sans fibre. Ils ont également observé que le béton de fibres hybrides (PP et acier) présente une résistance résiduelle à la compression plus élevée par rapport à la norme Eurocode 2, au béton de fibres PP avec une fraction volumique de 0,3% (Peng et al., 2008) et au béton de fibres d'acier avec une fraction volumique de 0,5% (Widhianto et al., 2014) Néanmoins, l'utilisation de granulats calcaires, qui se comportent mieux que les granulats siliceux à haute température, est attribuée comme une raison possible de cette amélioration (Varona et al., 2018).

1.11.2. Résistance à la traction résiduelle

Il est bien connu que l'ajout de fibres augmente la résistance à la traction du béton et que cette augmentation peut atteindre 50 % à température ambiante (Khaliq et kodur, 2014; Reedy et al. 2012). De même, les chercheurs ont observé une influence positive de l'ajout de fibres sur la résistance à la traction du béton à des températures plus élevées. Les résultats de Khaliq & Kodur (2014) ont montré que l'ajout de fibres d'acier et de fibres hybrides ralentit le plus la perte de résistance à la traction lorsque la température augmente de 20 à 800 °C parmi les différents types de béton à haute résistance considérés (c'est-à-dire le béton renforcé de fibres, le béton autoplaçant et le béton de cendres volantes). La température de fusion élevée de la fibre d'acier lui permet de conserver sa ductilité et de résister la rupture sous tension à haute température (Peng et al., 2006; Khaliq & Waheed, 2017) ont remarqué un effet positif des hautes températures sur la résistance à la traction par fendage du béton jusqu'à 300 °C, avec une augmentation de 8 % et 20 % de la résistance à température ambiante à 120 °C et 300 °C respectivement en raison du durcissement à sec, ceci est cependant suivi d'une forte diminution à des niveaux de température plus élevés. En général, les fibres d'acier sont très efficaces pour empêcher la fissuration, et donc, améliorer la résistance à la traction résiduelle. Cependant, cette influence était insignifiante au-dessus de 700 °C (Khaliq et waheed, 2017). En outre, Moghadam et al. (2020) ont observé que la résistance à la traction du béton

ordinaire (30 MPa) à température ambiante a été améliorée de 28,14% et 19,22% avec l'ajout d'une fraction volumique de 0,25% de fibres d'acier et de verre respectivement à température ambiante. Lors d'une exposition à des températures élevées, entre 28 et 800 °C, les fibres d'acier améliorent la résistance à la traction de 8 à 198 %, et les fibres de verre de 19 à 213 %. Bien que la perte de résistance à la traction se produise lorsque la température augmente en raison de l'expansion incompatible des couches de granulats et de ciment, et de la formation de contraintes supplémentaires à l'intérieur du béton. Cependant, le taux de réduction de la résistance à la traction a été significativement réduit dans le béton d'acier et de fibre de verre à des températures élevées. Ceci est en accord avec les résultats de Gao et al. (2012) que la conductivité thermique plus élevée de la fibre d'acier comparée à celle de la matrice de ciment et des agrégats permet à la chaleur causée par le gradient thermique de se transmettre plus uniformément dans le béton renforcé de fibres d'acier, menant ainsi à moins de fissures et à une meilleure résistance à la traction du béton. La teneur en fibres d'acier de 1,0% a été indiquée comme la quantité optimale dans le béton en termes de résistance relative à la fissuration (Gao et al., 2012).

De même, une étude sur l'influence de la fibre de polypropylène sur le béton indique que son ajout améliore la résistance résiduelle à la traction par fendage du béton. Eidan et al. (2019) ont observé que le béton renforcé par des fibres de polypropylène avec une longueur de fibre de 12 mm à un dosage de 0,2% de fraction volumique a produit une résistance résiduelle à la traction par fendage plus élevée d'environ 27% de sa résistance initiale après exposition à des cycles de chauffage et de refroidissement. 400 °C a été détecté comme le niveau de température critique pour la résistance mécanique résiduelle (compression, traction et module d'élasticité) pour le béton renforcé de fibres de PP, au-dessus duquel ses facteurs résiduels sont plus élevés que ceux du béton ordinaire. Une longueur de fibres de 12 mm a donné de meilleures performances que 6 mm à haute température (Eidan et al., 2019). Au contraire, (Arioz, 2007) a observé une amélioration de la résistance à la traction du béton à la température ambiante en raison de la présence de fibres de polypropylène introduit une pression de fermeture supplémentaire pendant la croissance de la fissure qui nécessite des contraintes plus importantes dans la matrice avant que la propagation de la fissure critique se produise. Néanmoins, aucune différence significative n'a été observée dans les résistances relatives à la traction par fendage des bétons avec et sans fibre PP à des températures élevées. En général, bien que certaines normes telles que l'Eurocode 2 considèrent la résistance à la traction résiduelle au-dessus de 600°C comme négligeable, l'ajout de différents types de fibres

a montré une résistance à la traction conservée significative à et au-dessus de ce niveau de température. Les résultats de Varona et al., (2018) montrent une résistance à la traction résiduelle d'environ 15% à une température supérieure à 800°C avec des bétons renforcés de fibres hybrides.

1.11.3. Module d'élasticité résiduel

Le béton se protège du feu ou de la chaleur élevée en agissant comme un bouclier de feu parmi ses composants entre ses espaces adjacents (Kodur, 2014). En cas d'exposition à des températures plus élevées pendant une période plus longue, le béton subit des changements chimiques et physiques drastiques qui conduisent à l'affaiblissement du béton. (Heikal, 2000; Xu et al., 2001). Le type de granulats et ses propriétés ont un rôle important sur les caractéristiques résiduelles du béton exposé à une température élevée (Arioz, 2007). Le site dégradations du béton avec différents granulats ne sont pas similaires lorsqu'ils sont exposés à une chaleur élevée (Sakr et El-Hakim, 2005). Les fibres ont été largement utilisées pour améliorer la ductilité du béton. Il est rapporté dans la littérature que certains fibres aident à propriétés du béton après une exposition à une température élevée.

On a constaté que l'ajout de fibre améliore le comportement du béton à une température élevée et le fibre a été trouvé pour améliorer la déformation maximale du béton (Poon et al., 2004). Le tableau 1.2 donne un bref résumé des travaux de recherche effectués sur le module du béton renforcé de fibre (FRC). Bien que peu de chercheurs aient fait des rapports sur le module d'élasticité de différents FRC (à l'exception du béton avec fibre métallique), les fibres de polypropylène (PPF) et les fibres d'alcool polyvinylique (PVAF), les informations disponibles dans la littérature sont limitées sur le comportement de contrainte-déformation de différents FRC exposés au feu. Il est pertinent d'examiner les propriétés résiduelles des FRC après l'exposition à une température élevée à divers taux de chauffage et de refroidissement (Lee et al., 2007). La vitesse de chauffage est un paramètre important qui affecte la résistance et le module d'élasticité du béton.

Des chercheurs ont déjà étudié l'effet de la fibre de polypropylène sur le module d'élasticité du béton. Pylia et al. (2010) ont rapporté presque le même module d'élasticité résiduel pour le béton avec et sans fibre PP après une température élevée de 600°C. De même, Rudnik et Drzymała (2014) ont étudié le comportement du béton renforcé par des fibres PP à des températures élevées. Ils ont découvert qu'avec l'ajout de 1.8 et 1.3 kg/m³ de fibres monofilament de 12 mm et de fibres de polypropylène fibrillées de 19 mm respectivement,

l'influence sur le module d'élasticité n'était pas significativement prononcée pour toute la gamme de température élevée observée de 100 à 600 °C. De plus, le travail expérimental d'Eiden et al (2019) a révélé que l'ajout de fibres de polypropylène ne contribue pas de manière significative à l'amélioration du module d'élasticité du béton, et que ses effets disparaissent complètement après l'exposition du béton à une température élevée de 600 °C. (Plya et al., 2010).

Tableau 1. 2 : Analyse de la littérature.

Reference	Durée de chauffage	Vitesse de chauffage	Températures (°C)	Type de fibre	Module d'élasticité résiduel	Occurrence d'explosion
Suhaendi et Horugichi (2005)	20 min+120mn 40mn+120 mn	10°C/mn	200, 400	PPF	95% à 23°C 81% à 200°C 40% à 400°C	Nul à 200°C T <400°C :Pas d'éclatement explosif
Noumowe (2005)	400mn+180mn 20mn+120mn	0,5°C/mn	20, 200	PPF	117% à 20°C 79% à 200°C	T < 200°C :nul
Suhaendi et Horiguchi (2006)	40mn +120mn 40mn + 120mn 80 mn +120min 120 mn+120mn	10°C/mn	20, 200 et 400	PPF	95% à 20°C 85% à 200°C 42% à 400°C	-
Khaliq et Kodur (2011)	40 mn+120 min 80 mn+120 min 120 mn+120 mn 160 mn+120 mn	5°C/mn	200 et 400 600 et 800	PPF	55% à 200°C 45% à 400°C 30% à 600°C 17% à 800°C	T < 400°C : légèrement réduite
Bian et al. (2016)	40 mn+240 mn	1°C/mn	20 et 600	PPF+ PVAf	80%, 87% à 20°C 33%, 44% à 600°C	-
Ding et al. (2016)	75mn + 120mn	80°C/mn	600	PPF		
Peng et al. (2006)	40 mn + 60 mn 60 mn + 60 mn 80 mn + 60mn	10°C/ mn	20, 400, 600 et 800	PPF		T<600°C pas d'éclatement explosif T<400°C nul 400°C<T<800°C éclatement

1.11.4. 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 (Kalifa *et al.*, 2001).

La figure 1.4 montre les résultats expérimentaux de perte de masse en fonction de la température obtenus par (Hager, 2004). Généralement, ce processus se déroule en trois étapes liées à la perte d'eau dans le béton (Xing, 2011; Pliya, 2010; Kanema, 2007; Xiao *et al.*, 2006; Hager, 2004; Phan *et al.*, 2001; Noumowé, 1995) :

- De la température ambiante jusqu'à 100 – 150 °C, 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 et à la décomposition du gypse. Jusqu'à 300 °C, le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale (Kanema, 2007).
- Au-delà de la température 300 °C, il y a une faible perte de masse correspondant à la déshydroxylation de la portlandite (450-550 °C), à la décomposition des silanols (SiOH), du silice (400-570 °C) (Xing, 2011), et à la décarbonatation du calcaire CaCO_3 (600-800 °C) (Xing 2011, Xiao *et al.*, 2006, Houry, 1992).

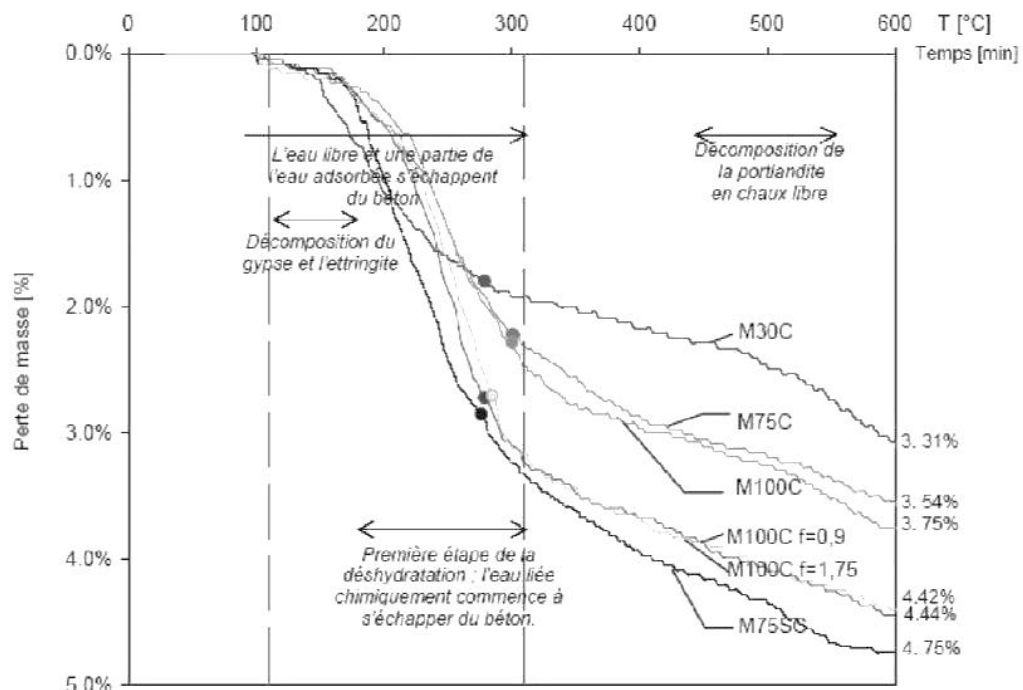


Figure 1. 4 : Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons (Hager, 2004).

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, 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 (Xing, 2011; Kanema, 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.

L'effet de la vitesse de chauffage a été étudié par (Kanema, 2007). 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 1.5). L'influence de la perte de masse suivant la nature des granulats est liée au coefficient d'absorption des granulats (Xing, 2011). L'auteur constate que, étant 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.

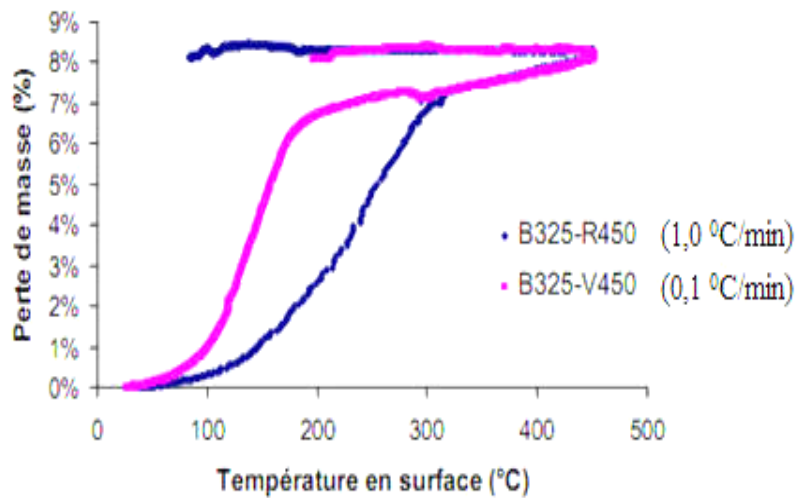


Figure 1. 5 : Evolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage (Kanema 2007).

1.11.5. Conclusion

Au vue de cette bibliographie, on a constaté que :

1. L'utilisation des fibres d'acier améliorent les propriétés mécaniques des bétons plus que les fibres de polypropylènes.
2. L'utilisation des produits chimiques pour augmenter la rugosité des FPR montre leur limite dans le traitement de surface et sont néfaste à l'environnement.
3. Les températures dépassant 600 °C n'ont pas exploitées dans l'étude du béton exposé à des hautes températures.
4. La vitesse de chauffage est un paramètre crucial dans l'éclatement du béton

Chapitre 2 :

Protocole expérimental

Chapitre 2 : Protocole expérimental

2.1. Introduction

En se basant sur les résultats présentés dans l'étude bibliographique, nous avons décidé de choisir deux formulations de béton (béton ordinaire et béton à haute performance) en faisant varier la quantité de fibres de polypropylène. Ces formulations sont testées en additionnant les fibres de polypropylène recyclées et les fibres de polypropylène commercialisées (STRUX) afin de comparer leurs propriétés mécaniques et physiques (résistance à la compression, traction par fendage, flexion, module d'élasticité, retrait séchage et porosité à l'eau). Cette première phase nous a permis de sélectionner les fibres de polypropylène recyclées sur laquelle sera menée une deuxième phase sur l'adhérence de ses fibres sur la matrice cimentaire en utilisant trois produits chimiques (permanganate et dichromate de potassium).

La troisième phase consistait à exposer les deux bétons fibrés (BO et BHP) à des températures élevées 300 et 600 °C afin de connaître les propriétés mécaniques et physiques de ces deux bétons après chauffage (résistance à la compression, traction par fendage, retrait séchage et perte de masse).

Nous commencerons par présenter les caractéristiques des matériaux utilisés et les compositions des bétons testés afin de décrire le dispositif expérimental mis en place dans le cadre de cette étude.

Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de recherche sur les matériaux cimentaires alternatifs de l'Université de Sherbrooke.

2.2. Etapes du travail expérimental

Pour mener à bien cette thèse, le programme de recherche a été articulé en trois phases distinctes. La première phase a porté sur la comparaison de deux catégories de fibres, à savoir les fibres recyclées de polypropylène et les fibres commercialisées, en prenant en considération les critères de performance des propriétés mécaniques de deux types de béton, à savoir le béton ordinaire et le béton à haute performance. La deuxième phase a été dédiée à l'augmentation de la rugosité en vue d'améliorer les propriétés mécaniques des deux types de

béton. Les fibres recyclées de polypropylène ont été exposées à trois produits chimiques, à savoir le permanganate de potassium et le dichromate de potassium. La troisième phase a été consacrée à l'exposition des deux types de béton, ordinaire et à haute performance, à des températures élevées de 300 °C et 600 °C, dans le but d'étudier leurs propriétés mécaniques.

2.3. Matériaux

Des matériaux de la région du Québec conformes aux normes canadiennes ont été utilisés dans la confection des bétons. Ces matériaux sont : sable, gros granulats, ciment et superplastifiant.

2.3.1. Gros granulats

Les gros granulats (GG) utilisés proviennent du concasseur Aimé Coté sont de taille variant de 5 à 20 mm pour les bétons ordinaires (BO) et à haute performance (BHP) et leur densité est de 2,70. Les analyses granulométriques des granulats sont présentées dans la Figure 2.1.

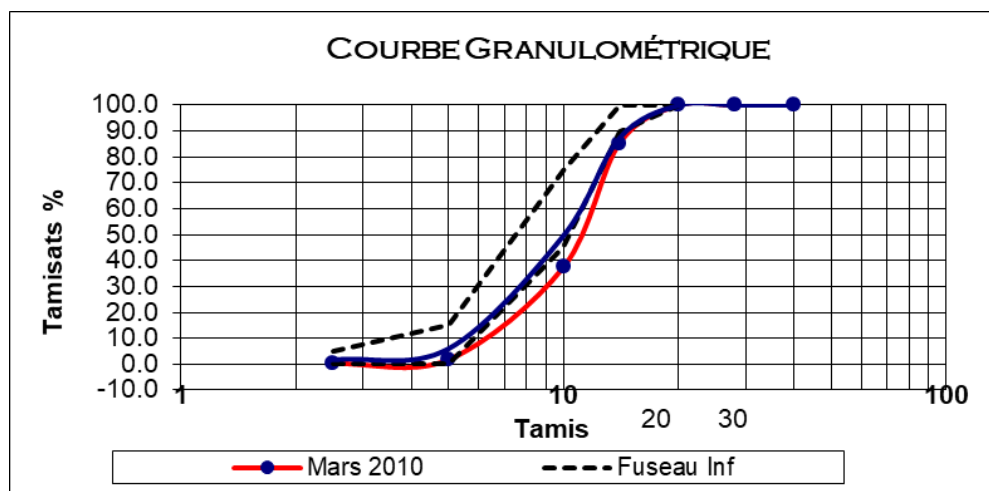


Figure 2. 1 : Courbe granulométrique des gros granulats

2.3.2. Sable

Les sables utilisés provenant de la sablière d'Aimé Coté et leurs propriétés sont illustrés dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 1 : Granulométrie du sable.

Type de sable	Sable 1	Sable 2	Sable 3
Diamètre des tamis (mm)	Passant en %		
10	100	100	100
5	99	98	98
2,5	90	85	92
1,25	74	67	79
0,63	51	47	56
0,315	30	26	21
0,160	11	7	5
0,080	2	1	1
Plat	0	0	0
Densité	2,66	2,65	2,64
Coefficient d'absorption	1,12	1,27	1,43

2.3.3. Ciment

Tous les bétons de cette étude ont été confectionnés avec le ciment à usage général (GU) CEM I 52.5 N provenant de la compagnie "St Laurent". Ce ciment est considéré comme modérément réactif. Il est à noter que celui-ci a un pourcentage de 14 % de matériaux passant de 45 μm . Les propriétés physiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 2.2

Tableau 2. 2 : Caractéristiques physiques et chimiques du ciment.

Caractéristiques chimiques	SiO ₂	(%)	21.0
	Al ₂ O ₃		4.2
	Fe ₂ O ₃		3.1
	CaO		62
Caractéristiques physiques	50% Diamètre passant (D50), μm		19
	surface spécifique de Blaine, m ² /kg		420
	Pourcentage passant 45 μm		17
	Densité spécifique		3.15
	PAF (%)		2.5
Caractéristiques mécaniques	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)		58

2.3.4. Adjuvant

Un superplastifiant de polycarboxylates sous le nom commercial "Glenium 30-30" a été utilisé dans cette étude. Cet adjuvant est un produit de la compagnie "BASF" et qui a une densité de 1,08. Le dosage recommandé par le fabricant est de 195-1170 ml/100 kg.

2.3.5. Fibres

Deux types de fibres de polypropylène ont été employés dans la confection des bétons ordinaire et à haute performance, les fibres de polypropylène recyclées les fibres de polypropylène commercialisé (STRUX). Toutes les fibres utilisées ont des élongations inférieures à 100.

Les FPR ont été utilisés dans le béton sans aucun prétraitement particulier. Les sacs ont été collectés dans des décharges, défaits manuellement, nettoyés et coupés à une longueur égale de 40 mm. La figure 2.2 montre les sacs tissés usés et les FPP récupérées. Les FPR ont une résistance à la traction de 400 MPa, un module d'élasticité de 4,3 GPa et une densité de 0,74 g/cm³, ce qui est conforme à la norme ACI 544 (2002). Les fibres FPR sont lisses et plates. Les propriétés physiques des fibres de polypropylène sont résumées dans le tableau 2.3.



Figure 2. 2 : Sacs tissés et fibres de polypropylène recyclées (FPR) utilisées.

Tableau 2. 3 : Propriétés physiques de différentes fibres utilisées.

	fibres de polypropylène PPF (Strux 40/90)	fibres de polypropylène recyclées (PRF)
Densité spécifique	0.92	0.74
Module d'élasticité (GPa)	9.5	4.3
Résistance à la traction (MPa)	620	400
Point de fusion (°C)	165	165
Longueur (mm)	40	40
Elancement	90	66

2.4. Procédures d'essai du traitement chimique des FPR

Une étude sur les caractéristiques de liaison des fibres traitées chimiquement avec le béton à l'aide de dichromate de potassium (DP), permanganate de potassium (PP) est présentée. Les fibres ont été séparées manuellement et introduites dans les solutions respectives, où elles ont été laissées pendant les temps et températures indiqués ci-dessous. Après le traitement, les fibres ont été lavées dix fois dans 2,5 l d'eau du robinet, puis séchées à 45 °C pendant 24 h. La première solution a été préparée en mélangeant du dichromate de potassium, de l'acide sulfurique et de l'eau distillée dans un rapport massique de 37,5:750:60. Les fibres ont été immergées dans 470 ml de cette solution à 70 °C pendant 1min. La solution de PP a été préparée en mélangeant du PP, de l'acide nitrique et de l'eau distillée dans un rapport massique de 15,8:1,58:625 (en fait, on mélange 500 ml de solution aqueuse de PP 0,2 M avec 125 ml de solution aqueuse d'acide nitrique 0,2 M). Les fibres ont été immergées dans 625 ml de solution et maintenues à température ambiante pendant 24 heures. Plusieurs cubes de 100x100x100 mm ont été échantillonnés pour déterminer la résistance à la compression et la résistance à la traction par développements en flexion après 28 jours de cure humide selon les spécifications ASTM C39.

2.5. Présentation des fibres

Trois fibres ont été testées :

- La fibre brute non traitée (à gauche);

- La fibre traité avec du dichromate de potassium (au centre);
- La fibre traitée avec du permanganate de potassium (à droite).

D'un point de vue visuelle il est possible de noter que la fibre non traité est blanche légèrement transparente (Figure 2.3). Le traitement au dichromate de potassium va entrainer une opacité de la fibre et un dépôt blanchâtre. Le permanganate de potassium va entrainer un dépôt brun.



Figure 2. 3 : Observation visuelle des fibres.

2.6. Méthode de l'épaisseur du mortier couvrant pour formulation des bétons

Cette méthodologie est basée sur l'épaisseur de la couche du mortier qui a été proposée pour faire une corrélation entre la teneur en GG à diminuer et le volume des fibres à inclure. Cette méthode, lorsqu'elle est utilisée dans la formulation des bétons, a montré une approche efficace pour améliorer la maniabilité des mélanges.

Comme il a été mentionné précédemment, il est supposé qu'avec l'inclusion des fibres dans le mélange, le volume des GG devrait être réduit dans le mélange. Le concept multi-aspect de Voigt et al. (2004) a été exploité dans cette étude. Ce concept a été proposé relier l'épaisseur de la couche du mortier couvrant les fibres et les GG (t_{cm}) avec la largeur maximale des fissures due au retrait. Dans cette étude, ce concept a été utilisé pour relier l'épaisseur du mortier (t_{cm}) avec le facteur de fibres (FF) ($V_f L_f / d_f$) ou V_f est le volume des fibres en pourcentage et L_f / d_f est l'élançement de la fibre. Cette méthode est basée au fait sur la surface des GG qui devraient être réduit pour maintenir la (t_{cm}) équivalent comme dans le mélange référence (sans fibres). La surface totale des fibres est donnée.

Selon Voigt et al. (2004), le béton renforcé de fibres est composé de deux phases :

La première phase comprend les GG et les fibres et la deuxième phase est la matrice du mortier contenant le sable et la pâte de ciment (ciment, eau, air, et les adjuvants).

En prenant l'hypothèse d'une compaction maximale, le mélange des fibres et des gros graviers contient un certain volume de vides d'air qui est exclusivement dépendant du volume des fibres, de la distribution de la taille des fibres, de la forme des fibres et des gros graviers ensemble. Si un certain volume de la matrice est rajouté à ce mélange, la matrice doit remplir ce volume des vies d'air.

Le volume de la matrice dépasse celui des vides est utilisés indifféremment pour couvrir la surface des fibres et des gros graviers. L'équation exacte pour calculer l'épaisseur de la couche mortier couvrant t_{cm} proposé par l'auteur et donné par :

$$t_{cm} = \frac{V_c - V_g - V_f - V_v}{A_g + A_f} \quad (2.1)$$

Où :

t_{cm} : Epaisseur moyenne de la couche de mortier (couvre les fibres et les graviers),

V_c : volume total du béton ;

V_g : volume du gravier ;

V_f : volume des fibres ;

V_v : volume des vides:

A_g : superficie totale des GG

A_f : superficie totale des fibres

Le volume du béton, GG et des fibres calculs à partir des proportions de ces constituants. La superficie totale des fibres a été calculée selon l'équation (2.2)

$$A_f = \frac{\% \text{ des fibres} \times \text{densité} \times \text{surface spécifique d'une fibre}}{\text{Volume d'une fibre singulière}} \quad (2.2)$$

Si les fibres sont supposées métalliques l'équation (2.2) devient :

$$A_f = \frac{\% \text{ des fibres} \times 7.8 \times 2\pi r \times L_f}{L_f \times \pi \times d_f^2 / 4 \times 7.8} \quad (2.3)$$

Ainsi :

$$A_f = \frac{4V_f}{d_f} \quad (2.4)$$

Le volume des vides du mélange dû à la présence des GG et des fibres est déterminé selon la norme ASTM C29 (2004) comme proposé par Voigt et al. (2004).

2.7. Formulation et proportions des mélanges

2.7.1. Formulation des bétons ordinaires et à haute performance

Le béton ordinaire (BO) et le béton à haute performance (BHP) ont été étudiés dans cette recherche. Les mélanges BO ont été dosés avec une teneur en ciment de 320 kg/m³ et un rapport eau/ciment (E/C) de 0,55. Ces mélanges ont été proportionnés pour obtenir une résistance à la compression à 28 jours de 30 MPa. D'autre part, les mélanges BHP ont une teneur en ciment plus élevée de 400 kg/m³ et ont été réalisés avec un rapport eau/ciment plus faible de 0,40 pour atteindre une résistance à la compression ciblée de 50 MPa. Leur masse volumique est de 2350 kg/m³ pour le béton ordinaire et de 2410 kg/m³ pour le béton à haute performance. Des teneurs en fibres, comprises entre 0 et 0,3 % par volume, ont été utilisés pour évaluer certaines propriétés des BO et BHP. Les fibres ont été utilisées en remplacement des agrégats grossiers selon le concept de l'épaisseur du mortier. Ce concept consiste à maintenir constante la couche d'épaisseur du mortier (tcm) recouvrant les particules solides (fibres et agrégats grossiers) dans la matrice (Voigt et al., 2004).

De plus, il était bien connu que la formulation du béton de fibres est réalisée en substituant un matériau inerte tel que le sable ou les agrégats grossiers par des fibres. Ceci est réalisé en volume en raison de la différence de densité des matériaux. Dans cette étude, les agrégats grossiers ont été remplacés par des fibres de polypropylène à des taux de 0,1, 0,2 et 0,3% du volume de béton, qui sont des taux très utilisés dans la pratique. Le dosage du HRWR a été ajusté pour obtenir une valeur d'affaissement de 120 ± 20 mm.

Les bétons ordinaires ainsi que le béton à haute performance ont été additionnés de trois volumes de fibres de polypropylène recyclés (0,1 à 0,3%) et de 0,2%, 0,4% et 0,6% pour les mêmes bétons exposés à de hautes températures (300 °C et 600 °C) afin de palier à l'éclatement du béton.

Les mélanges de béton ont été préparés dans un malaxeur à cuvette ouverte d'une capacité de 100 litres. La séquence de mélange consistait à homogénéiser le gravier et le sable pendant

1 minute avant d'introduire la quantité de ciment et d'ajouter une autre minute de mélange. Les fibres ont ensuite été répandues dans le mélange, et les matériaux ont été mélangés à nouveau pendant 1 minute supplémentaire. Les 2/3 de l'eau de gâchage ont été ajoutés et le mélange s'est poursuivi pendant 2 minutes. Enfin, le HRWR et le reste de l'eau de mélange ont été ajoutés et le mélange a été mélangé pendant 2 minutes. La température ambiante pendant le mélange et les essais a été maintenue à $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Le dosage du HRWR a été ajusté pour obtenir une valeur de consistance d'affaissement de 120 ± 20 mm. Après l'ajustement de l'affaissement, le poids unitaire, la température et la teneur en air frais ont été déterminés. Des cylindres de béton en plastique de 100×200 mm ont été utilisés pour les tests de résistance à la compression, à la utilisés pour déterminer la résistance à la flexion et les développements du retrait séchage. Tous les échantillons ont été stockés en cure humide conformément aux spécifications de la norme ASTM C39 (2018) jusqu'à l'âge d'essai. Chaque valeur obtenue représente la moyenne de trois essais dont les coefficients de variation étaient inférieurs à 5% pour les différents résultats d'essai. Les échantillons destinés à la mesure du retrait ont été conservés dans des conditions de laboratoire où le retrait représente la mesure moyenne de deux échantillons d'essai.

Le tableau 2.4 regroupe la composition des deux bétons (BO et BHP).

Il est important de corriger l'humidité du sable et des gros graviers. Pour la confection des deux bétons, on a réduit le pourcentage des gros graviers avec n'importe quel type de fibres à l'aide des équations 2.1; 2.2; 2.3 et 2.4.

Tableau 2. 4 : Composition des bétons (BO et BHP) en kg/m^3

Reference	Ciment	Eau	Fibre	Sable	Graviers
BO	320	176	0	818	1070
BO-PPF-0.1%	320	176	0.9	830	1053
BO-PPF-0.2%	320	176	1.8	844	1036
BO-PPF-0.3%	320	176	2.7	858	1019
BO-FPR-0.1%	320	176	0.9	839	1044
BO- FPR -0.2%	320	176	1.8	853	1028
BO- FPR -0.3%	320	176	2.7	867	1010
BO- FPR 0,4%	320	176	3,6	881	991
BO- FPR 0,6%	320	176	5,4	909	971
BHP	400	160	0	770	1078
BHP- FPR 0,1%	400	160	0.9	794	1051
BHP- FPR 0,2%	400	160	1.8	808	1035

BHP- FPR 0,3%	400	160	2,7	822	1017
BHP- FPR 0,4%	400	160	3,6	836	1003
BHP- FPR 0,6%	400	160	5,4	864	998

2.7.2. Séquence de malaxage

Les bétons ont été mélangés moyennant un malaxeur de laboratoire de capacité maximale de 80 litres, à cuve horizontale tournante à une vitesse constante. Le volume des mélanges a été fixé à 50 litres pour faciliter le malaxage et pouvoir homogénéiser le mélange.

La séquence d'introduction des constituants a été faite comme suit pour le béton ordinaire. :

1. Homogénéisation du sable dans le malaxeur pendant 30 secondes ;
2. Correction des quantités de l'eau, du sable et des gros graviers ;
3. Incorporation graviers dans le malaxeur + la moitié de l'eau + fibres pendant 1 minute ;
4. Ajout du liant et malaxage pendant 30 secondes ;
5. Rajout du reste de la quantité d'eau et malaxage pendant 2 minutes ;
6. Pause de 2 minutes ;
7. Re-malaxage pendant 2 minutes.

Séquence de malaxage des BHP :

1. Homogénéisation du sable dans le malaxeur pendant 30 secondes ;
2. Correction de la quantité du sable et de l'eau en calculant l'humidité du sable. Dans la plupart du temps, il n'est pas nécessaire de calculer l'humidité des gros graviers ;
3. Incorporation des graviers et des fibres dans le malaxeur+ la moitié de l'eau et malaxer pendant 1 minute ;
4. Ajout du liant et malaxage pendant 30 secondes ;
5. Rajout de la 1/2 quantité d'eau qui reste et 3/4 de la quantité du superplastifiant et malaxage pendant 1 minute,
6. Pause de 2 minutes ;
7. Correction par le reste du superplastifiant,
8. Re-malaxage pendant 2 minutes.

L'introduction des fibres s'est fait simultanément avec les gros graviers. Le poids propre des granulats plus le mouillage par une proportion d'eau de gâchage avant d'ajouter le liant permet de bien distribuer les fibres dans le mélange, notamment les fibres ayant une masse volumique faible à savoir les fibres synthétiques. Dans le cas des fibres en polypropylène, un temps additionnel de malaxage nécessaire pour qu'elles soient uniformément distribuées. Ce

temps additionnel n'affecte pas les propriétés du mélange à l'état frais, car cela se fait avant l'introduction du ciment.

Cette séquence a l'avantage d'éviter la formation de certaines agglomérations intrinsèquement sèches avec quelques types de fibres qui ont la difficulté d'être incorporées et distribuées dans le béton frais. Certains opérateurs incorporent les fibres à la fin du malaxage et après les adjuvants. L'inconvénient de cette séquence de malaxage réside dans la demande d'un temps additionnel de malaxage (après le contact eau-liant) pour homogénéiser totalement la matrice du béton. Ce temps additionnel est un paramètre principal qui affecte les propriétés de mélange à l'état frais et à l'état durci. En plus, ce temps additionnel n'a généralement pas la même durée pour tous les types de fibres car chaque type de fibres a sa propre faculté d'être dispersé dans la matrice du mélange frais. Cette faculté de dispersion dépend principalement des caractéristiques géométriques des fibres.

2.7.3. Essais de caractérisation des bétons à l'état frais

Les essais de caractérisation font suite au malaxage des mélanges ; soit entre dix et vingt minutes après le contact eau -ciment. Avec quelques mélanges, des essais de caractérisation ont été poursuivis entre quarante et cinquante minutes du contact eau- ciment pour éviter la perte d'ouvrabilité de ces mélanges avec le temps. Ces essais avec leurs normes mentionnées sur le tableau 2.5.

Tableau 2. 5 : Essais des bétons à l'état frais

Propriété	Essai	Norme
Physique	Masse volumique	ASTM C 138 (2004)
	Teneur en air	ASTM C 231 (2004)
Maniabilité	Affaissement	ACNORA.23.2

2.7.4. Echantillonnage

Avec chaque mélange adopté, il y avait un prélèvement d'échantillons. L'échantillonnage se fait à la suite des essais de caractérisation de chaque mélange. Vingt minutes au maximum après le contact eau -ciment.

Les faces intérieures des moules doivent être induites avec de l'huile minérale pour éviter tout risque d'adhérence qui pourrait se produire entre les moules et le béton.

Cylindres

Des moules cylindriques en PVC mesurant 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur ont été utilisés pour la confection des échantillons des mélanges préparés pour les essais de compression et de module d'élasticité.

Prismes

Des moules prismatiques en métal de 75x75x400 mm ont été utilisés pour la confection des échantillons destinés aux mesures de déformations dues au retrait séchage (Figure 2.4). Ces moules remplis en deux couches avec une consolidation légère de six coups après chaque couche externe et de six coups à la fin par un bourroir utilisé à un diamètre de 5 mm. Les mesures de retrait ont été faites chaque semaine en utilisant une jauge.



Figure 2. 4 : Conservation des prismes utilisés pour l'essai de retrait de séchage.

Des échantillons prismatiques de 100x100x400 mm ont été coulés dans des moules en acier pour mesurer la résistance à la flexion selon la norme ASTM C 1399 (2004). Le béton est mis en place en deux couches successives de même épaisseur, chacune d'elles a été pilonnée par 10 coups de bourroir de 5 mm de diamètre. A la fin, une consolidation externe légère de 6 coups est appliquée.

2.7.5. Murissement

Le mûrissement des échantillons a été conforme à la norme ASTM C 192 (2004).

Cylindres

Tous les bétons coulés dans les cylindres ont été mûris dans leurs moules pendant vingt-quatre heures dans les conditions normales du laboratoire de température et d'humidité relative (HR) et couverts par des films en plastique pour empêcher l'évaporation de l'eau pendant le processus de l'hydratation à très jeune âge. Juste après le démoulage, les échantillons cylindriques ont été conservés dans une salle à une humidité relative de 100 % jusqu'à la date des essais mécaniques de compression et de module d'élasticité.

Prismes

Dans les premières 24 heures qui suivent le coulage, tous les prismes confectionnés pour laisser de retrait séchage ont été mûris dans les conditions normales du laboratoire de température et humidité relative couverts par des fibres en plastique. Juste après le démoulage, les prismes ont été conservés dans une chambre à une température de 23 °C humidité relative de 50 % jusqu'à la fin des mesures de variations volumétriques dues au retrait de séchage pendant 390 jours (la durée nécessaire au bout de laquelle la stabilisation de déformation du au retrait est constatée). L'essai de retrait par séchage du béton est une évaluation qui vise à mesurer la variation dimensionnelle d'une éprouvette de béton due à la perte d'eau par évaporation. L'objectif est de comprendre le comportement du béton lorsqu'il est exposé à des conditions de séchage, ce qui est essentiel pour évaluer sa durabilité et prévoir d'éventuels problèmes de fissuration.

Le procédé d'essai du retrait par séchage implique généralement les étapes suivantes :

1. Moulage des éprouvettes : Des éprouvettes de béton de dimensions spécifiées (dans votre cas, 75x75x100 mm) sont moulées conformément aux normes ou aux procédures établies.
2. Cure du béton : Les éprouvettes sont ensuite soigneusement traitées pour assurer une hydratation appropriée du béton pendant une période spécifiée.
3. Séchage initial : Après la période de cure, les éprouvettes sont exposées à des conditions de séchage contrôlées. Cela peut se faire dans une enceinte spécialement conçue ou dans des conditions de laboratoire contrôlées.
4. Mesure du retrait : Les variations dimensionnelles des éprouvettes sont mesurées à des intervalles réguliers pendant la période de séchage. Ces mesures peuvent être effectuées en utilisant divers instruments tels que des comparateurs, des extensomètres ou des capteurs de déplacement.
5. Analyse des résultats : Les données recueillies sont analysées pour évaluer le taux de retrait et la magnitude du retrait global du béton. Cela permet de déterminer la susceptibilité du

béton au retrait séchage et d'apporter des ajustements éventuels aux formulations de béton ou aux méthodes de mise en œuvre pour minimiser ce phénomène.

Les échantillons prismatiques destinés à la mesure de la résistance à la traction par flexion ont été conservés dans une salle à une température de 20 °C et une humidité relative de 100 % jusqu'à la date de l'essai.

2.8. Essais sur béton durci

2.8.1. Résistances mécaniques

La résistance en compression s'effectue selon la norme ASTM C 39 (2004). La valeur des résultats d'une moyenne de trois cylindres de chaque béton est prise (Figure 2.5).



Figure 2. 5 : Appareil de compression

La méthode d'essai pour l'évaluation de la résistance à la flexion selon la norme ASTM C 139 (2004). La valeur des résultats d'une moyenne de trois cylindres de chaque béton est prise.

Les mesures du module d'élasticité s'effectuent selon la norme ASTM C469 (2004). La valeur des résultats d'une moyenne de deux cylindres de chaque béton est prise.

2.8.2. Porosité à l'eau

La méthode de mesure la plus utilisée est celle de la « porosité accessible à l'eau » qui consiste à saturer le matériau sous vide. Le volume apparent est déterminé au moyen d'une pesée hydrostatique et le volume des vides est obtenu par différence entre la masse de l'échantillon saturé et celle mesurée après séchage.

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prélevées par forage ou sciage dans un ouvrage, un produit ou une éprouvette moulée. Le volume des éprouvettes soumises à l'essai d'absorption d'eau par immersion est d'au moins 800 cm³ et au plus de 1200 cm³.

De plus, le rapport V/S entre son volume, exprimé en cm³, et sa surface enveloppe, exprimée en cm², est compris entre 1,2 et 2. A noter que l'essai est généralement réalisé sur des carottes de 100 cm² de section (113 mm de diamètre) et de 10 cm de hauteur, toutes les faces étant obtenues par forage ou découpage (Figure 2.6).

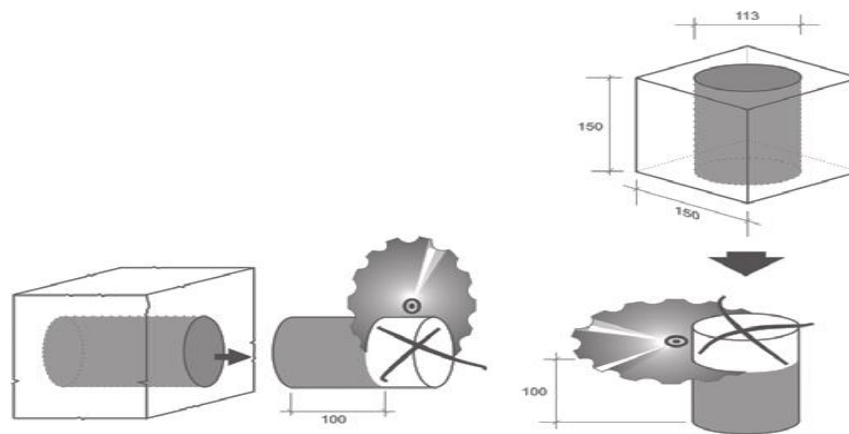


Figure 2. 6 : Découpage des éprouvettes.

2.8.3. Traitement des éprouvettes avant les mesures

Eprouvettes moulées

Après démoulage, elles sont conservées en salle humide à 20 ± 2 °C, à plus de 90 % d'humidité relative et ce jusqu'à l'âge de 14 jours. A ce moment s'opère le façonnage (forage, découpage) de l'éprouvette qui sera soumise à l'essai. Les éprouvettes ainsi préparées sont exposées, ensuite, durant 28 jours à l'air avec une humidité relative de $60 \pm 2\%$ et une température de 20 ± 2 °C. Eprouvettes prélevées dans un ouvrage dont l'âge est d'au moins 14 jours Les éprouvettes sont exposées durant 28 jours à l'air avec une humidité relative de $60 \pm 2\%$ et une température de 20 ± 2 °C. Cette durée peut néanmoins se limiter au temps nécessaire pour que 2 pesées successives à 24 h d'intervalle accusent une différence de masse inférieure à 0,05 % de la masse de l'éprouvette obtenue lors de la dernière pesée. Il faut

souligner que le traitement en salle sèche est absolument nécessaire afin que l'eau contenue dans des pores non interconnectés puisse quitter l'éprouvette. Dans le cas contraire, cette eau sera comptabilisée comme eau absorbée. Des essais ont montré qu'en fonction du type de béton, cette quantité d'eau, exprimée en termes d'absorption d'eau par immersion, peut varier entre 0,0 et 0,3 % de diamètre et de 10 cm de hauteur, toutes les faces étant obtenues par forage ou découpage.

2.8.4. Mode opératoire de l'essai

Les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

- immersion dans un bac à eau à 20 ± 2 °C durant un minimum de 48 h et jusqu'à masse humide constante ; avant la pesée, l'éprouvette est essuyée avec une peau de chamois humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle ;
- dessiccation durant un minimum de 72 h et jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 105 ± 3 °C. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24 h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0,1 %.

2.8.5. Expression du résultat

L'absorption d'eau par immersion Abs est exprimée en pour-cent de la masse sèche et est calculée par la relation suivante (Figure 2.7) :

$$Abs = \frac{m_{s\grave{e}che} - m_{humide}}{m_{s\grave{e}che}} \quad (2.5)$$

Avec :

- m_{humide} , la masse humide constante de l'éprouvette après immersion ;
- $m_{s\grave{e}che}$, la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve

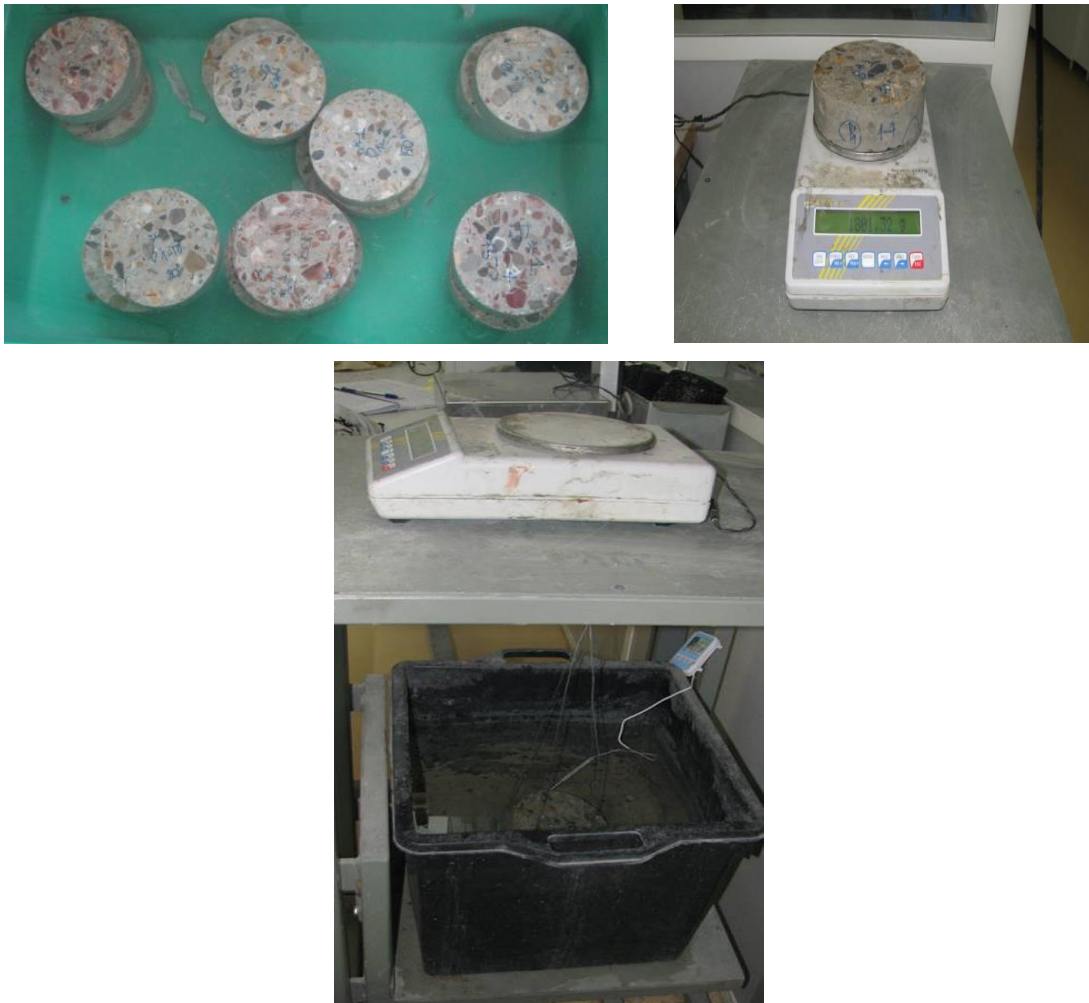


Figure 2. 7 : Mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau par immersion.

2.8.6. Cycle de chauffage - refroidissement

Le chauffage a été réalisé dans un four électrique "KEITH" programmable de 8 kN (Figure 2.8). Ce four est piloté par un régulateur-programmeur qui permet d'imposer et de contrôler la montée en température du four. Ce chargement thermique se fait en trois phases : la phase de montée en température à la vitesse de 1 °C/min jusqu'à la température de consigne, le palier à température constante de 120 minutes, et la phase de refroidissement. La vitesse de chauffage est choisie de manière à éviter le risque d'instabilité thermique du béton.



Figure 2. 8 : Four "KEITH" utilisé pour le chauffage des cylindres.

Le palier à température constante permet d'uniformiser la température au sein de l'éprouvette et de stabiliser la masse de l'éprouvette. La durée du palier est donc fonction de la taille de l'éprouvette et de la température du cycle de chauffage. Le refroidissement des éprouvettes se fait naturellement à l'intérieur du four maintenu fermé. La figure 2.9 montre les phases du chargement thermique. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi deux cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante jusqu'à la température de 300 et 600 °C.

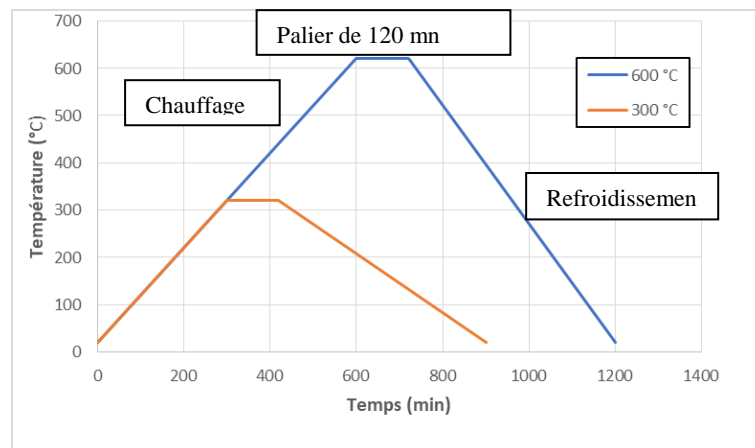


Figure 2. 9 : Cycle de chauffage et de refroidissement.

Chapitre 3 :

**Effet de la fibre de polypropylène recyclée
sur les propriétés du béton**

Chapitre 3 : Effet de la fibre de polypropylène recyclée sur les propriétés du béton

3.1 Introduction

Les fibres de polypropylène (PPF) sont utilisées pour le renforcement du béton depuis de nombreuses années (Bentur et Mindess, 2019; Zheng et Feldman, 1995; Merli et al., 2020). Elles ont été largement utilisées pour renforcer le béton comme une alternative aux fibres d'acier. Les PPF possèdent une résistance chimique et biologique élevée, y compris une très bonne résistance dans l'environnement alcalin des bétons (Segre et al., 1998). Conventionnellement, les fibres de polypropylène sont utilisées dans le béton à des teneurs relativement faibles, de 0,1 à 0,3% par volume, comme renforcement secondaire pour contrôler et réduire la fissuration due au retrait plastique du béton. Elles sont hydrophobes en raison de leur structure chimique, ce qui réduit la liaison avec le ciment et affecte négativement leur dispersion dans la matrice. La force de liaison entre les fibres et la matrice peut être développée par le traitement de surface des fibres (Donghwan et al., 2004).

Les fibres PPF ont été utilisées avec succès dans les matériaux cimentaires pour contrôler la fissuration de retrait, pour améliorer la ténacité du matériau et la résistance aux chocs, et pour augmenter significativement la capacité d'absorption d'énergie du matériau (Song et al. 2005; Nili et Afroughsabet, 2010; Karahan et Atis, 2011). Zeiml et al. (2006) et Merli et al., (2020) ont suggéré qu'il y a une grande influence de la quantité de fibres de polypropylène sur le comportement d'écaillage du béton sous la charge du feu. Les fibres uniformément dispersées renforcent la matrice de ciment et pontent les fissures, réduisent la sensibilité de la matrice à la fissuration et diminuent la largeur des fissures (Aly et al., 2008). Tout ajout de fibres dans un mélange de béton ordinaire affecte ses propriétés tant dans le mélange frais que dans le composite durci. Des études montrent que l'augmentation de la teneur en fibres diminue la maniabilité du composite en raison de la surface spécifique élevée des fibres (Zhang et Li, 2013). Le facteur à prendre en compte ici est la surface des fibres. En plus du granulat grossier, le mortier doit également enrober les fibres. Selon le comité ACI 544 (2002), il est conseillé d'augmenter la fraction du mortier et de réduire la teneur en agrégats grossiers pour tenir compte de l'augmentation de la surface due à l'ajout de fibres de

polypropylène. Le rapport agrégats grossiers/agrégats fins dans le mélange est réduit de sorte que les particules individuelles d'agrégats grossiers soient entièrement entourées d'une couche de mortier. La quantité exacte d'agrégats grossiers à réduire dans les mélanges peut être calculée en utilisant la méthodologie basée sur l'épaisseur de la couche de mortier (Voigt et al., 2004).

Les fibres de polypropylène ont été largement utilisées comme renforcement dans les matériaux à base de ciment Portland en raison de leur haute ténacité et durabilité ; alors qu'il y avait un conflit sur la corrélation de la teneur en PPF et la résistance à la compression correspondante du béton. Bien qu'il ait été déclaré par Orasutthikul et al., (2017) que l'incorporation de PPF réduit la résistance à la compression des bétons, certains chercheurs (Yin et al., 2016, Vairagade et al., 2012, Ahmed et al., 2006) ont rapporté que le PPF en petite fraction volumique, allant de 0,05% à 0,5%, n'a aucun ou très peu d'effet sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres. Ce conflit a été étudié par Richardson (2006) et il a conclu qu'en raison de la rupture de la liaison du ciment par le PPF, la résistance à la compression du béton est réduite de façon notable. Le renforcement des fibres à l'aide de différents types de fibres vierges a été largement étudié, et il a généralement été observé que les fibres recyclées pouvaient fournir un renforcement similaire à celui des matériaux vierges. Cela a été démontré dans des études sur des fibres synthétiques recyclées provenant de diverses sources, notamment des tapis, des pneus et des récipients en plastique, en comparaison avec des fibres synthétiques vierges disponibles dans le commerce (Wang et al. 2000; Yin et al. 2016). La résistance aux alcalis de la fibre FPR a été testée dans quatre solutions alcalines différentes pour étudier la dégradation de la fibre FPR. La performance post-fissuration des bétons renforcés de FPR a également été quantifiée et comparée à celle des bétons renforcés de fibres PP vierges par le biais du test CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) et RPDT (Round Determinate Panel Test). Dans cette étude, deux pourcentages volumétriques de fibres ont été choisis pour renforcer des bétons de 40 MPa et 25 MPa, qui sont la qualité standard de béton utilisé respectivement dans les panneaux préfabriqués et les trottoirs en béton. Ils ont conclu que les fibres FPR peuvent être utilisées pour remplacer les fibres vierges PPF dans les trottoirs en béton et les panneaux préfabriqués.

Le secteur de la construction est le deuxième plus grand consommateur de plastiques après l'industrie de l'emballage (Addis, 2012). Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde avec une production de plus de 2 milliards de tonnes par an (ONS, 2018). Par conséquent, l'utilisation de plastiques recyclés dans le béton offre une énorme

possibilité de réutilisation des déchets plastiques à l'échelle industrielle. L'utilisation de fibres de polypropylène recyclées (FPR) a le potentiel de réduire considérablement les impacts environnementaux et d'étendre les applications des produits en plastique recyclé. Les avantages de l'utilisation de ces fibres de polypropylène recyclées comprennent un coût de traitement généralement inférieur à celui des fibres de polypropylène vierges, ainsi que l'élimination des déchets dans les décharges.

Les auteurs ont étudié les performances des fibres de polypropylène recyclées (FPR) lorsqu'elles sont utilisées dans du béton à résistance normale et élevée. Les FPR ont été recyclées à partir de sacs tissés usagés, coupées à 40 mm de longueur comme des fibres commerciales et utilisées à différents dosages correspondant à 0,1; 0,2 et 0,3%. D'autre part, une fibre de polypropylène commerciale (PPF) a été utilisée à des dosages équivalents à ceux des FPR à des fins de comparaison. Une étude expérimentale a été menée pour étudier les effets des FPR sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module élastique, le vide des pores perméables et le retrait lorsqu'elles sont introduites dans une formulation de béton.

3.2 Programme expérimental

Cette étude a été réalisée les deux types de béton (BO et BHP). Dans cette étude, les agrégats grossiers ont été remplacés par des fibres de polypropylène à des taux de 0,2, 0,4 et 0,3% du volume de béton. La température ambiante pendant le mélange et les essais a été maintenue à $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Des cylindres de béton en plastique de 100×200 mm ont été utilisés pour les tests de résistance à la compression, à la utilisés pour déterminer la résistance à la flexion et les développements du retrait séchage.

Tous les échantillons ont été stockés en cure humide conformément aux spécifications de la norme ASTM C39 (2018) jusqu'à l'âge d'essai. Chaque valeur obtenue représente la moyenne de trois essais dont les coefficients de variation étaient inférieurs à 5% pour les différents résultats d'essai. Les échantillons destinés à la mesure du retrait ont été conservés dans des conditions de laboratoire où le retrait représente la mesure moyenne de deux échantillons d'essai.

3.3 Résultats et discussion

Tous les mélanges étudiés ont atteint un affaissement de 120 ± 20 mm et une teneur en air de $2 \pm 0,5\%$. Comme prévu, l'incorporation de fibres a augmenté la demande en HRWR pour maintenir une fluidité donnée. Les résistances à la compression et à la flexion ainsi que les valeurs du module élastique des mélanges BO et BHP ont été calculées comme une moyenne de trois mesures différentes.

3.3.1 Résistance à la compression

Comme on peut le voir sur la Figure 3.1, l'incorporation de PPF dans les mélanges de béton non armé a entraîné une réduction de la résistance à la compression. L'utilisation de fibres de polypropylène recyclées (FPR) présente un comportement similaire à celui des fibres PPF commerciales, surtout à faible teneur. Cependant, pour des teneurs plus élevées (0,20 et 0,30 %), l'utilisation de FPR entraîne une réduction légèrement plus importante de la résistance à la compression du béton non armé par rapport au béton armé à haute résistance. Par exemple, l'utilisation de 0,10 % et 0,20 % de PPF entraîne une réduction de 6 % (de 34,6 à 32,4 MPa) et 12 % (de 34,6 à 30,4 MPa) de la résistance à la compression, respectivement. Cependant, l'utilisation de 0,30 % entraîne une réduction de 20 % (de 34,6 à 27,4 MPa). Dans le cas des mélanges de béton à haute résistance, l'incorporation de 0,20 % et 0,30 % de PPF réduit la résistance à la compression de 10 % (de 50,4 à 45,5 MPa) et de 15 % (de 50,4 à 42,0 MPa), respectivement.

Les corrélations présentées sur la Figure 3.1 montrent une diminution linéaire de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres du mélange. La résistance du béton non armé est réduite de 2,3 et 3,1 MPa pour chaque 0,1% de PPF ou FPR utilisé, respectivement. Alors que pour les mélanges de béton à haute résistance, cette diminution n'est que de 2,7 et 2,9 MPa.

La réduction de la résistance à la compression dans le béton non armé peut être attribuée au volume de vides relativement plus élevé et au volume relativement plus faible d'agrégats grossiers, ce qui entraîne un effet d'interverrouillage moins important dans le béton renforcé par des fibres. L'ajout de fibres crée une zone de transition interfaciale (ITZ) plus importante, ce qui peut affecter la résistance à la compression. D'autre part, la résistance à la compression plus faible obtenue avec les fibres FPR par rapport aux fibres PPF peut être due à leur surface lisse et à leur forme plate. Il est bien établi que les fibres peuvent contribuer à augmenter la

résistance du béton si leur module d'élasticité est supérieur à celui de la matrice. Étant donné le module d'élasticité du béton, qui est d'environ 15 à 30 GPa, cette condition semble difficile à remplir avec la plupart des fibres synthétiques (Zheng et Feldman 1995). Ce résultat est conforme à celui trouvé par Marthong (2019) dans lequel le béton avec des fibres de polypropylène présente une résistance à la compression de 3% à 21% inférieure à celle du béton de contrôle. D'autre part, certains chercheurs (Chandra et al. 2018, Geok et al. 2020) ont montré que les fibres PPF ont des effets minimes sur la résistance à la compression et qu'un léger effet est seulement observé pour une faible teneur en fibres par rapport au béton de contrôle.

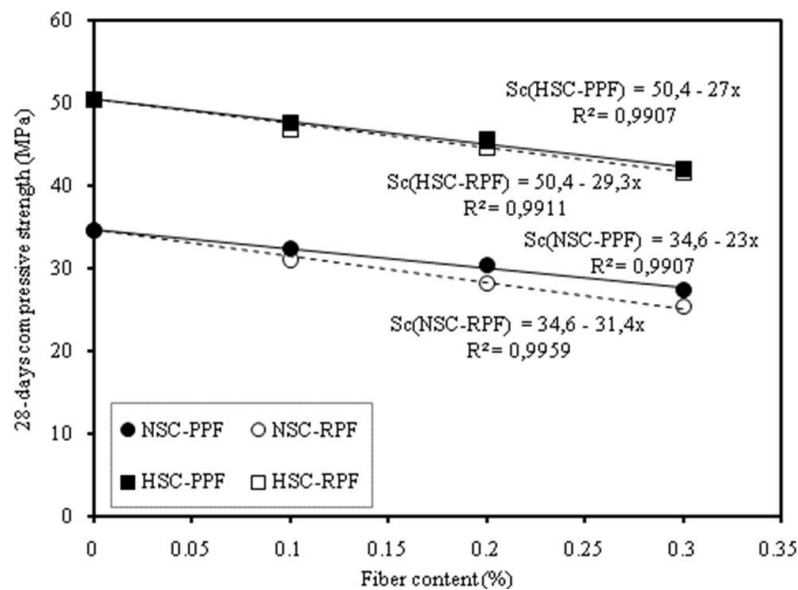


Figure 3. 1 : Variation de la résistance à la compression pour les BO et BHP en fonction du type et de la teneur en fibres.

3.3.2 Résistance à la flexion

Selon les résultats de la résistance à la flexion présentés sur la Figure 3.2, l'utilisation de PPF jusqu'à 0,30 % a entraîné une augmentation d'environ 10 % de la résistance à la flexion, quel que soit le type de béton. Dans le cas des fibres FPR, la réduction est d'environ 10 % et 25 % pour le béton non armé et le béton à haute résistance, respectivement. L'utilisation de FPR a entraîné une résistance à la flexion relativement plus élevée que celle du PPF et cette réduction est plus prononcée dans le cas du béton à haute résistance. Ce résultat peut être dû aux caractéristiques de résistance à la traction et de module d'élasticité relativement plus faibles des fibres FPR par rapport à celles du PPF.

Ces résultats correspondent aux résultats précédents (Marthong 2019, Setti et al. 2020) où les augmentations relatives de la résistance à la flexion des éprouvettes en béton de fibres sont

plus élevées, environ 5 à 40 %. De plus, Mazloom et Mirzamohammadi (2019) ont rapporté que la résistance à la flexion du composite de ciment contenant des fibres de polypropylène est passée de 6 MPa à 7,82 MPa, ce qui résulte de la force de liaison entre les fibres et la matrice de ciment. Une tendance similaire a été rapportée par Niranjana et al. (2015) pour les fibres courtes de polypropylène, où l'augmentation de la résistance est causée par une meilleure dispersion des fibres qui dévie le chemin des fissures et conduit à une plus grande consommation d'énergie. Les modèles statistiques établis à l'aide d'un plan composite central indiquent que la teneur en fibres a le plus grand effet sur la résistance à la flexion (Hadjoudja et al. 2014).

L'amélioration apportée par l'ajout de fibres de polypropylène est due à la participation de ces fibres à la résistance à la propagation des fissures. Toute fibre qui traverse une fissure crée un pont entre les deux bords. Ce pont permettra à une partie de la contrainte d'être transférée d'un bord à l'autre. Ainsi, les fibres s'opposent à l'élargissement de la fissure et jouent le rôle d'un joint qui augmente la résistance du béton après fissuration. Les fibres FPR et PPF aident à suturer les microfissures et à retarder leur propagation, ce qui empêche l'apparition de macrofissures. De ce fait, le béton renforcé de fibres de béton à haute résistance présente de meilleures caractéristiques mécaniques après fissuration en raison de l'adhérence élevée entre les fibres et le béton par rapport au béton non armé (Setti et al. 2020, Yin et al. 2015).

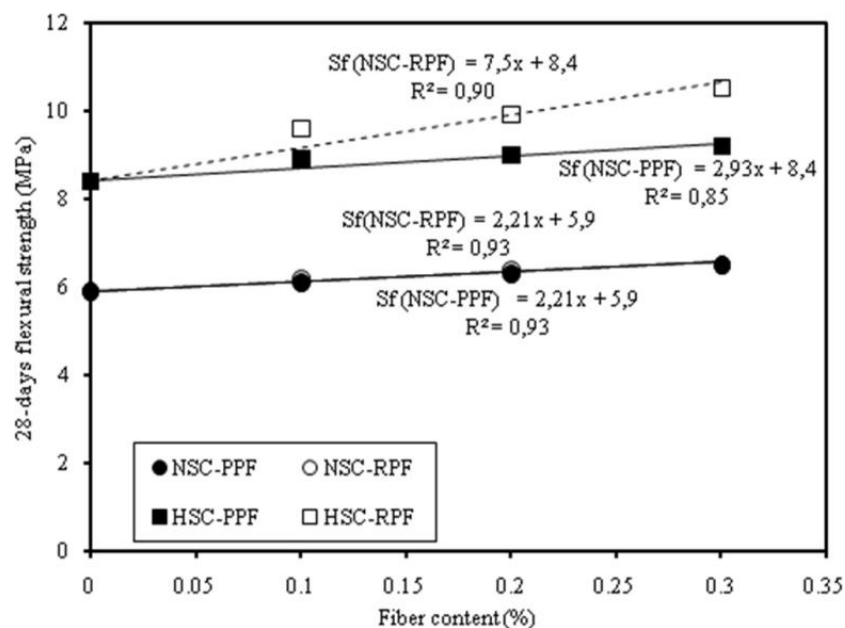


Figure 3. 2 : Variation de la résistance à la flexion pour les BO et BHP en fonction du type et de la teneur en fibres.

Le tableau 3.1 récapitule certains résultats sur les propriétés mécaniques du béton avec FPP et FPR. Il est clair que les fibres recyclées sont bénéfiques et conduisent à des résistances proches et même élevées par rapport à celles des fibres vierges.

Tableau 3. 1 : Comparaison des résultats des propriétés mécaniques du béton renforcé de FPR et PPF.

Référence	Source de recyclage	Résistance à la compression	Résistance à la flexion
Meddah et Bencheikh (2009)	FPR à partir de sacs de stockage	$S_c = 30$ MPa à (0%) $S_c = 25$ MPa à (0,5%)	$S_f = 8,1$ MPa à (0%) $S_f = 8,1$ MPa à (0,5%)
Yin et al. (2016)	FPR à partir de déchets d'industrie	$S_c = 55,8$ MPa à (0%) $S_c = 52,5$ MPa à (0%)	$S_f = 5,2$ MPa à (0%) $S_f = 5,4$ MPa à (0,45%)
Yin et al. (2016)	Fibres de plastique recyclées de la construction industrielle	$S_c = 45,9$ MPa à (0%) $S_c = 47,7$ MPa à (0%)	$S_f = 4,5$ MPa à (0%) $S_f = 4,3$ MPa à (0,45%)
Thorneycroft et al. (2018)	Fibres de plastique recyclées	$S_c = 55,8$ MPa à (0%) $S_c = 54,4$ MPa à (1%)	$S_f = 3,26$ MPa à (0%) $S_f = 4,07$ MPa à (0,45%)

Le BHP renforcé de fibres présente de meilleures caractéristiques mécaniques après fissuration en raison de la forte adhésion entre les fibres et le béton par rapport au BO (Setti *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2015).

Afin de mieux quantifier la résistance à la flexion S_f en fonction de la résistance à la compression S_c , plusieurs essais ont été réalisés. En utilisant la méthode des moindres carrés pour les résultats expérimentaux, deux relations ont été trouvées pour lesquelles les coefficients de corrélation ont atteint des valeurs proches de l'unité. Ces relations peuvent être formulées comme suit :

$$S_f = 0,3 S_c^{0,85+0,7PPF^2} \quad R^2 = 0,965 \quad (3.1)$$

$$S_f = 0,3S_c^{0,85+1,1FPR^2} \quad R^2 = 0,921 \quad (3.2)$$

Les résistances sont exprimées en MPa et la teneur en fibres de FPP et FPR est exprimée en pourcentage. La dispersion entre les résultats expérimentaux et ceux prédits par les équations (3.1) et (3.2) décrit une variation parfaitement linéaire avec une différence moyenne de 0.25 MPa et 0.48 MPa pour le béton avec des fibres FPP et FPR respectivement. Un nombre important de recherches sont menées sur la récupération des déchets et leur

utilisation comme fibres dans le béton. Cela permet d'éviter l'utilisation massive de fibres vierges et contribue à la protection de l'environnement.

3.3.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton est un facteur clé pour l'estimation de la déformation des éléments structurels. Il est fréquemment exprimé en fonction de la résistance à la compression du béton (Goncalves *et al.*, 2007; Herve *et al.*, 2010). Comme on peut l'observer sur la figure 3.3, l'incorporation de 0,10% de FPR dans les mélanges BO et BHP n'a pas eu d'effet significatif sur le module élastique. Cependant, l'utilisation de 0,20 et 0,30% ont réduit le module élastique des BO de 15,8% et 20%, respectivement. Dans le cas des mélanges BHP, cette réduction est d'environ 10%. L'utilisation de FPR dans les BO a entraîné une réduction légèrement supérieure du module élastique par rapport aux BHP. Cela peut être attribué à la plus grande porosité dans les BO par rapport à celle des BHP.

D'autre part, la réduction observée avec les deux types de béton peut être due à une teneur en agrégats plus faible, car les fibres ont été utilisées en remplacement des agrégats grossiers. De même, il a été constaté que le module élastique est légèrement affecté par l'ajout de fibres de polypropylène (Altalabani *et al.*, 2020; Faraj *et al.*, 2019). De plus, pour le béton contenant 1% de fibres de polypropylène, ce module a diminué de 28,3% par rapport à celui du béton témoin (Alwesabi *et al.*, 2020); cette diminution a été attribuée aux changements de densité du béton.

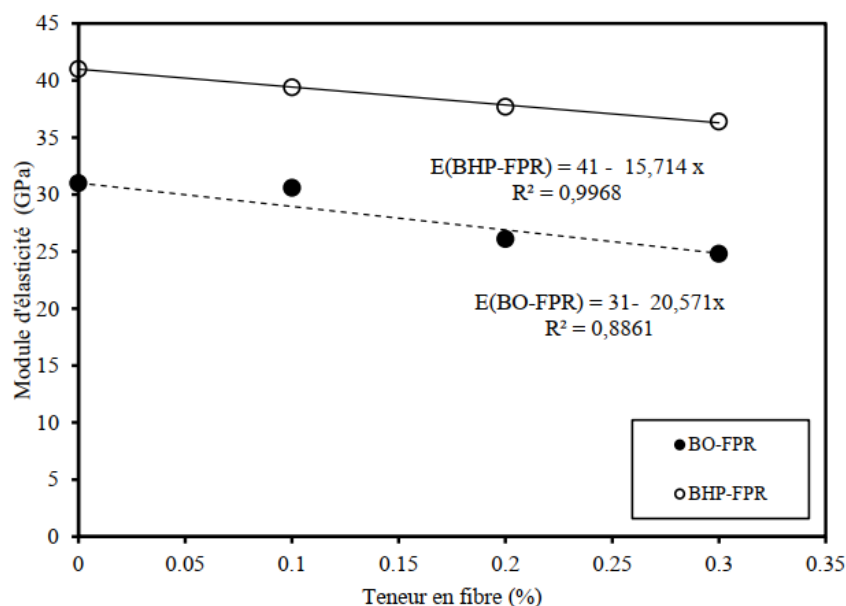


Figure 3. 3 : Variation du module d'élasticité pour les BO et BHP renforcés de FPR.

En utilisant les résultats obtenus, il est facile d'exprimer les valeurs du module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression S_c et du ratio de fibres incorporées FPR. Cette relation peut s'écrire comme suit :

$$E_c = 11000 \left(\frac{S_c}{10} \right)^{0.82+0.016FPR^2} \quad R^2 = 0,975 \quad (3)$$

3.4. Porosité à l'eau

En plus des propriétés mécaniques, l'effet de l'ajout de fibres sur le vide interstitiel perméable des matériaux, BO et BHP a été évalué selon les spécifications de l'ASTM C642 (2013). BO et BHP a été évalué selon les spécifications de l'ASTM C642 (2013). Les résultats des essais obtenus avec les mélanges de FPR sont présentés dans la Figure 3.4. L'incorporation de FPR dans le béton a entraîné une légère augmentation du vide interstitiel perméable, quelle que soit la classe de béton (BO et BHP). L'augmentation linéaire du vide interstitiel perméable apparaît clairement dans les résultats de la Figure 3.4. Chaque 0,1% de fibre FPR utilisé dans le mélange entraîne une augmentation de 2,9% et de 5,2% du vide interstitiel perméable dans les mélanges BO et BHP respectivement, respectivement. L'incorporation de 0,10%, 0,20% et 0,30% de FPR a entraîné une augmentation d'environ 2,3%, 4,5% et 6,2% du vide interstitiel perméable du BO, respectivement.

Dans le cas des mélanges BHP, une porosité perméable plus élevée de 4,5%, 9,8% et 13% a été observée. Ces résultats sont en accord avec la littérature disponible (Meddah et Bencheikh, 2009). L'incorporation de fibres synthétiques dans une matrice à base de ciment peut perturber le squelette granulaire et créer plus d'espace vide dans le matériau composite. De même, certains résultats (Zeyad et al., 2020; Faraj et al., 2019) ont montré que les fibres de polypropylène entraînaient une augmentation de la porosité à tous les âges d'essai. Ce résultat peut être attribué à l'effet des fibres de polypropylène sur l'ouvrabilité ; ce qui a conduit à des pores supplémentaires sur le mélange de béton par rapport au béton témoin. La perméabilité est l'une des propriétés intrinsèques du béton qui contrôle sa durabilité à sa résistance à la compression. En corrélant ces deux résultats expérimentaux, une relation linéaire a été trouvée, ce qui indique que le béton à haute résistance est le moins poreux et qu'il a une grande durabilité élevée. Nous avons obtenu l'expression de l'équation (3.4), où chaque 10 MPa de résistance à la compression diminue le vide interstitiel perméable de 1%. La figure 3.5 illustre cette variation où la corrélation semble parfaite.

$$P(\%) = 17 - 0,1 Sc \quad R^2 = 0,963 \quad (3.4)$$

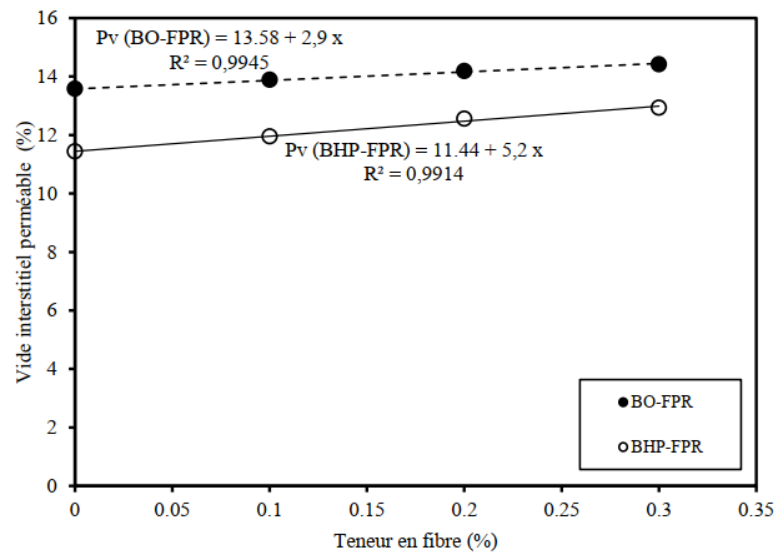


Figure 3. 4 : Variation de la porosité des BO et BHP renforcés de FPR.

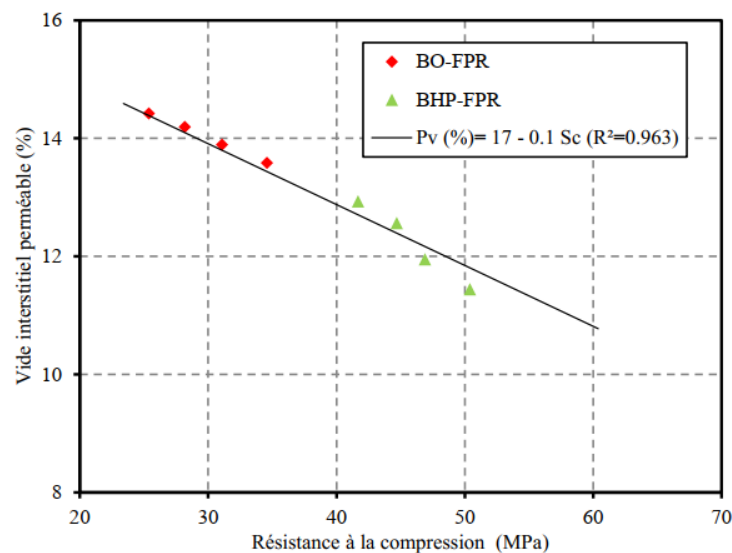


Figure 3. 5 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité à l'eau des bétons renforcés de FPR.

3.5. Retrait de séchage

Le retrait séchage du béton dépend de l'humidité relative, de la température, du type et de la quantité du liant, de la teneur en air, du rapport entre les granulats fins et grossiers, du type et du volume des granulats, de la durée de cure etc. (ACI-209, 2009; Kovler et Zhutovsky, 2006). Les fibres synthétiques sont introduites dans le béton pour améliorer le retrait plastique et réduire le potentiel de fissuration du béton. Des dosages optimaux de fibres permettant un compromis entre les propriétés mécaniques et le retrait plastique doivent être incorporés afin

d'éviter la formation de fissures dans le béton plastique doivent être incorporés pour éviter une réduction de la résistance tout en améliorant la résistance au retrait.

Le retrait de séchage des mélanges BO et BHP incorporant 0,10%, 0,20% et 0,30% de FPR, par volume, a été mesuré jusqu'à 336 jours de séchage conformément à la norme ASTM C157 (2017). Pour chaque type de mélange et de teneur en fibres, trois prismes ont été préparés et utilisés pour suivre l'évolution du retrait. Les mesures de retrait au séchage pour le BO et les BHP sont illustrées dans les figures 3.6 et 3.7, respectivement.

Comme on peut l'observer, les mélanges BO ont développé un retrait relativement plus important que les mélanges BHP. Cela peut être principalement dû à la porosité relativement plus élevée du mélange BO par rapport à celle du mélange BHP. L'incorporation de FPR a permis de réduire le retrait de séchage de 6% à 10% en fonction de la résistance du béton. Par exemple, l'utilisation d'un volume de fibres plus faible de 0,10% a réduit le retrait de séchage d'environ 3 % pour les deux types de béton.

L'utilisation d'un volume de fibres de 0,30 % a permis de réduire le retrait de séchage du BO d'environ 6 %. Dans le cas du BHP, une réduction plus importante de 10% a été observée. On s'attend à ce que cette réduction diminue probablement la surface totale des fissures, la largeur maximale des fissures et le nombre de fissures. En outre, la réduction du retrait de séchage permet d'éliminer le besoin de joints dans une dalle de béton. Cela peut réduire le coût global de l'entretien et Cela permet de réduire le coût global de l'entretien et d'améliorer les performances structurelles. D'autres études seront menées pour étudier ces questions et d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de dosages plus élevés et leur impact sur les propriétés mécaniques et le retrait du béton.

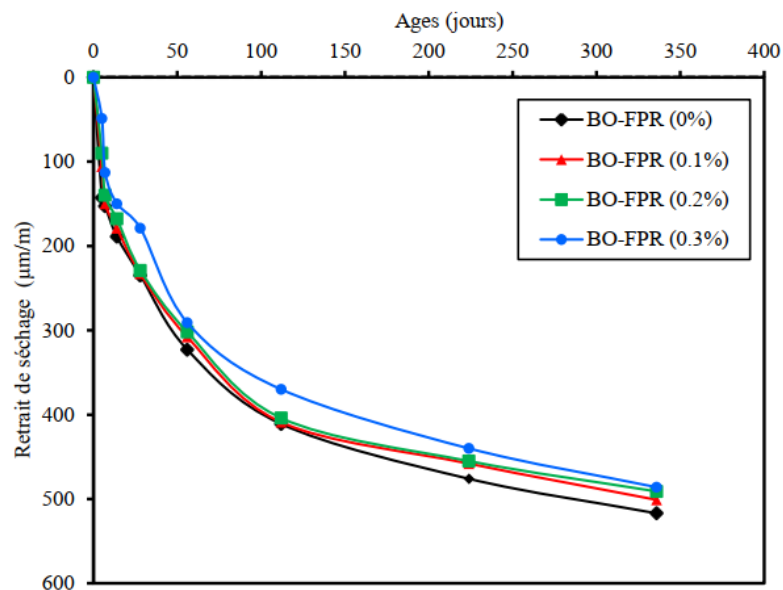


Figure 3. 6 : Variation du retrait séchage des BO renforcés de FPR.

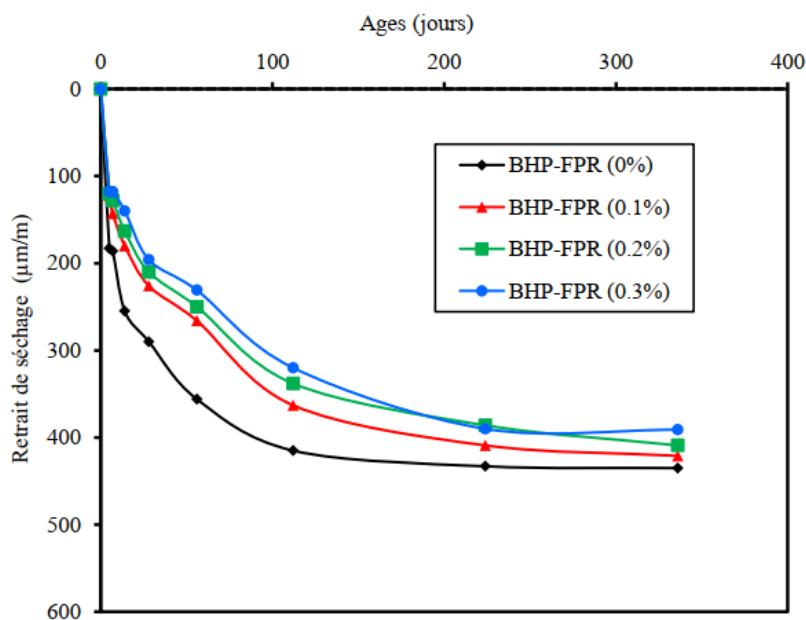


Figure 3. 7 : Variation du retrait séchage des BHP renforcés de FPR.

La comparaison des résultats du retrait de séchage entre le béton ordinaire et le béton à haute performance illustrée à la Figure 3.8, montre qu'au jeune âge, le type de béton n'a pas d'effet sur le retrait produit quelle que soit la teneur en fibres FPR. Après 28 jours, le béton à haute performance a un retrait nettement réduit par rapport au béton ordinaire. Cette réduction atteint 20% à un âge plus avancé. Ceci est dû au développement de la résistance à la flexion et à l'adhérence générée par les fibres FPR ce qui crée une résistance à la déformation et empêche le développement du retrait. De la même manière, Bertelsen et al. (2019) ont montré

que les fibres FPR étaient également efficaces pour contrôler la fissuration de la surface et réduire la déformation due au retrait, à condition que les fibres FPR ne soient pas utilisées à dosage élevé soit 2 % de fibres FPR conduisent à une déformation de retrait. L'efficacité du PPF dans la réduction du retrait de séchage peut être associée à l'orientation des fibres et à la mauvaise compacité. Plus les fibres sont alignées dans la direction du retrait, plus le retrait est faible (Zhong et al., 2020).

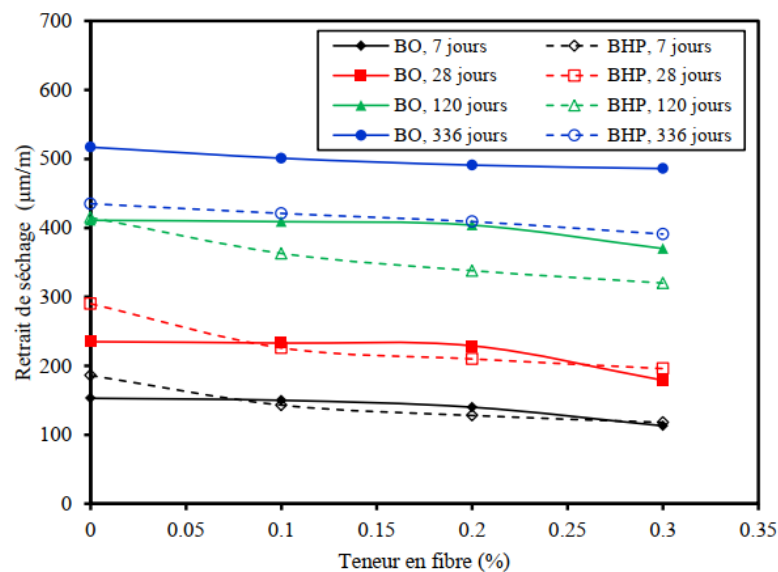


Figure 3. 8 : Variation du retrait séchage des BO et BHP renforcés de FPR.

3.6. Conclusion

L'effet d'une fibre de polypropylène recyclée (FPR) sur les propriétés mécaniques et le retrait de séchage de types de béton ordinaire et à haute performance a été évalué. Les résultats des tests démontrent l'utilité de l'utilisation de la FPR dans le béton pour contribuer à réduire l'impact environnemental des sacs tissés et à développer des matériaux de construction rentables et durables. Sur la base des résultats des tests présentés dans ce document, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- (1): L'incorporation de fibres de polypropylène recyclées (FPR) a montré un comportement similaire à celui des fibres de polypropylène commerciales. Les deux types de fibres ont entraîné une réduction de 10 à 20 % de la résistance à la compression.
- (2) L'utilisation de 0,30 % de fibres de polypropylène recyclées a entraîné une augmentation de 25 % de la résistance à la flexion pour les BHP par rapport à 9,5 % obtenue avec les fibres

de polypropylène FPP. Pour le BO, une augmentation de 10% a été observée pour les deux types de fibres.

(3) L'utilisation des FPR à des teneurs en volume de 0,20 % et 0,30 % a réduit les modules élastiques des BO de 16 % et 20 %, respectivement. Dans le cas des mélanges des BHP, cette réduction est d'environ de 10%. Ceci est dû aux propriétés élastiques plus faibles du FPR et à la surface lisse par rapport au type de FPP.

(4) L'ajout de 0,30 % de FPR a réduit le retrait de séchage de 6 % et 10 % pour les bétons ordinaires et les bétons à haute performance, respectivement.

(5) Les types de béton ordinaire et à haute performance renforcés de FPR ont montré un vide poreux perméable relativement plus élevé. Dans le cas de 0,30 % de FPR, l'augmentation est d'environ 6,2 et 13 % pour les types BO et BHP, respectivement.

(6) Les résultats de cette étude peuvent contribuer à promouvoir l'utilisation du FPR pour réduire l'impact environnemental des sacs tissés et à développer des matériaux de construction moins coûteux et durables.

Remerciements

Nous remercions le ministère algérien de l'enseignement supérieur pour son soutien financier. Nous remercions également le département de génie civil de l'Université de Sherbrooke Canada pour son soutien. L'auteur tient à remercier les techniciens du "Laboratoire de recherche sur les matériaux cimentaires alternatifs" de l'Université de Sherbrooke pour leur assistance technique pendant les recherches expérimentales.

Chapitre 4 :

**Effet du traitement de surface des FPR
sur les propriétés mécaniques du béton**

Chapitre 4 : Effet du traitement de surface des FPR sur les propriétés mécaniques du béton

4.1. Introduction

L'ajout de déchets polymères au béton correspond à une nouvelle perspective dans les activités de recherche, intégrant les domaines de la technologie du béton et de la technologie environnementale. Les déchets industriels et domestiques ont un pourcentage significatif de matériaux polymères dans leur constitution, qui occupent un volume considérable sur les décharges. C'est pourquoi leur recyclage est intéressant pour la recherche et le développement de technologies permettant de minimiser les problèmes causés par ces déchets (Mesbah et al., 2008; Zoorob et al., 2000; Song et al., 2005; Sivakumar et al., 1995; Ogi et al., 2005).

Les fibres de polypropylène ne sont pas ajoutées pour améliorer la résistance, bien que de modestes augmentations de la résistance puissent se produire. En général, les fibres ne réduisent pas seulement la formation de fissures, mais limitent également leur propagation au sein de la matrice en servant de pont entre les fissures et assurent un transfert adéquat des contraintes (El-tayib et al., 1988). On ne s'attend pas à ce que la fibre de polypropylène améliore sa ductilité et sa ténacité (Alhozaimi et al., 1996). Il n'est pas surprenant que leur inclusion dans une matrice de ciment augmente la résistance interne à l'écoulement due à l'interaction entre les fibres et les graviers et altère la maniabilité. La fraction volumique des fibres a une influence importante sur les facteurs suivants la maniabilité du béton. Les bons mélanges de béton renforcé de fibres de polypropylène contiennent généralement un volume de mortier élevé par rapport au béton ordinaire, car les fibres sont généralement utilisées en remplacement des agrégats grossiers. La quantité exacte d'agrégat grossier à réduire dans les mélanges a été calculée en utilisant la méthodologie basée sur l'épaisseur de la couche de mortier (Voigt et al., 2004). Pour l'ouvrabilité dans le béton renforcé de fibres de polypropylène, le rapport agrégat/sable doit être augmenté, c'est-à-dire que nous avons besoin d'une quantité fondamentalement plus élevée de mortier dans le béton. La première étape consiste à réduire la quantité d'agrégat grossier et à le remplacer par un volume d'agrégat fin en utilisant la méthodologie basée sur l'épaisseur de la couche de mortier.

La nature hydrophobe des fibres de polypropylène usagées affecte négativement l'adhésion à une matrice inorganique (béton) et, par conséquent, peut entraîner une perte de résistance. L'adhésion déficiente conduit à un faible transfert de la matrice aux fibres, ce qui induit un faible effet de renforcement. Les propriétés mécaniques d'un béton renforcé de fibres dépendent non seulement des propriétés des constituants mais aussi du degré d'adhésion interfaciale entre la fibre de polypropylène et la matrice du béton. Les caractéristiques d'adhérence du PFRC dépendent à la fois de la surface et des caractéristiques chimiques de la fibre utilisée dans le béton. Ces caractéristiques de liaison influenceront fortement les propriétés mécaniques du produit solide final. L'adhérence peut être améliorée par un verrouillage mécanique ou un traitement de surface. L'accrochage mécanique peut être amélioré par la déformation de la surface ou, dans le cas des fibres synthétiques, par la fibrillation. Le traitement chimique de surface consiste à utiliser une solution pour améliorer la liaison entre les fibres polymères et la matrice cimentaire. La gravure chimique est une tentative supposée de modifier la surface de la fibre par l'abstraction d'atomes d'hydrogène du squelette du polymère et leur remplacement par des groupes polaires (Fox et al., 1996; Denes et al., 19996). Divers types de traitements de surface ont été tentés pour les fibres de carbone (Li et al., 1996) et de polypropylène (Zhang et al., 2000), mais aucune autre littérature n'a été trouvée pour le traitement chimique des fibres polymères destinées à être utilisées dans le béton, en particulier pour le type de polymère mixte étudié ici.

Des études antérieures ont montré que les fibres ont peu d'effet sur la résistance à la compression des FRC de faible volume ($< 0,5\%$), en raison de la résistance à la compression négligeable des fibres ; toute petite diminution est généralement attribuée à des problèmes de placement (Felekoglu et al., 2009). Le but de cette étude était de déterminer l'influence des traitements chimiques sur la résistance à la compression et à la traction par flexion de FRC incorporant une fibre de polypropylène recyclée.

4.2. Programme expérimental

Le traitement de surface des FPR a été réalisé uniquement sur le béton ordinaire.

4.3. Résultats et discussions

Tous les mélanges étudiés ont atteint un affaissement de 120 ± 15 mm et une teneur en air de $2 \pm 0,5$ %. Comme prévu, l'incorporation de fibres a augmenté la demande en HRWR pour maintenir une fluidité donnée. Une étude sur les caractéristiques de liaison des fibres traitées

chimiquement avec le béton à l'aide de dichromate de potassium (PD), permanganate de potassium (PP) est présentée. Les fibres ont été séparées manuellement et introduites dans les solutions respectives, où elles ont été laissées pendant les temps et températures indiqués ci-dessous. Après le traitement, les fibres ont été lavées dix fois dans 2,5 l d'eau du robinet, puis séchées à 45 °C pendant 24 h. La première solution a été préparée en mélangeant du dichromate de potassium, de l'acide sulfurique et de l'eau distillée dans un rapport massique de 37,5:750:60. Les fibres ont été immergées dans 470 ml de cette solution à 70 °C pendant 1 min. La solution de PP a été préparée en mélangeant du PP, de l'acide nitrique et de l'eau distillée dans un rapport massique de 15,8:1,58:625 (en fait, on mélange 500 ml de solution aqueuse de PP 0,2 M avec 125 ml de solution aqueuse d'acide nitrique 0,2 M). Les fibres ont été immergées dans 625 ml de solution et maintenues à température ambiante pendant 24 heures.

La résistance à la compression et à la traction par flexion des fibres traitées et non traitées est résumée dans le tableau 4.1. Chaque valeur a été calculée comme une moyenne de trois mesures différentes.

4.3.1. Propriétés mécaniques

On constate que la résistance à la compression et à la traction du béton diminue avec l'incorporation de fibres, ce qui est courant dans le béton renforcé de fibres de polypropylène. De plus, il y a eu peu de changement dans la résistance à la compression et à la traction avec les différentes techniques de traitement de surface (Figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4).

Tableau 4. 1 : Résistance à la compression et de la traction par flexion.

Fibres de polypropylène recyclés	Dosage FPR (%)	Résistance à la Compression (MPa)	Résistance à la Traction par flexion (MPa)
Fibres de polypropylène recyclés non traitées	0	41.70	7.97
	0.1	38.50	7.20
	0.2	36.20	6.60
	0.3	32.10	6.00
FPR traitées avec Dichromate de potassium (DP)	0.1	40.40	7.56
	0.2	41.20	7.28
	0.3	42.80	7.14
FPR traitées avec Permanganate de potassium (PP)	0.1	35.40	6.90
	0.2	33.51	5.90
	0.3	28.31	5.60

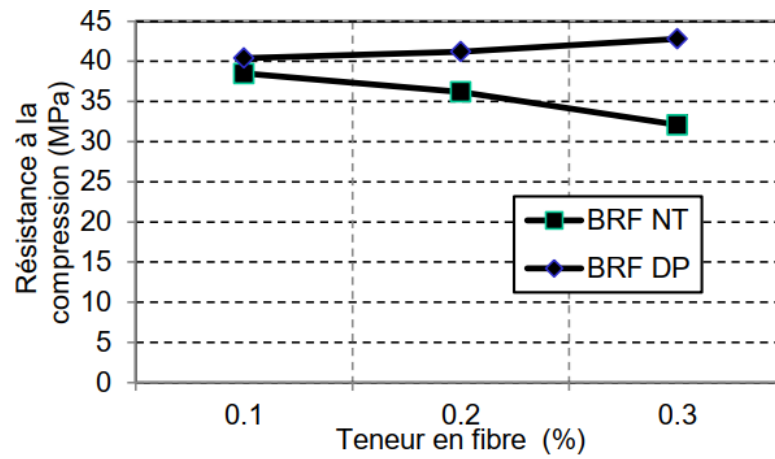


Figure 4. 1 : Résistance à la compression du BO renforcé des FPR traitées avec du DP.

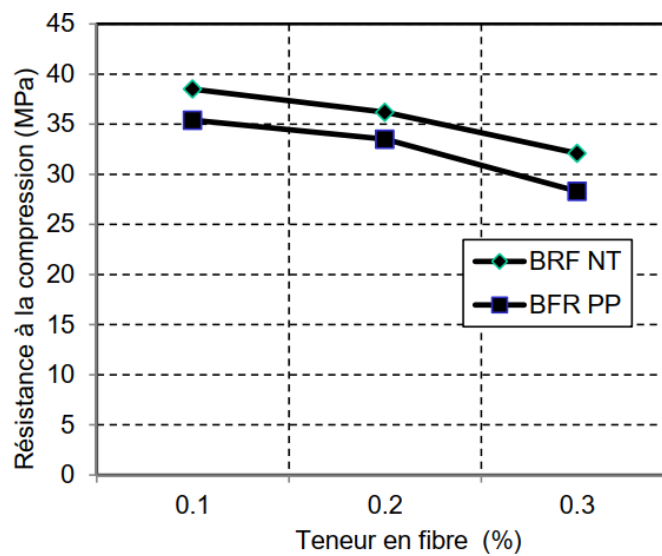


Figure 4. 2 : Résistance à la compression du BO renforcé avec des FPR traitées avec du PP.

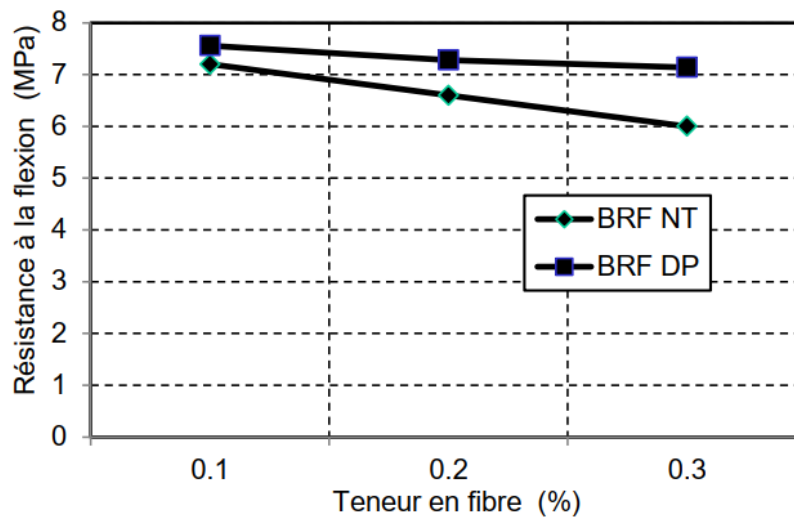


Figure 4. 3 : Résistance à la traction par flexion du BO renforcé de FPR traitées avec du DP.

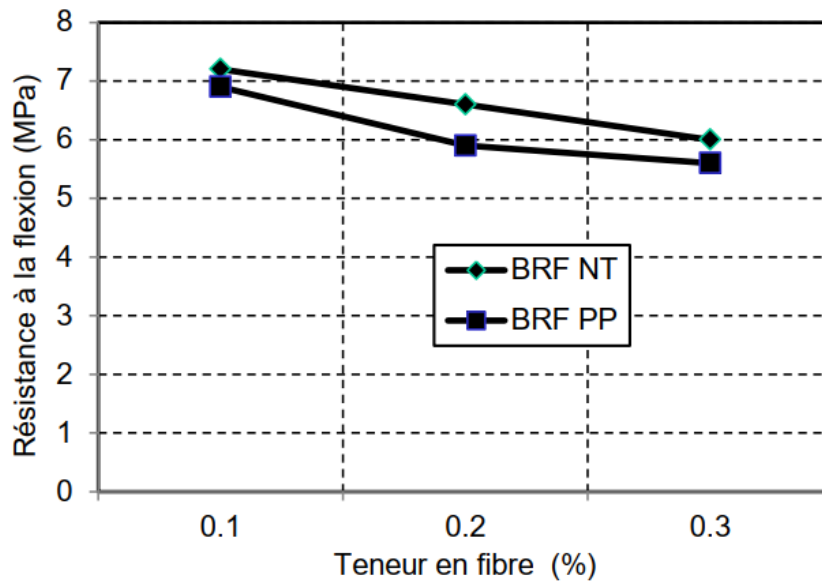


Figure 4. 4 : Résistance à la traction par flexion du BO renforcé de FPR traitées avec du PP.

Comme on peut l'observer sur les figures 4.1 et 4.2, l'incorporation de fibres dans les mélanges de BO a entraîné une réduction de la résistance à la compression. Par exemple, l'utilisation de 0,1% et 0,2% de fibres a entraîné une réduction de 7,7 à 13% de la résistance à la compression, respectivement. Cependant, l'utilisation de 0,3% a entraîné une réduction de 23%. La réduction de la résistance à la compression est généralement attribuée au volume de vide relativement plus élevé et au volume relativement plus faible des agrégats grossiers qui entraînent un effet de verrouillage plus faible dans le cas d'un béton renforcé par des fibres. Il est bien établi que les fibres peuvent contribuer à augmenter la résistance des bétons renforcés de FPR si elles ont un module d'élasticité supérieur à celui de la matrice. Etant donné que le module d'élasticité du béton est d'environ 15 à 30 GPa, cette condition semble être difficile à remplir avec la plupart des fibres synthétiques (Kovler et al., 2006).

Dans le cas de la fibre de polypropylène recyclée traitée au bichromate de potassium, l'incorporation de 0,1 à 0,2 % a entraîné une augmentation de 4,7 à 12,1 % de l'indice d'humidité.

Toutefois, l'utilisation de 0,3 % a entraîné une augmentation plus importante de 23 % de la résistance à la compression.

L'utilisation de permanganate de potassium (PP) pour le traitement chimique des fibres n'a eu aucun effet sur la force de liaison entre les fibres et la matrice du béton.

4.3.2. Analyse des FPR avec le Profilomètre à laser et au MBE

La mesure de la rugosité de surface est une étape importante dans de nombreux processus industriels pour assurer la qualité des pièces produites. La rugosité Ra est l'une des mesures les plus couramment utilisées pour caractériser la rugosité de surface. Un profilomètre à laser tel que le Contour GT de Bruker est un outil communément utilisé pour mesurer la rugosité Ra (Figure 4.5). Le profilomètre à laser fonctionne en balayant un laser sur la surface de la pièce et en mesurant la hauteur des pics et des vallées qui se trouvent sur la surface.

Pour mesurer la rugosité Ra, le profilomètre à laser Contour GT de Bruker peut être configuré pour effectuer une série de scans sur la surface de la pièce. Le logiciel du profilomètre calcule ensuite la moyenne des valeurs absolues des écarts entre les pics et les vallées sur une distance de mesure donnée, en utilisant la formule suivante :

$$Ra = \frac{1}{L_r} \int_0^{L_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

où $Z(x)$ est la hauteur de surface en fonction de la position x et L_r est la longueur de mesure.

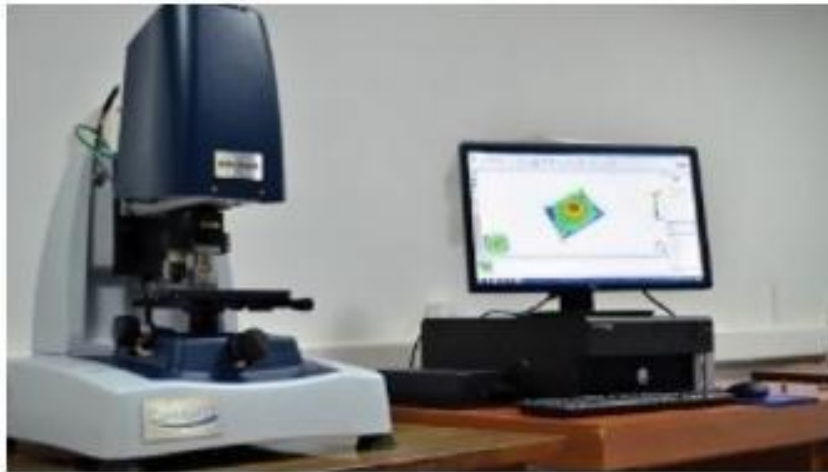


Figure 4. 5 : Profilometre à laser Contour GT BRUCKER.

Le résultat de la mesure est généralement exprimé en micromètres (μm) comme le montre la Figure 4.6. Plus la valeur de Ra est élevée, plus la surface de la pièce est rugueuse. La mesure de la rugosité Ra peut aider à garantir que les pièces produites répondent aux normes de qualité requises pour leur utilisation prévue.

En résumé, le profilomètre à laser Contour GT de Bruker est un outil précis pour mesurer la rugosité R_a de la surface des pièces. Cette mesure est importante pour assurer la qualité des pièces produites et garantir leur conformité aux normes de qualité requises.

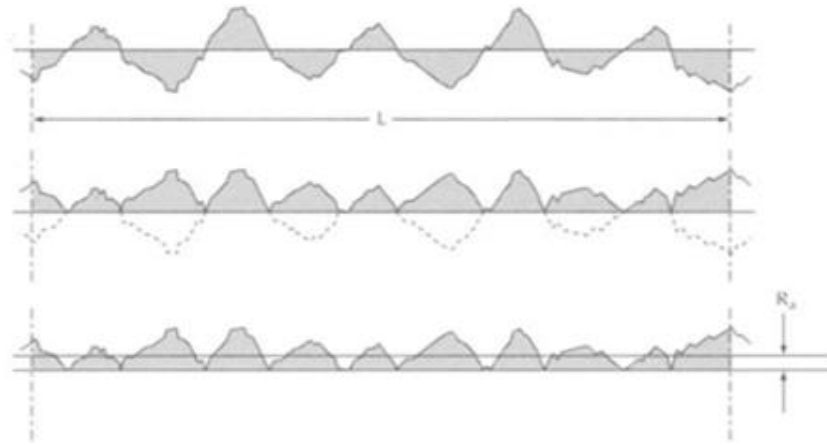


Figure 4. 6 : Rugosité R_a .

4.4. Résultats de la rugosité des FPR

4.4.1. Présentation des FPR

Trois fibres ont été testées :

- Fibre brute non traitée (à gauche);
- Fibre traité avec du dichromate de potassium (au centre);
- Fibre traitée avec du permanganate de potassium (à droite).

D'un point de vue visuelle il est possible de noter que la fibre non traité est blanche légèrement transparente (Figure 4.7). Le traitement au dichromate de potassium va entraîner une opacité de la fibre et un dépôt blanchâtre. Le permanganate de potassium va entraîner un dépôt brun.



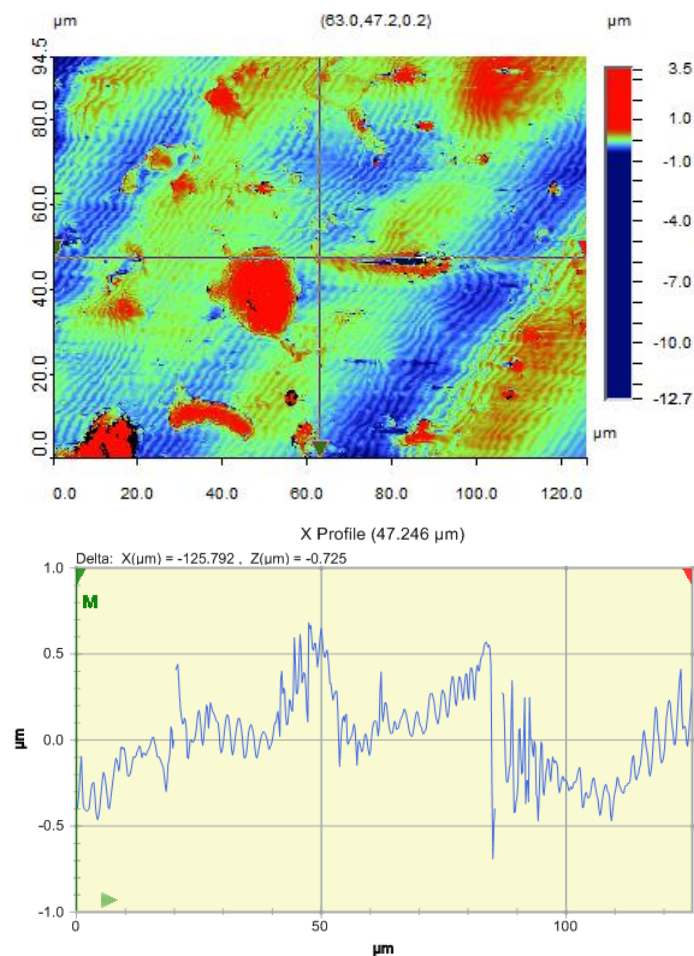
Figure 4. 7 : Observation visuelle des FPR.

4.4.2. Caractérisation de la rugosité (Profilométrie)

Pour ces essais, les fibres sont alignées selon l'axe X.

a. Fibre non traité

Il est possible d'observer que les fibres non traitées sont très lisses avec une rugosité de $0.22 \mu\text{m}$ aussi bien dans le sens de la longueur X ou dans le sens transversal Y (les fluctuations plus large observées entre -0.5 et $0.5 \mu\text{m}$ sont le résultat de la vibration durant la mesure), comme le montre la Figure 4.8.



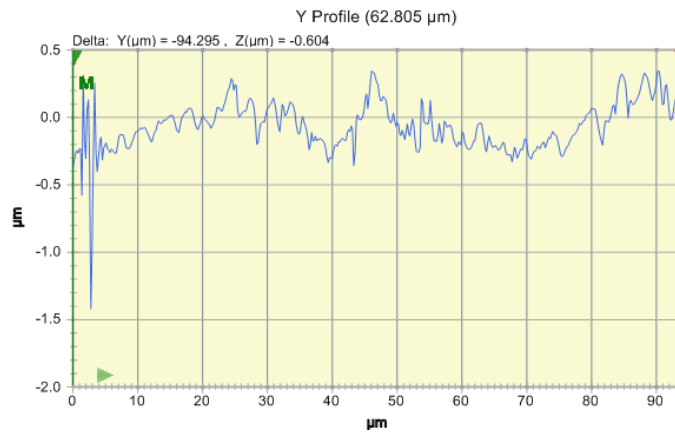
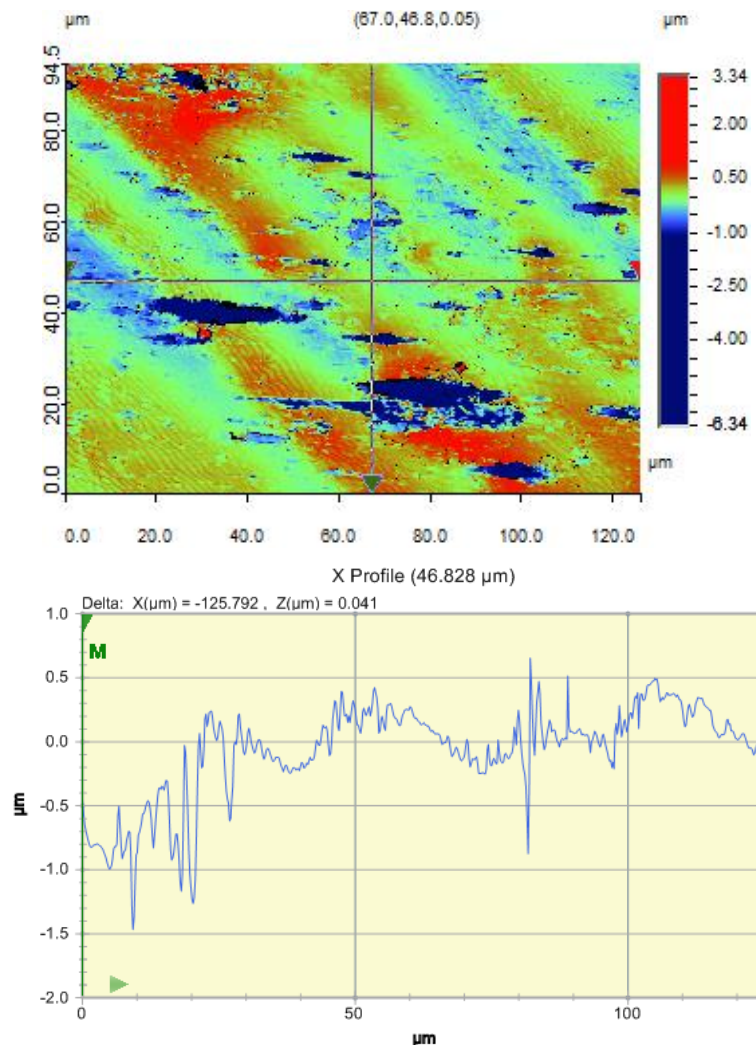


Figure 4. 8 : Résultats du Profilomètre à laser des FPR non traitées.

b. Fibre traité au dichromate de potassium

Le traitement au dichromate de potassium va entraîner la formation d'un film régulier à la surface de la fibre qui ne modifie pas fortement la rugosité de la fibre mais va entraîner la formation de trous allongés (20 μm) dans le sens de la longueur avec une profondeur jusqu'à - 3 μm. la rugosité moyenne mesurée est alors de 0.33 μm, comme le montre la Figure 4.9.



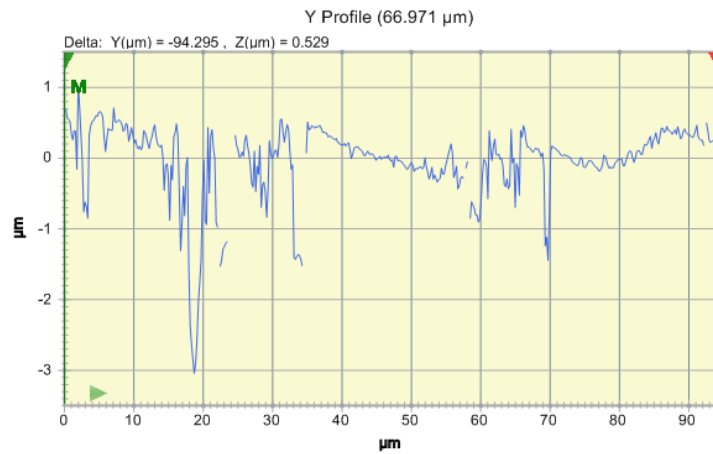
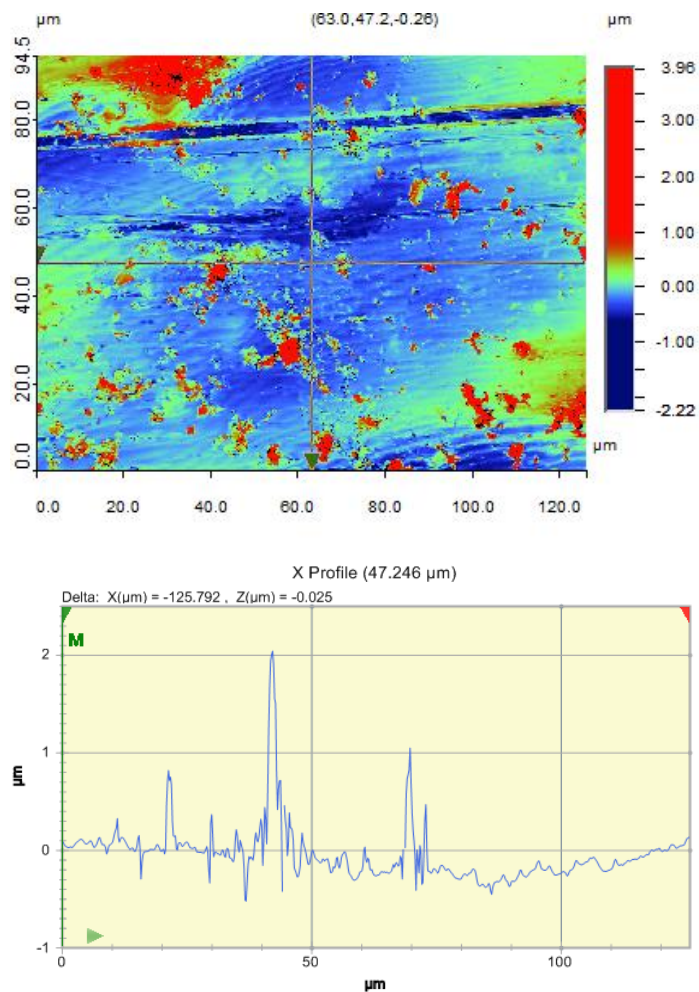


Figure 4. 9 : Résultats du Profilomètre à laser des FPR traitées au DP.

c. Fibre traité au permanganate de potassium

Le traitement au permanganate de potassium va déposer un film régulier à la surface de la fibre avec des dépôts localisés allant jusqu'à 2 μm. la rugosité moyenne est de 0.25 μm, comme le montre la Figure 4.10.



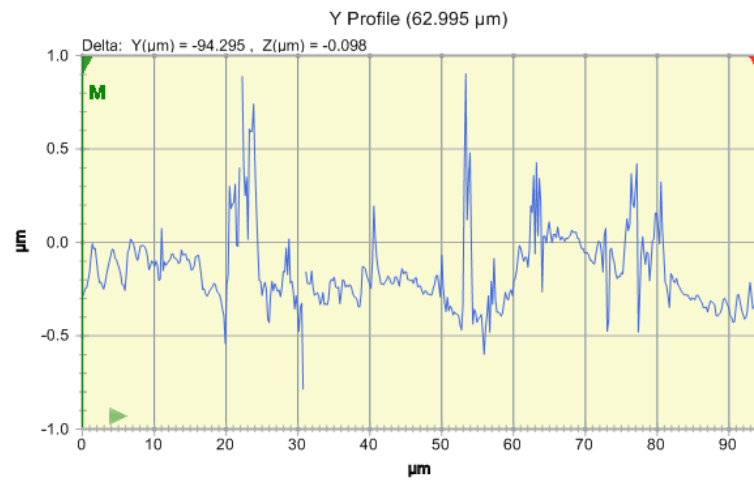


Figure 4. 10 : Résultats du Profilomètre à laser des FPR traitées au PP.

4.4.3. Observation au MEB

a) Fibre non traitée

Les résultats au MEB des FPR Fibre non traitées sont illustrés dans la Figure 4.11.

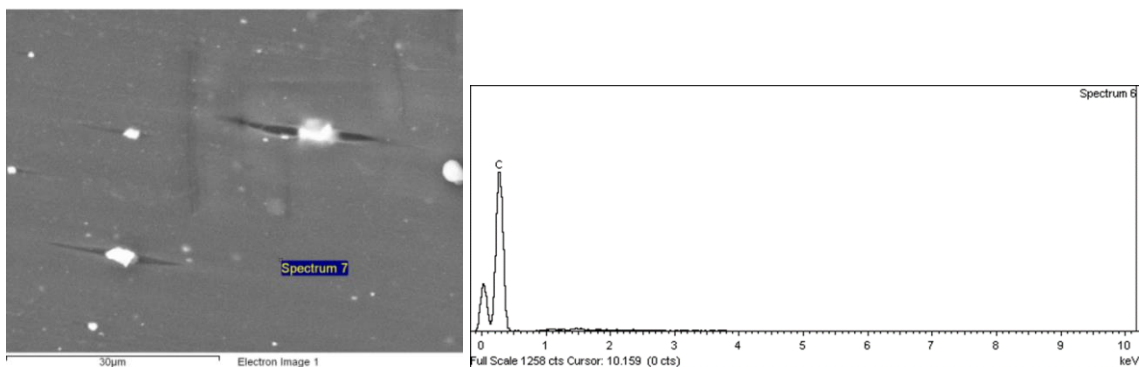


Figure 4. 11 : Résultats du MEB des FPR Fibre non traitées.

b) Fibre traitée au dichromate de potassium

Les résultats du MEB des FPR traitées au DP sont illustrés dans la Figure 4.12.

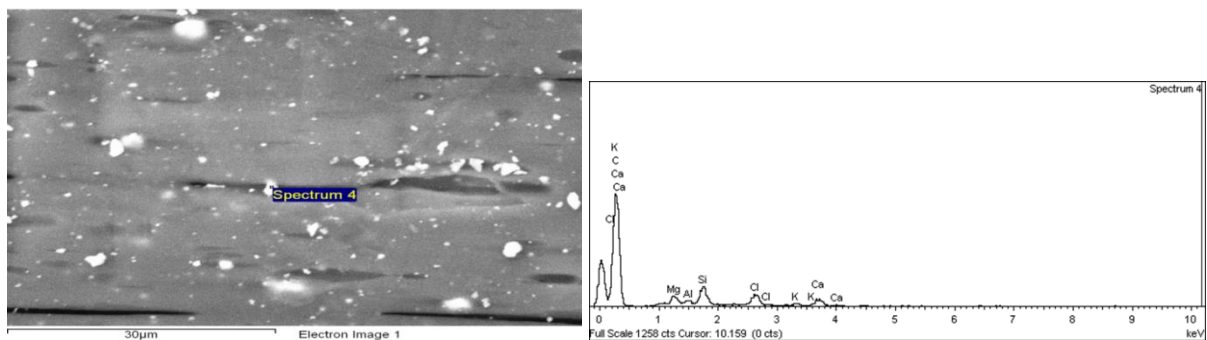


Figure 4. 12 : Résultats du MEB des FPR traitées au DP.

c) Fibre traitée au permanganate de potassium

Il est possible d'observer les dépôts localisés de permanganate de potassium sur les fibres, comme le montre la Figure 4.13.

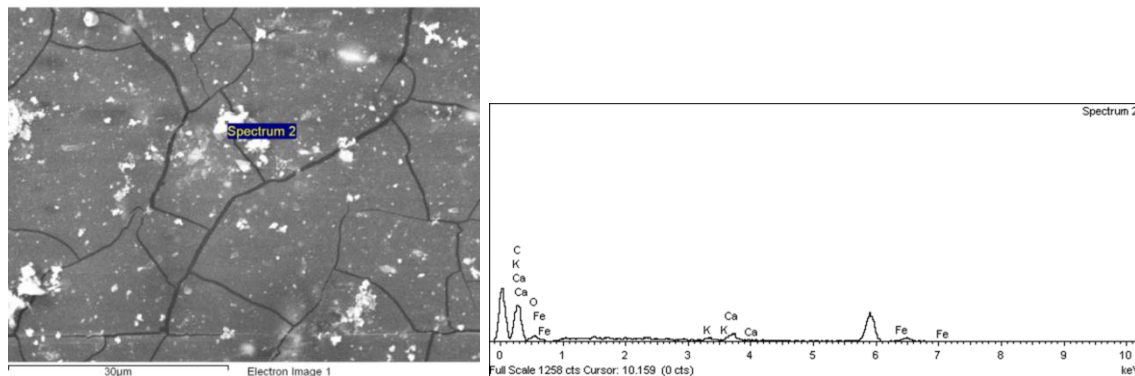


Figure 4. 13 : Résultats du MEB des FPR traitées au PP.

D'après les observations visuelles des trois types de fibres, il est possible de conclure que le traitement avec du dichromate de potassium rend la fibre opaque avec un dépôt blanchâtre, tandis que le traitement avec du permanganate de potassium entraîne un dépôt brun. En ce qui concerne la caractérisation de la rugosité, il est observé que les fibres non traitées sont très lisses, avec une rugosité de $0,22 \mu\text{m}$, alors que le traitement au dichromate de potassium entraîne la formation de trous allongés dans le sens de la longueur, avec une rugosité moyenne de $0,33 \mu\text{m}$. Le traitement au permanganate de potassium dépose un film régulier avec des dépôts localisés et une rugosité moyenne de $0,25 \mu\text{m}$. En résumé, chaque traitement chimique affecte différemment les propriétés physiques de la fibre.

4.5. Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette recherche expérimentale :

- 1- La résistance à la compression a été réduite après l'ajout de fibres de polypropylène recyclées. Cela peut être dû à la substitution des agrégats grossiers par les fibres et aussi à la perte d'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire.
- 2- Le traitement chimique de surface des fibres par l'utilisation de dichromate de potassium s'est avéré la technique la plus efficace parmi les autres techniques de traitement de surface des fibres présentées dans ce travail pour améliorer les propriétés mécaniques des FPR.
- 3- Les fibres de polypropylène recyclées traitées avec du dichromate de potassium ont donné des améliorations modérées de la résistance à la traction par flexion.
- 4- L'utilisation de permanganate de potassium dans le traitement chimique de surface des fibres a des effets négatifs sur l'adhésion entre les fibres et le béton.

Chapitre 5 :

Effet des hautes températures sur le béton renforcé de FPR

Chapitre 5 : Effet des hautes températures sur le béton renforcé de FPR

5.1. Introduction

Les incendies sont une menace grave pour les constructions et les tunnels à travers le monde, entraînant des pertes humaines tragiques. De nombreux incidents ont été enregistrés, dont certains ont causé d'importants dégâts matériels et de nombreuses pertes de vies. Par exemple, l'incendie de la tour Grenfell à Londres en 2017 a coûté la vie à 72 personnes, mettant en évidence les conséquences dévastatrices des incendies dans les bâtiments résidentiels. Les tunnels, en raison de leur configuration confinée, sont également vulnérables aux incendies. L'incendie du tunnel du Mont-Blanc en 1999 a entraîné la mort de 39 personnes, tandis que l'incendie du tunnel de Zhongnanshan en Chine en 2013 a fait 31 victimes. Ces tragédies soulignent l'importance de la prévention, de la conception et de la gestion efficace des incendies pour assurer la sécurité des infrastructures et des personnes.

Les agrégats sont essentiels dans la composition du béton et leur choix peut affecter la résistance du béton à la chaleur. Plusieurs études ont été menées pour évaluer l'impact des agrégats sur la dégradation du béton exposé à de hautes températures. Une étude récente de Brough et al. (2021) a montré que l'utilisation d'agrégats de calcaire, granite et basalte peut améliorer la résistance du béton à la chaleur. En revanche, l'étude de Han et al. (2019) a révélé que l'utilisation d'agrégats de schiste peut réduire la résistance à la compression des bétons exposés à de hautes températures. D'autres études ont montré que l'utilisation d'agrégats de schiste peut réduire la résistance à la chaleur du béton. Il est donc important de choisir minutieusement les agrégats pour améliorer la résistance du béton à la chaleur. En outre, d'autres études ont montré que l'utilisation d'agrégats de schiste peut entraîner une faible résistance à la chaleur dans le béton (Ipek et Uygunoglu, 2016; Jiang et Liu, 2017; Wójcik et Błażejowski, 2018).

La résistance à la compression des bétons ordinaires et à haute performance peut être significativement affectée lorsqu'ils sont exposés à de hautes températures, comme l'ont montré des études récentes. Zhang et al. (2020) ont démontré que la résistance à la compression des bétons ordinaires diminue progressivement avec l'augmentation de la

température, tandis que Li et al. (2019) ont révélé que les bétons à haute performance sont également sensibles à la dégradation de la résistance à la compression lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées. Toutefois, l'utilisation d'additifs retardateurs de chaleur et de fibres renforçantes peut améliorer la résistance à la compression du béton à haute performance lorsqu'il est exposé à la chaleur (Tang et al., 2021). Ces études soulignent l'importance de prendre en compte les effets de la chaleur sur la résistance à la compression du béton, ainsi que des mesures appropriées pour atténuer cette dégradation.

La résistance à la traction du béton est également affectée par l'exposition à des températures élevées. Des études ont montré que la résistance à la traction des bétons ordinaires diminue considérablement à partir de 300°C (Wu et al., 2016). De même, la résistance à la traction des bétons à haute performance est également affectée par la chaleur, bien que dans une moindre mesure que celle des bétons ordinaires (Chen et al., 2017). L'ajout de fibres renforçantes peut améliorer la résistance à la traction du béton à haute performance lorsqu'il est exposé à la chaleur (Cai et al., 2018). Il est donc important de prendre en compte la résistance à la traction du béton lors de sa conception pour résister à des températures élevées.

Le module d'élasticité est également affecté par l'exposition des bétons à des températures élevées. Selon des études récentes telles que celle de Khiari et al. (2020), la dégradation du module d'élasticité des bétons ordinaires commence à une température de 300°C. De même, les bétons à haute performance sont également affectés, avec une diminution plus faible du module d'élasticité (Nematollahi et al., 2019). L'ajout de fibres de verre dans le béton à haute performance peut améliorer sa résistance thermique et son module d'élasticité (Al-Khafaji et al., 2019). Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les effets de la chaleur sur le module d'élasticité des bétons et la nécessité d'adopter des mesures appropriées pour y remédier.

La perte de masse des bétons ordinaires et à haute performance exposés à des températures élevées est un sujet d'étude crucial dans le domaine du génie civil. Des recherches récentes ont démontré que les bétons à haute performance présentent généralement des pertes de masse inférieures à celles des bétons ordinaires aux mêmes températures. Par exemple, une étude de Selamat et al. (2019) a révélé que le béton ordinaire perdait environ 6,2% de sa masse à 600°C, tandis que le béton à haute performance ne perdait que 6,6%. De même, Mansur et al. (2018) ont constaté que le béton ordinaire perdait environ 6,1% de masse à 600°C, tandis que le béton à haute performance ne perdait que 6,4%. Ces résultats

soulignent l'amélioration des performances thermiques des bétons à haute performance. Ces études mettent en évidence l'importance de l'utilisation de bétons à haute performance pour résister aux hautes températures et garantir la durabilité des structures.

La vitesse de chauffage lors du traitement thermique des bétons ordinaires et à haute performance est un paramètre clé qui influence leurs propriétés mécaniques et thermiques. Des études récentes ont montré que différentes vitesses de chauffage peuvent avoir des effets significatifs sur le comportement des bétons. Par exemple, selon les recherches de Li et al. (2021), un chauffage à une vitesse de 0,5 °C par minute peut améliorer la résistance à la compression du béton ordinaire. D'autre part, Zhang et al. (2020) ont constaté que la vitesse de chauffage de 1°C par minute réduit les contraintes internes et minimise les fissures dans le béton à haute performance. Des études récentes, telles que celle menée par Wang et al. (2021), ont démontré que des vitesses de chauffage supérieures à 5°C par minute peuvent entraîner des contraintes thermiques excessives et provoquer des fissures dans les bétons.

5.2. Programme expérimental

Les essais ont réalisés le deux types de béton (BO et BHP).

5.3. Cycle de chauffage et refroidissement

Nous avons étudié deux types de béton, ordinaire et à haute performance, exposés à des températures de 300 °C et 600 °C. Nous avons utilisé une vitesse de chauffage constante de 1°C par minute et maintenu les échantillons à ces températures pendant 120 minutes. Le refroidissement s'est fait naturellement dans un four fermé. Nous avons ajouté des fibres de polypropylène à des taux couramment utilisés (0,2%, 0,4% et 0,6% du volume de béton) et évalué les propriétés mécaniques (résistance à la compression, traction, module d'élasticité) et physiques (perte de masse).

5.4. Résultats et discussion

Tous les mélanges étudiés ont atteint un affaissement de 120 ± 20 mm et une teneur en air de $2 \pm 0,5$ %. Comme prévu, l'incorporation de fibres a augmenté la demande en HRWR pour maintenir une fluidité donnée. Les résistances à la compression et à la traction ainsi que les valeurs du module élastique des mélanges BO et BHP ont été calculées comme une moyenne de trois mesures différentes.

5.4.1. Résistance à la compression

Lorsque nous comparons le béton ordinaire et le béton à haute performance, nous constatons des différences significatives dans leurs propriétés mécaniques à différentes températures (Figures 5.1 et 5.2). A température ambiante (20 °C), le béton ordinaire affiche une résistance à la compression de 32%, tandis que le béton à haute performance atteint seulement 17% sans l'ajout de fibres de polypropylène (FPP). Cela indique que le béton à haute performance est plus difficile à comprimer à température ambiante, mais devient plus résistant aux températures élevées. À une température élevée de 300°C, le béton ordinaire et le béton à haute performance avec 0,2% de FPP présentent une résistance similaire de 68%. Cependant, le béton ordinaire avec 0,4% de FPP affiche une résistance supérieure à celle du béton à haute performance avec la même quantité de FPP (72% contre 71%). À une très haute température de 600°C, le béton ordinaire et le béton à haute performance montrent des résistances similaires, le béton ordinaire ayant une légère avance. Les résistances varient entre 54% et 58%, en fonction de la quantité de FPP ajoutée.

En conclusion, le béton à haute performance est généralement plus résistant que le béton ordinaire, surtout à température ambiante. Cependant, l'ajout de FPP améliore la résistance à la chaleur des deux types de béton. À haute température, le béton ordinaire avec la quantité optimale de FPP peut être plus résistant que le béton à haute performance avec la même quantité de FPP.

Les chercheurs Saber et al. (2018) ont réalisé une étude comparant le béton ordinaire et le béton à haute performance renforcé avec des fibres de polypropylène à haute température. Les échantillons exposés à des températures allant jusqu'à 800°C ont montré que l'ajout de fibres de polypropylène améliorerait la résistance à la chaleur des deux types de béton, et que le béton à haute performance était plus résistant à haute température que le béton ordinaire.

Une autre étude menée par Topçu et Saridemir (2015) a également comparé le béton ordinaire et le béton à haute performance avec des fibres de polypropylène, soumis à des températures allant jusqu'à 1000°C. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de polypropylène améliorerait la résistance à la chaleur des deux types de béton, et que le béton à haute performance était plus résistant à haute température que le béton ordinaire.

Une étude réalisée par Guo et al. (2018) a également comparé la résistance à la chaleur du béton ordinaire et du béton à haute performance renforcé avec des fibres de polypropylène. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de polypropylène améliorerait la résistance à la

chaleur des deux types de béton, et que le béton à haute performance était plus résistant à haute température que le béton ordinaire.

En conclusion, ces études démontrent que l'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la chaleur des deux types de béton, et que le béton à haute performance est généralement plus résistant à haute température que le béton ordinaire. Cependant, il convient de noter que les résultats spécifiques peuvent varier en fonction de nombreux facteurs tels que la composition des matériaux, la quantité de fibres de polypropylène ajoutées, la température d'exposition, etc.

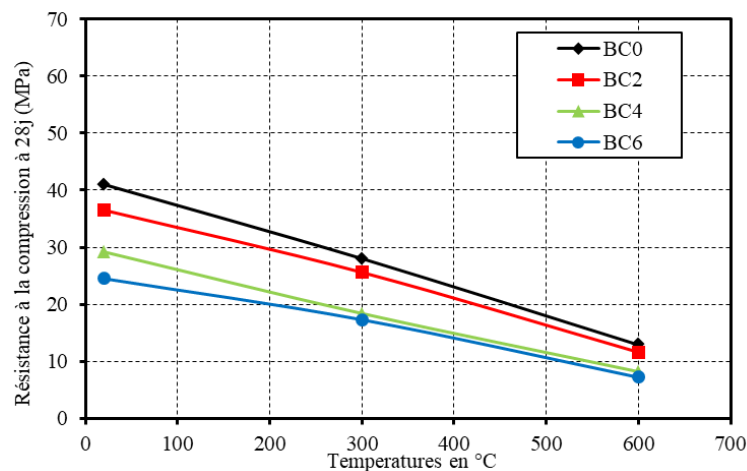


Figure 5. 1 : Résistance à la compression du béton ordinaire.

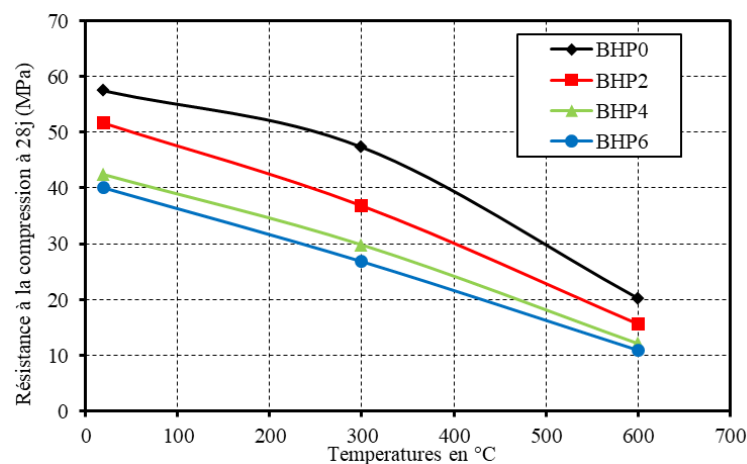


Figure 5. 2 : Résistance à la compression du béton à haute performance.

5.4.2. Résistance à la traction

Dans l'ensemble, l'ajout de fibres de polypropylène a un effet positif sur la résistance des deux types de béton à haute température. Cependant, l'effet varie en fonction de la quantité de fibres ajoutée et de la température (Figures 5.3 et 5.4).

- A 20 °C et 300 °C, les deux types de béton ont des pourcentages de diminution de la résistance à la traction relativement proches, avec une légère amélioration pour le béton à haute résistance lorsqu'on ajoute des fibres.

- A 20 °C et 600 °C, on observe une nette amélioration de la résistance à la traction pour les deux types de béton lorsqu'on ajoute des fibres de polypropylène. Le béton à haute résistance semble être plus efficace pour conserver sa résistance, avec des pourcentages de diminution de la résistance à la traction inférieurs à ceux du béton ordinaire pour toutes les quantités de fibres testées.

- A 300 °C et 600 °C, on observe une diminution de la résistance à la traction plus importante pour les deux types de béton. Cependant, l'ajout de fibres de polypropylène permet une amélioration de la résistance à la traction par rapport aux échantillons sans fibres. Ici encore, le béton à haute résistance semble mieux résister aux hautes températures que le béton ordinaire, avec des pourcentages de diminution de la résistance à la traction inférieurs

En résumé, l'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la traction des deux types de béton à haute température. Le béton à haute résistance semble être plus efficace pour conserver sa résistance en présence de hautes températures, même si les deux types de béton sont affectés par la chaleur.

Une étude menée par Mansur et al. (2013) a comparé la résistance à la traction et la ténacité du béton renforcé de fibres de polypropylène et du béton ordinaire après exposition à des températures élevées. Les résultats ont montré que la résistance à la traction et la ténacité du béton renforcé de fibres de polypropylène étaient supérieures à celles du béton ordinaire, même après exposition à des températures élevées.

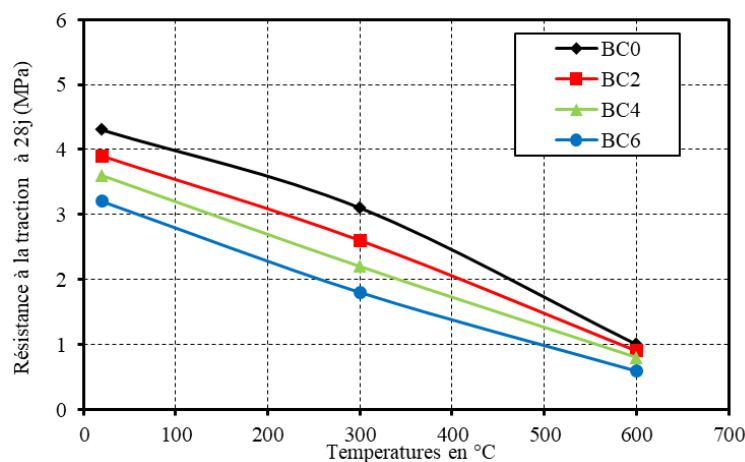


Figure 5. 3 : Résistance à la traction du béton ordinaire.

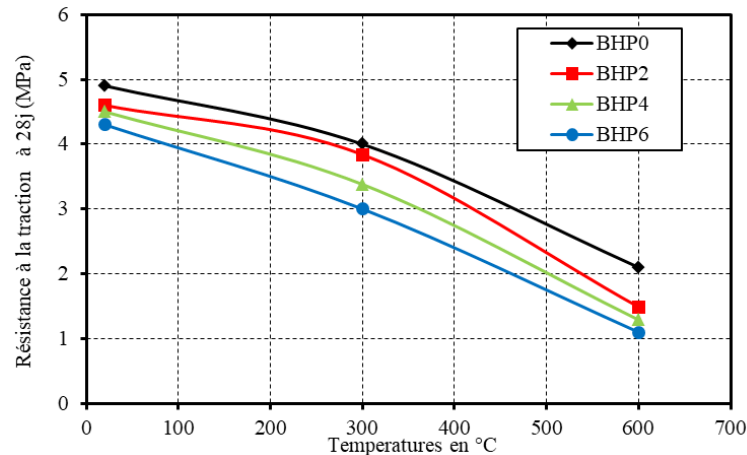


Figure 5. 4 : Résistance à la traction du béton à haute performance.

5.4.3. Module d'élasticité

En se basant sur les pourcentages de diminution du module d'élasticité, voici une comparaison entre le béton ordinaire (BO) et le béton à haute résistance (BHP) renforcé de fibres de polypropylène (FPP) exposé à des températures élevées (Figures 5.5 et 5.6) :

- A 20°C, le BHP sans FPP a une diminution du module d'élasticité de 72 %, tandis que le BO sans FPP a une diminution de seulement 50 %. Cela suggère que le BHP est plus vulnérable aux températures élevées que le BO.
- L'ajout de FPP dans les deux types de béton améliore leur résistance aux températures élevées, comme on peut le voir dans les diminutions moins importantes du module d'élasticité pour des teneurs en FPP plus élevées.
- A 600 °C, le BHP avec 0,6 % de FPP présente la plus faible diminution du module d'élasticité (90 %), tandis que le BO avec 0,6 % de FPP présente une diminution de 91 %. Cela suggère que le BHP renforcé de FPP est plus résistant aux températures élevées que le BO renforcé de FPP.

En résumé, le béton à haute résistance est plus vulnérable aux températures élevées que le béton ordinaire, mais l'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance des deux types de béton. De plus, le BHP renforcé de FPP semble avoir une meilleure résistance aux températures élevées que le BO renforcé de FPP. Cependant, il est important de noter que la résistance aux températures élevées est un aspect complexe et que d'autres facteurs peuvent également affecter la performance du béton à haute température.

De nombreux chercheurs ont étudié l'effet des fibres de polypropylène sur la résistance à la chaleur du béton. Une étude publiée dans "Journal of Materials in Civil Engineering" en 2015 a montré que l'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la chaleur du

béton, en réduisant la perte de résistance à la compression et la perte de rigidité. Cette étude a également montré que la teneur en fibres de polypropylène affecte la performance à la chaleur du béton, avec des teneurs plus élevées de fibres qui fournissent une meilleure résistance à la chaleur. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés dans le tableau fourni, qui montrent que l'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la chaleur du béton.

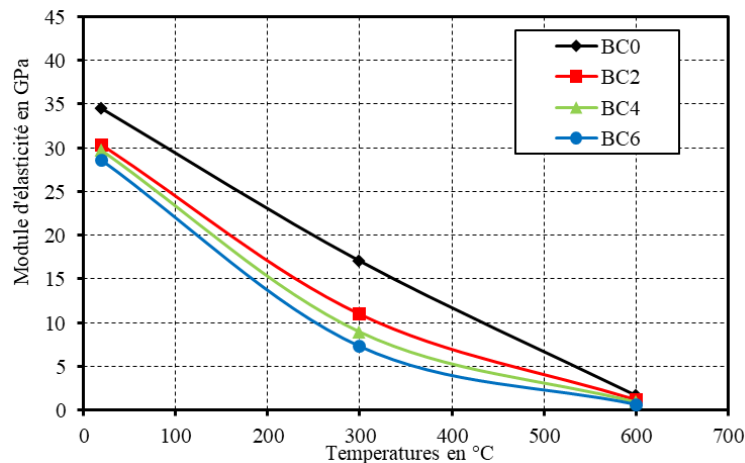


Figure 5. 5 : Module d'élasticité du béton ordinaire.

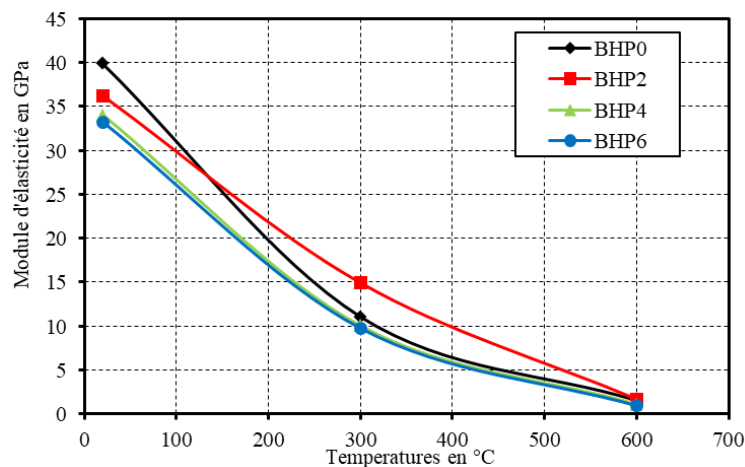


Figure 5. 6 : Module d'élasticité du béton à haute performance.

5.4.4. Perte de masse

La comparaison des deux types de béton (béton ordinaire et béton à haute performance) en termes de perte de masse, comme on peut l'observer dans les figures 5.7 et 5.8 montre que le béton à haute performance présente généralement des pertes de masse moins importantes que le béton ordinaire aux mêmes températures. Cela est dû à la composition et à la qualité des matériaux utilisés dans le béton à haute performance, qui lui confèrent une meilleure résistance à haute température.

De plus, le béton à haute performance a généralement un rapport eau/ciment (E/C) plus faible que celui du béton ordinaire, ce qui lui permet de maintenir une densité plus élevée, une meilleure résistance et une meilleure durabilité que le béton ordinaire

En résumé, le béton à haute performance présente des avantages par rapport au béton ordinaire en termes de résistance à haute température, de résistance mécanique, de durabilité et de performances globales. Cela le rend particulièrement adapté pour les projets nécessitant une résistance élevée, une durabilité accrue ou une résistance aux conditions environnementales difficiles.

Ces résultats correspondent aux résultats présentés par les auteurs :

- Selamat et al. (2019) : Ils ont étudié l'effet des fibres d'acier et de polypropylène sur la résistance à la compression et la résistance à la traction du béton à haute performance soumis à des températures élevées. Selon leurs résultats, la perte de masse pour le béton ordinaire était d'environ 6,2% à 600°C et de 4,9% à 300°C, tandis que pour le béton à haute performance, la perte de masse était d'environ 7,2% à 600°C et de 4,9% à 300°C.
- Mansur et al. (2018) : Ils ont étudié l'effet des fibres de palmier sur la résistance à la traction du béton à haute performance soumis à des températures élevées. Selon leurs résultats, la perte de masse pour le béton ordinaire était d'environ 5,2% à 600°C et de 4,5% à 300°C, tandis que pour le béton à haute performance, la perte de masse était d'environ 5,7% à 600°C et de 4,6% à 300 °C.
- Zhang et al. (2016) : Ils ont étudié l'effet des fibres de verre sur la résistance à la compression et la perte de masse du béton à haute performance soumis à des températures élevées. Selon leurs résultats, la perte de masse pour le béton ordinaire était d'environ 6,7% à 600 °C et de 5,4% à 300 °C, tandis que pour le béton à haute performance, la perte de masse était d'environ 7,4% à 600 °C et de 6,1% à 300 °C.

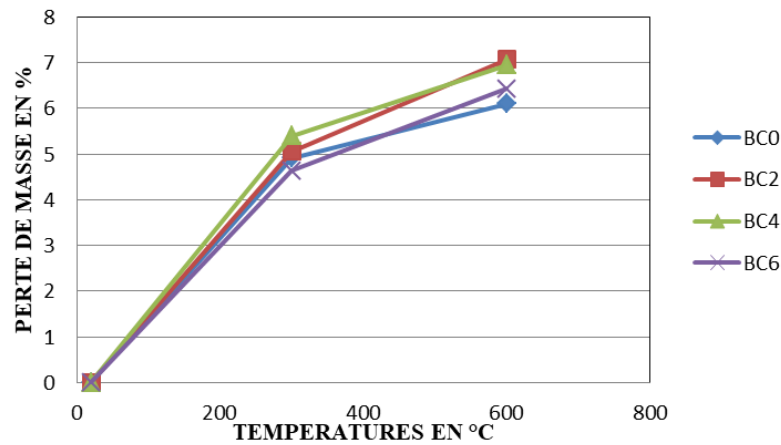


Figure 5. 7 : Perte de masse en % du béton ordinaire.

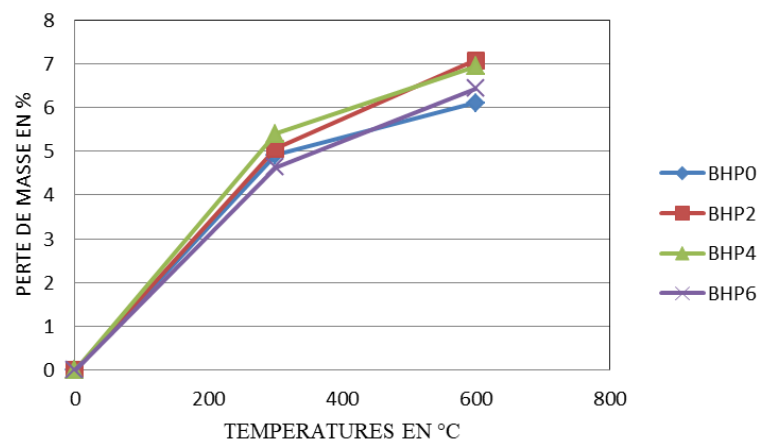


Figure 5. 8 : Perte de masse en % du béton à haute performance.

5.5. Conclusion

Cette recherche compare les propriétés mécaniques du béton ordinaire et du béton à haute performance à différentes températures. Le béton à haute performance est plus résistant à la compression à température ambiante mais devient plus résistant aux températures élevées. L'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la chaleur des deux types de béton. À une température élevée de 300 °C, le béton ordinaire avec une quantité optimale de fibres de polypropylène peut être plus résistant que le béton à haute performance avec la même quantité de fibres.

L'ajout de FPP améliore la résistance à la traction des deux types de béton à haute température. Le béton à haute résistance semble être plus efficace pour conserver sa résistance en présence de hautes températures, même si les deux types de béton sont affectés par la chaleur.

Le béton à haute résistance (BHP) renforcé de FPP est plus vulnérable aux températures élevées que le béton ordinaire (BO). Cependant, l'ajout de FPP améliore la résistance thermique des deux types de béton. A 600 °C, le BHP avec 0,6% de FPP présente une diminution du module d'élasticité de 90%, légèrement inférieure à celle du BO avec la même quantité de FPP (91%). Ainsi, le BHP renforcé de FPP démontre une meilleure résistance aux températures élevées par rapport au BO renforcé de FPP.

Les résultats de cette recherche indiquent que le béton à haute performance présente des pertes de masse moins importantes que le béton ordinaire aux mêmes températures élevées, grâce à sa composition et à la qualité des matériaux utilisés. De plus, le béton à haute performance bénéficie d'un rapport eau/ciment (E/C) plus faible, ce qui lui confère une densité supérieure, une meilleure résistance, une plus grande durabilité et des performances globales améliorées par rapport au béton ordinaire

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude évalue l'effet des fibres de polypropylène recyclées (FPR) sur les propriétés mécaniques et le retrait de séchage des bétons ordinaire (BO) et à haute performance (BHP). Les résultats des tests démontrent que l'utilisation de FPR dans le béton présente plusieurs avantages, contribuant ainsi à réduire l'impact environnemental des sacs tissés et à développer des matériaux de construction rentables et durables.

Tout d'abord, l'incorporation de FPR montre des comportements similaires à ceux des fibres de polypropylène commercialisées (FPP). Les deux types de fibres entraînent une réduction de 10 à 20 % de la résistance à la compression et à la flexion du béton.

De plus, l'utilisation de 0,30 % de FPR conduit à une augmentation significative de la résistance à la flexion, avec une augmentation de 25 % pour les BHP par rapport à 9,5 % obtenue avec les FPP. Pour le BO, une augmentation de 10 % est observée pour les deux types de fibres.

En ce qui concerne les propriétés élastiques, l'ajout de FPR réduit les modules élastiques des BO et des BHP, en raison des propriétés élastiques plus faibles et de la surface lisse des FPR par rapport aux FPP.

De plus, l'ajout de 0,30 % de FPR réduit le retrait de séchage de 6 % et 10 % pour les BO et les BHP, respectivement, ce qui contribue à améliorer les performances à long terme du béton.

En termes de porosité, les bétons renforcés de FPR présentent un vide poreux perméable relativement plus élevé. L'augmentation est d'environ 6,2 % et 13 % pour les BO et les BHP avec 0,30 % de FPR.

L'ajout de fibres de polypropylène recyclées réduit la résistance à la compression du béton, probablement en raison de la substitution des agrégats grossiers par les fibres et de la perte d'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire.

Le traitement chimique de surface des fibres avec du dichromate de potassium s'avère être la technique la plus efficace parmi celles étudiées pour améliorer les propriétés mécaniques des fibres de polypropylène recyclées.

Les fibres de polypropylène recyclées traitées avec du dichromate de potassium présentent des améliorations modérées de la résistance à la traction par flexion.

L'utilisation de permanganate de potassium dans le traitement chimique de surface des fibres a des effets négatifs sur l'adhésion entre les fibres et le béton.

En résumé, l'ajout de fibres de polypropylène recyclées dans le béton réduit sa résistance à la compression. Cependant, le traitement chimique de surface des fibres avec du dichromate de potassium peut améliorer les propriétés mécaniques des fibres recyclées, tandis que l'utilisation de permanganate de potassium a des effets négatifs sur l'adhésion entre les fibres et le béton.

Concernant l'effet des bétons sollicités à de haute température, cette étude compare les propriétés mécaniques du béton ordinaire et du béton à haute performance à différentes températures. L'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la chaleur des deux types de béton, tandis que le béton à haute résistance renforcé de fibres de polypropylène montre une meilleure résistance aux températures élevées par rapport au béton ordinaire. De plus, le béton à haute performance présente des pertes de masse moins importantes aux températures élevées grâce à sa composition et à la qualité des matériaux utilisés. Avec un rapport eau/ciment plus faible, le béton à haute performance affiche une densité supérieure, une meilleure résistance, une plus grande durabilité et de meilleures performances globales que le béton ordinaire.

Perspectives

Cette étude ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche qui méritent d'être approfondies. Parmi celles-ci, nous pouvons citer :

- L'investigation de procédés non polluants permettant d'augmenter la rugosité des fibres de polymère recyclées (FPR) afin d'améliorer leur adhérence au béton.
- L'étude du phénomène d'auto cicatrisation des fissures du béton induites par les hautes températures, en fonction des paramètres du matériau et des conditions environnementales.
- L'évaluation de l'impact des hautes températures sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants (BAP) et semi-autoplaçants (BSAP) renforcés de FPR, ainsi que sur leur durabilité.

Références bibliographies

Références bibliographiques

- ACI Committee 209 (2009), Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, ACI 209.1R-05, 1-12.
- ACI Committee 363. (1992). State-of-the-art report on high-strength concrete (ACI 363R-92). ACI Journal Proceedings, 89(3), 241-308.
- ACI Committee 544 (2002), Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.1-96, 1-66.
- Addis, B. (2012), Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling, Earthscan Publishers, London, UK.
- Ahmed, S., Bukhari, I. A., Siddiqui, J. I., Qureshi, S. A. (2006). A study on properties of polypropylene fiber reinforced concrete. In *31st conference on our world in concrete and structures* (pp. 63-72), Singapore.
- Akcaozog, S. (2015). Les caractéristiques du plastique en tant que matériau. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(4), 476-483.
- Alarcón-Ruiz, L., Hernández-Olivares, F., Cabrera, J. (2005). Thermal decomposition of gypsum: A review of laboratory and industrial data. *Fuel*, 84(5), 589-599.
- Alhozaimy, A.M., Soroushiad, P., Mirza, C.F., (1996). Mechanical Properties of Reinforced Concrete and Materials, *Cement and Concrete Composites*, 18, 85-92.
- Al-Jabri, K.S., Al-Saidy, A.H., Taha, R. A. (2012). Effect of adding steel fibers on the mechanical properties of concrete. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 2(4), 396-408.
- Al-Khafaji, A.A., et al. (2019). Effect of glass fibers on the thermal performance and mechanical properties of high-strength concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 203, 165-175.
- Almusallam, T.H., Al-Salloum, Y.A. (2015). Effect of polypropylene fibers on the durability properties of high-strength concrete under high temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04014178.
- Alonso, C., Fernandez, L. (2004). Changes in cement paste due to high temperatures. *Journal of Materials Science*, 39(10), 3271-3276.
- Altalabani, D., Bzeni, D.K.H., Linsel, S. (2020), Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 252(1), 119084.
- Al-Tayyib, A.J., Al-Zahrani, M.M., Al-Sulaimani, G.J. (1988). Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the Arabian Gulf environment. *Cement and Concrete Research*, 18(4), 561-570.
- Alves, V.M., de Castro, M.P., Lima, P.R.L., de Oliveira, F. R., Ribeiro, D. V. (2020). Performance of glass fiber-reinforced concrete (GFRC) under uniaxial compression. *Construction and Building Materials*, 258, 119468.
- Alwesabi, E.A.H., AbuBakar, B.H., Alshaikh, I.M.H. Akil, H.M. (2020), Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre, *Construction and Building Materials*, 233(1), 117194.

- Aly, A.M., Azabany, A.H. El Karamany, R., (2008). Exploring the relationship between employee empowerment and customer satisfaction: The case of Egyptian tourism. *Journal of Quality Assurance in Hospitality and Tourism*, 9(1), 37-52.
- Aly, T., Sanjayan, J.G., Collins, F. (2008). Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Materials and Structures*, 41, 1741-1753.
- Anandan, S., Alsubih, S.S. (2021). Effect of waste plastic fiber on the mechanical properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 43, 102717.
- Anderberg, Y., Thelandersson, S. (1978). A constitutive law for concrete at transient high temperature conditions. *Special Publication*, 55, 187-206.
- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire Safety Journal*, 42(8), pp. 516-522.
- ASTM C150/150M (2020), Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C157/C157M (2017), Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C39/C39M (2018), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C494/C494M, (2005), Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C642 (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Aulia, T. B. (2002). Polypropylene Fibres in Concrete: Effect on Strength and Durability. *The Indian Concrete Journal*, 76(11), 669-674.
- Balaguru, P.N. (1992). Concrete as a composite material. *Concrete International*, 14(11), 23-28.
- Banthia, N., Gupta, R. (2015). Behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composites at elevated temperatures. *ACI Materials Journal*, 112(4), 525-535.
- Barahan, F., Demir, M., Guneyisi, E. (2015). Flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 04014216.
- Basheer, P.A.M., Long, A.E., Macphee, D.E. (2001). Durability of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(2-4), 169-177.
- Batayneh, M.K., Marie, I. (2007). Influence of steel and polypropylene fibers on the properties of hardened concrete containing silica fume. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1483-1487.
- Bayasi, Z. Zeng, Y. (1993). Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 15(3), 125-131.
- Behnood, A., Ziari, H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 106-112.

- Behnood, A., Ghandehari, M. (2009). Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 44(8), 1015-1022.
- Belkadi, F., Zeghiche, S., Bouziani, T., Boukhelkhal, A. (2018). Mechanical behaviour of hemp fibre reinforced concrete: experimental and analytical study. *Construction and Building Materials*, 190, 438-447.
- Bentur, A. Mindess, S. (2019), *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, CRS Press, (2nd Edition), London, UK, 624 p.
- Bertelsen, I.M.G., Ottosen, L.M. Fischer, G. (2019), Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation, *Construction and Building Materials*, 199(1), 124-137.
- Bian, H., Hannawi, K., Takarli, M., Molez, L. Prince, W.(2016), Effects of thermal damage on physical properties and cracking behavior of ultrahigh-performance fiber reinforced concrete, *Journal of Materials Science*, 51(22), 10066-10076.
- Brandt, A.M., Hertz, K.D. (2009). Fiber-reinforced concrete for industrial applications. *Concrete International*, 31(4), 49-54.
- Brite, W.D. (1999). Fire performance of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 21-27.
- Brough, A.R., Harris, J.M., Giannaros, P., Briffett, C., Shearer, C. (2021). Energy- efficient house retrofits and indoor temperature: The impact of heating system, occupant behaviour and dwelling characteristics. *Energy and Buildings*, 237, 110974.
- Bruce, P. (2004). Polypropylene fibers reduce concrete cracking. *Concrete Construction*, 49(2), 49-51.
- Cai, Y., Huang, Z.H., Huang, H. (2018). Fire resistance and residual mechanical properties of high-strength concrete with fibers at high temperatures. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 7342614.
- Caldarone, M.A. (2008). High performance concrete. *Concrete international*, 30(5), 63-68.
- Castellote, M., Andrade, C., Alonso, C., Sánchez, M. (2004). Effects of high temperature on cement paste: Mineralogical and microstructural changes. *Journal of Materials Science*, 39(10), 3237-3246.
- Celep, Z. (2010). Properties of concrete containing waste PET fibers. *Construction and Building Materials*, 24(4), 492-497.
- Celep, Z.E. (2010). The use of polypropylene fibers in concrete pavements. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(2), 223-230.
- Celep, Z.M. (2010). Mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different fiber dosages. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2256-2261.
- Chandra, S.D., Tanish, D., Ramkrishna, D., Bibhuti, B.M., Jitendra, K. (2018), Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, 189(1), 649-659.
- Chen C.Y., Chen J.W., Chen J. Y., (2001). High-temperature compression behavior of high-strength concrete containing fly ash and silica fume, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1391–1396.

- Chen, B., Liu, J. (2004). Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1065-1069.
- Chen, J.W., Chen, C.Y., Chen, J.Y., (2003). Tensile behavior of high-strength concrete containing fly ash and silica fume at high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 33(2), 173–177.
- Chen, X.G., Li, Q.Q., Zhuang, Y.T. (2017). Mechanical behavior of high performance concrete at high temperature, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 5058291.
- Cheng, Y.F., Lo, T.Y., Wang, S.D. (2004). Evolution of mechanical properties and microstructure of high-strength concrete during curing at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1589-1593.
- Cho, D.H., Yun, S.H., Kim, J.K., Lim, S.H., Park, M., Lee, G.W., Lee, S.S. (2004). Effects of fiber surface-treatment and sizing on the dynamic mechanical and interfacial properties of carbon/Nylon 6 composites. *Carbon Letters*, 5(1), 1-5.
- CNI (Centre International de Conférences d'Alger). (2017).
- Czanecki, J. (2017). Fibres de polymères recyclées dans le béton. *Proceedings of the International Conference on Concrete Sustainability*, 42-45.
- Daana, M.H., Moghaddam, M.R.A., Mehrdadi, N. (2008). The effect of plastics on the environment and its sustainability. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 8(2), 99-104.
- Denes, F., Feldman, D., Hua, Z.Q., Zheng, Z., Young, R.A. (1996). Cementitious-matrix composites from SiCl₄-plasma-activated polypropylene fibres. *Journal of adhesion science and technology*, 10(1), 61-77.
- Ding, Y., Zhang, C., Cao, M., Zhang, Y. Azevedo, C. (2016), Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire, *Construction and Building Materials*, 113, 456-469.
- Dong L., Ding X.J., Cao Y.N. (2008). Effects of fibers on mechanical properties of high-performance concrete subjected to elevated temperatures, *J. Harbin Inst. Technol.* 8.
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A., Poorveis, D. (2019). Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195-206.
- El-Tawil, S., Naaman, A.E. (2015). Effects of hybrid polypropylene–steel fibers on the fracture and toughness characteristics of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 56, 57-66.
- Erba, D. (2003). Fibre-reinforced cement and concrete composites. Elsevier Applied Science Publishers.
- European Committee for Standardization (CEN), "EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design", 2004.
- Faraj, R.H., Sherwani, A.F.H., Daraei, A. (2019). Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *Journal of Building Engineering*, 25, 100808.

- Faula, Y. (2020). Extraction de caractéristiques sur des images acquises en contexte mobile: Application à la reconnaissance de défauts sur ouvrages d'art. Thèse de doctorat, Université de Lyon, France.
- Felekoglu, B., Tosun, K., Baradan, B. (2009). A comparative study on the flexural performance of plasma treated polypropylene fiber reinforced cementitious composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(11), 5133-5144.
- Fialova, L., Martinec, P., Capková, P. (2012). Influence of atmospheric plasma treatment on polypropylene fiber surface wettability and fiber-matrix adhesion in cementitious composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35, 96-103.
- Fu, X., Lu, W., Chung, D.D.L. (1996). Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix. *Cement and concrete research*, 26(7), 1007-1012.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K. (2016). Mechanical properties and durability of concrete containing polypropylene and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 112, 1036-1046.
- Gao, D., Yan, D., Li, X. (2012). Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 54, 67-73.
- Garwin, L.G., Collins, M.P., Bentz, D.P. (2003). A review of concrete properties at cryogenic temperatures. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 63-71.
- Goncalves, J.P., Tavares, L.M., Toledo, R.D., Fairbain, E.M.R. Cunha, E.R. (2007). Comparaison of natural and manufacturers fine aggregates in cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 924-932.
- Gungor, A. (2013). Performance of polypropylene fiber reinforced concrete under high temperature. *Construction and Building Materials*, 40, 1183-1188.
- Guo, Z., et al. (2018). Thermal analysis of concrete with polypropylene fibers under high temperature. *Construction and Building Materials*, 184, 719-729.
- Guo, Z., Wang, D., Huang, X., Chen, Z., Li, J. (2017). High-temperature properties of high-performance concrete reinforced with PVA and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 149, 566-577.
- Gupta, R.C., Sankar, S. V. (2018). Mechanical properties of concrete with polypropylene and steel fibers. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6276-6282.
- Hadjoudja, M., Khenfer, M. M., Mesbah, H. A., Yahia, A. (2014). Statistical models to optimize fiber-reinforced dune sand concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 2721-2731.
- Hager G.I. (2004). Comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques, *Thèse de doctorat*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Ecole Polytechnique de Cracovie.
- Han, J., Xiao, J., Shi, C., Wu, L. (2019). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating shale aggregate. *Construction and Building Materials*, 225, 173-184.
- Haward, M. (2018). Plastic pollution of the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 99.

- Heikal, M. (2000). Effect of temperature on the physico-mechanical and mineralogical properties of Homra pozzolanic cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(11), 1835-1839.
- Herve, E., Care, S. Seguin, J.P. (2010), Influence of the porosity gradient in cement paste matrix on the mechanical behaviour of mortar, *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1060-1071.
- Huysman, S., De Meester, S., Van der Voort, P., Vandeveld, L. (2017). Life cycle assessment of plastic waste management options: landfilling, incineration and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, 76-86.
- Ipek, S., Uygunoglu, T. (2016). The effect of shale aggregate characteristics on the properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 106, 548-555.
- Jiang, J., Liu, X. (2017). Study on properties of concrete with shale aggregate under high temperature. *Construction and Building Materials*, 152, 126-133.
- Kadela, M., Roslowaski, E. (2015). The use of waste plastics in concrete mixtures. *MATEC Web of Conferences*, 28, 01007.
- Kadela, M., Roslowaski, E., Szwabowski, J. (2017). Mechanical properties of concrete with recycled polypropylene fibers. *MATEC Web of Conferences*, 117, 00057.
- Kakooei, S., Mirza, J., Jafari, H. (2012). Experimental Study on the Effect of Polypropylene Fibers on the Properties of Reinforced Concrete Structures. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(48), 6432-6442.
- Kalifa P., Menneteau F.-D. Quenard D. (2000). Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1915-1927.
- Kanema M. (2007). Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, *Thèse de Doctorat, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise*.
- Karahan, A. Atilgan, E., (2011). The effects of service quality, customer satisfaction, and perceived value on behavioral intentions in service environments. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 24, 1753-1762.
- Karahan, O. (2006). The effect of polypropylene fibers on concrete properties. *Building and Environment*, 41(11), 1474-1478.
- Karahan, O. (2006). Use of Polypropylene Fibers in Concrete to Enhance Durability Parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 375-381.
- Karahan, O., Atiş, C.D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32(2), 1044-1049.
- Khaliq, W., Waheed, F. (2017). Mechanical response and spalling sensitivity of air entrained high-strength concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 150, 747-757.
- Khaliq, W., Kodur, V. (2011). Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41(11), 1112-1122.
- Khaliq, W., Kodur, V.K.R. (2011). Effect of High Temperature on Tensile Strength of Different Types of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, 108(4).
- Khiari, R., et al. (2020). Effect of high temperature on the mechanical properties and microstructure of ordinary concrete. *Construction and Building Materials*, 259, 120347.

- Khoury G.A. (1992), Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research*, 44(161), 291-309.
- Kim H.K., Kim K.H., Kim Y.W., (2004), Effect of high temperature on the residual strength of high-strength concrete containing steel fibers, *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2053–2062.
- Kim, Y.S., Lee, T.G., Kim, G.Y. (2013). An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load. *Materials and structures*, 46, 607-620.
- Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices*, 2014.
- Kodur, V.K.R., Sultan, M.A., Badger, G. M. (2003). High temperature properties of high-strength concrete—a review. *Fire safety journal*, 38(6), 623-639.
- Kovler, K., Zhutovsky, S. (2006). Overview and future trends of shrinkage research. *Materials and structures*, 39(9), 827-847.
- Kozłowski, M., Kadela, M. (2015). Energy absorption mechanism in the fiber reinforced concrete: a critical review, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(4), 1026-1038.
- Kozłowski, M., Kadela, M., Sybilski, D. (2015). Flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials*, 101, 1253-1266.
- Lampropoulos L., Vlassis N. M., Tsakiridis P. E., Residual mechanical properties of high strength concrete after exposure to high temperatures, *Construction and Building Materials*, vol. 17, no. 5, pp. 331–336, Jul. 2003.
- Lee, J.S., Xi, Y. Willam, K. (2007), Strength and stiffness of concrete under heating and cooling treatments, in Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures, pp. 1709-1714.
- Leong, G. W., Mo, K. H., Loh, Z. P., Ibrahim, Z. (2020). Mechanical properties and drying shrinkage of lightweight cementitious composite incorporating perlite microspheres and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 246, 118410.
- Li V.C., Wu H.C., Chan Y-W. (1996). Effect of plasma treatment of polyethylene fibers on interface and cementitious composite properties. *Journal of the American Ceramic Society*; 79(3): 700–704.
- Li, X., Chen, H., Fang, C., Gu, Q., Ding, Y. (2019). High-temperature mechanical properties of high-performance concrete with mineral admixtures and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 225, 850-859.
- Li, X., Chen, L., Wang, D., Shi, Y. (2021). Effects of heating rate on the mechanical properties of concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 272, 121844.
- López-Buendía, A.M., Cobo, A., Cáceres-Jaraíz, I. (2013). Alkaline surface modification of polypropylene fiber for reinforced concrete. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(3), 1593-1601.
- Lura, P., Terrasi, G. (2012). Performance of high-strength fibre-reinforced concrete at high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34(3), 325-332.

- Lura, P., Terrasi, G.P. (2006). The influence of polypropylene fiber geometry on the fracture properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 239-249.
- Madhavi, T. C., Raju, L. S., Mathur, D. (2014). Polypropylene fiber reinforced concrete-a review. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 4(4), 114-118.
- Madhavi, T., Ramana, B.V., Rambabu, K. (2014). Effect of Polypropylene Fiber Reinforcement on the Properties of Concrete. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3(7), 111-116.
- Mansur M.A. Mahmud H.B., High-strength concrete under compression at high temperatures, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 443–450, Aug. 2005.
- Mansur, M. A., Karim, M. R., Haque, N., Ahmed, S. (2018). Effect of Polypropylene Fibre on High Strength Concrete under High Temperature. *Procedia Engineering*, 171, 979-986
- Mansur, M.R., Aziz, F.N.A., Zain, M.F.M. (2013). Effect of high temperature on the mechanical properties of concrete containing polypropylene fiber. *Procedia Engineering*, 54, 828-836.
- Marthong, C. (2019). Effect of waste cement bag fibers on the mechanical strength of concrete. *Advances in materials research: AMR*, 8(2), 103-115.
- Mazloom, M., Mirzamohammadi, S. (2019). Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers. *Advances in materials research: AMR*, 8(2), 137-154.
- Meddah, M. S., Bencheikh, M. (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and building materials*, 23(10), 3196-3205.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Merli, R., Preziosi, M., Acampora, A., Lucchetti, M. C., Petrucci, E. (2020). Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119207.
- Mesbah, H. A., Buyle-Bodin, F. (2008). Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, 13, 439–447.
- Millard S. G., The mechanical properties of high-performance concrete subjected to elevated temperatures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 12, pp. 1863–1867, Dec. 1999.
- Mobasher, B., Li, H. (2007). Effects of high temperature on the behavior of polypropylene- and steel-fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 104(3), 274-281.
- Moghadam, M. A., Izadifard, R. A. (2020). Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 113, 102978.
- Nechnech, W., Khelidj, A., El Hachem, R., Noumowe, A. (2001). Mechanical behaviour of concrete at high temperature: A review. *Journal of Materials Science*, 36(21), 5089-5103.
- Nematollahi, B., et al. (2019). High-performance concrete subjected to high temperatures: A review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019027.

- Nili, M., Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927-933.
- Ning, X., Song, G., Sun, Y. (2010). Modification of polypropylene fiber by acrylic acid and its effect on the mechanical property of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 558-565.
- Noumowé, A. (1995). Comportement du béton soumis à haute température. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Noumowe, A. (2005). Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 C. *Cement and concrete research*, 35(11), 2192-2198.
- Noumowe, A., Sahmaran, M. (2019). Mechanical and microstructural properties of high-strength fiber reinforced concrete at elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 21, 229-237.
- ONS, (2018), Office for National Statistics, Construction Statistics Annual Report, UK. <https://www.ons.gov.uk/businessindustryandtrade/constructionindustry/datasets>.
- Ogi, K., Shinodab, T., Mizuic, M. (2005). Strength in concrete reinforced with recycled CFRP pieces. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36, 893–902
- Orasutthikul, S., Unno, D., Yokota, H. (2017). Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar. *Construction and building materials*, 146, 594-602.
- Pacheco, J.G., de Brito, J., Evangelista, L. (2019). Mechanical properties and durability of concrete with mixed recycled aggregates and plastic fibers. *Construction and Building Materials*, 203, 491-501.
- Peng, G. F., Bian, S. H., Guo, Z. Q., Zhao, J., Peng, X. L., Jiang, Y. C. (2008). Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 22(5), 948-955.
- Peng, G.F., Yang, W.W., Zhao, J., Liu, Y.F., Bian, S.H. Zhao, L.H. (2006), Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 36(4), 723-727.
- Phan L. T. Carino N. J. (2001). 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,
- Phan, L. T. (1996). Fire resistance of high-performance concrete. *Fire safety journal*, 26(2), 143-156.
- Phan, L.T., Carino, N.J. (1997). Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(3), 143-152.
- Phan, L.T., et al. (2016). Effects of elevated temperature on concrete: A review. *Magazine of Concrete Research*, 68(13), 669-683.
- Pliya P. (2010). 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, France.

- Pliya, P., Beaucour, A. L., Noumowé, A. (2011). Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Construction and building materials*, 25(4), 1926-1934.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L. (2004). Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cement and concrete Research*, 34(12), 2215-2222.
- Poon, S.W., Jevons, C.P. Pease, S., (2004). Critical success factors for relationship marketing in a late-mover industry. *European Journal of Marketing*, 38(11/12), 1462-1480.
- Prabhu, T. N., Demappa, T., Harish, V., Prashantha, K. (2015). Synergistic effect of clay and polypropylene short fibers in epoxy based ternary composite hybrids. *Advances in materials Research*, 4(2), 097.
- Rajapakse R.M.G., Kariyawasam R.L.U., Tam C.T., (2003). Properties of high-strength concrete subjected to high temperatures, *Mag. Concr. Res.*, 55(2), 141–150.
- Reddy, D. V., Pawade, P. Y. (2012). Combine effect of silica fume and steel fiber on mechanical properties on standard grade of concrete and their interrelations. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 3, 361-366.
- Richardson, A. E. (2006). Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions. *Structural survey*.
- Roslowaski, E., Kadela, M. (2018). Use of waste plastics in concrete mixture as aggregate replacement. *MATEC Web of Conferences*, 163, 02002.
- Rudnik, E., Drzymała, T. (2018). Thermal behavior of polypropylene fiber-reinforced concrete at elevated temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1005-1015.
- Saber, H., Shaheen, Y., El-Hawary, M. (2018). Effect of Polypropylene Fibers on Fire Resistance of Normal Strength and High Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(7), 04018183.
- Sakr, K., El-Hakim, E. (2005). Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties, *Cement and Concrete Research*, 35(3), 590-596.
- Scheffler, C., Maierhofer, C., Czaderski, C. (2013). The Influence of Short Polyvinyl Alcohol Fibers on the Flexural Toughness of Concrete. *Applied Composite Materials*, 20(4), 519-532.
- Schneider, M., Diederichs, U., Ehm, W. (1982). Microstructural changes in hardened cement paste under the influence of high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 12(5), 281-290.
- Segre, N., Tonella, E., Joekes, I. (1998). Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 28(1), 75-81.
- Selamat, A., Bahri, A., Jumaat, M.Z., Jaafar, S., Ismail, A. (2019). Effect of Polypropylene Fibre on High-Strength Concrete under Elevated Temperature. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(6), 3029-3041.
- Setti, F., Ezziane, K., Setti, B. (2020). Investigation of mechanical characteristics and specimen size effect of steel fibers reinforced concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(13), 1426-1441.

- Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste management*, 28(10), 1835-1852.
- Simsek, O. (2016). Fiber-reinforced concrete: An overview. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 951-959.
- Simsek, O. (2016). The Effect of Polypropylene Fiber on Strength and Durability of Concrete. *Procedia Engineering*, 161, 236-241.
- Sivakumar, A., Santhanam, M. (1995). Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and nonmetallic fibres. *Cement and Concrete Composites*, 29, 119–124.
- Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene fiber- reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 1546–1550.
- Suhaendi, S.L., Horiguchi, T. (2006). Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1672-1678.
- Suhaendi, S.L. and Horiguchi, T. (2005), Fiber-reinforced high-strength concrete under elevated temperature-effect of fibers on residual properties, *Fire Safety Science*, 8, 271-278.
- Sun, J., Liu, B., Li, W. (2019). Mechanical and thermal properties of high-performance concrete at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 195, 76-86.
- Szabová, L., Hricovíni, M., Kósa, A. (2009). Surface modification of non-woven polypropylene fibers with TiO₂ nanoparticles. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 17(4), 31-34.
- Tang, L., Zhang, M., Yan, C., Zhou, W. (2021). Effects of retarders and fibers on the high temperature resistance of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 305, 124667.
- Tanrioven, M. (2009). Polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Materials Science and Engineering*, 3(11), 58-66.
- Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P. Ball, R.J. (2018), Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand, *Construction and Building Materials*, 161(1), 63-69.
- Tioua, T., Dheilily, R. M., Benmedakhene, S., Bellal, B. (2017). Influence of pozzolanic admixture on the mechanical properties of date palm fibers reinforced concrete. *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(5), 1825-1833.
- Topçu, İ. B., Sarıdemir, M. (2015). The effect of polypropylene fiber addition on the fire resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 826-833.
- Toumi, A. (2010). Experimental study of the mechanical behavior of high strength concrete at high temperatures. *Engineering Structures*, 32(6), 1534-1544.
- Toutoungi, H. A., Bayasi, Z. (2004). Influence of steel fibers on the properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 18(6), 377-383.
- Vairagade, V., Kene, K., Deshpande, N. (2012). Investigation of compressive and tensile behavior of fibrillated polypropylene fibers reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(3), 1111-1115.

- Varona F.B., Baeza F.J., Bru D., Ivorra S. (2018). Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete *Construction and Building Materials*, 159, 73-82.
- Voigt, T., Bui, V.K., Shah, S.P. (2004). Drying shrinkage of concrete reinforced with fibers and welded-wire fabric. *Materials Journal*, 101(3), 233-241.
- Wahab, R., Jawaid, M., Islam, M. S. (2007). Plastic waste generation and management in Dhaka city, Bangladesh. *Waste Management*, 27(3), 348-356.
- Wang, C., et al. (2014). Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 53, 163-169.
- Wang, J., Chen, Z., Li, Z. (2021). Effect of heating rate on thermal properties and cracking behavior of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 290, 123181
- Wang, Y., Wu, H.C., Li, V.C. (2000). Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of materials in civil engineering*, 12(4), 314-319.
- Wei, S. (2004). Surface characterization of plasma-treated polypropylene fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(1), 177-183.
- Widhianto, A., Darmayadi, D., Asfari, G. D. (2014). Fire resistance of normal and high-strength concrete with contains of steel fibre. *Asian J. Civ. Eng.*, 15(5), 655-669.
- Wójcik, W., Błażejowski, R. (2018). The influence of aggregate mineralogy on the mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Materials*, 11(10), 1824.
- Wu, Y.F., Yu, R.C., Spiesz, P. (2016). Fire resistance of concrete with recycled aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031.
- Xiao J. Falkner H. (2006). On residual strength of highperformance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, 41(2), 115-121.
- Xie, N., Zhou, Y. (2019). Properties of high-performance concrete under high temperature. *Construction and Building Materials*, 225, 840-849.
- Xing, Z. Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, *Thèse de Doctorat*, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- Xu, Y., Wong, Y.L., Poon, C.S., Anson, M. (2001), Impact of high temperature on PFA concrete, *Cement and Concrete Research*, 31(7), 1065-1073.
- Xu, Y., Yu, J., and Zhang, J. (2012). Surface modification of fibers by titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-8.
- Yan, Z., Zhang, X., Liu, Y., Han, N. (2020). Review of the microstructure of high-performance concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, C., Sivakugan, N. Deng, Z. (2015), Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete", *Construction and Building Materials*, 101(1), 1069-1077.
- Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, M. Sivakugan, N. (2016). Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 114(1), 134-141.
- Zalegowski, K., Kadela, M., Roslowaski, E. (2020). Evaluation of the mechanical and thermal properties of concrete with waste plastic fibers. *MATEC Web of Conferences*, 308, 01003.

- Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., Mang, H.A. (2006). How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?. *Cement and concrete research*, 36(5), 929-942.
- Zenal, M. (2008). Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), 699-705.
- Zeyad, A.M., Khan, A.H., Tayeh, B.A. (2020). Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 806-818.
- Zhang J., Li S., Li Y., Sun J., (2016). Effects of high-temperature exposure on mechanical and microstructural properties of steel fiber-reinforced high-performance concrete, *Materials and Structures*, 49(5), 1869-1883.
- Zhang J., Li S., Li Y., Sun J., (2016). Mechanical and microstructural properties of polypropylene fiber-reinforced high-performance concrete after high-temperature exposure," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 31(2), 433-438.
- Zhang, C., Gopalaratnam, V. S., Yasuda, H. K. (2000). Plasma treatment of polymeric fibers for improved performance in cement matrices. *Journal of Applied Polymer Science*, 76(14), 1985-1996.
- Zhang, J., Guo, L., Chen, C., Wang, Q., Zhang, Y., Zhang, S. (2020). Effects of elevated temperatures on mechanical properties and microstructures of plain concrete and reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 118052.
- Zhang, J., Sun, W., Guo, Z. (2012). Research on compressive strength and toughness of bamboo fiber reinforced concrete. *Advanced Materials Research*, 399, 610-613.
- Zhang, L., Ding, Y., Li, Y. (2020). Effects of heating rates on pore structure and cracking behavior of high-performance concrete under high temperatures. *Construction and Building Materials*, 244, 118285.
- Zhang, P., Li, Q. F. (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1587-1594.
- Zheng, Z., Feldman, D. (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science*, 20(2), 185-210.
- Zhong, H., Zhang, M. (2020). Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120914.
- Zhu, Y., Yang, Y. (2006). Polypropylene fiber reinforced concrete and fiber properties. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 21(3), 68-71.
- Zollo, R. F. (1997). Crack bridging and crack growth in fiber-reinforced concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 9(2), 73-78.
- Zoorob, S.E., Suparna, L.B. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement and Concrete Composites*, 22, 233-242.