

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : GENIE CIVIL

Spécialité : Ingénierie des structures

Par : BELGHANEM ABDELKADER & DIB TARIK

Thème :

Etude des propriétés mécaniques et de durabilité des bétons aux fibres polypropylènes

Soutenu publiquement, 07/06/2017, devant le jury composé de :

Mr F. GHOMARI	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr F. HOUTI	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme L. SAIL	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mr A. BEZZAR	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mme N. DJAFOUR	MCB	Univ. Tlemcen	Encadrante

Année Universitaire : 2016-2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Des remerciements à des personnes, avec qui nous avons partagé la joie de la réussite de ces études sont autant une reconnaissance que des souvenirs inoubliables.

Le présent travail a été réalisé au sein du laboratoire EOLE (Eau et ouvrages dans leurs environnements) de Génie Civil de la faculté de Technologie de l'Université Abou Bakr-Belkaid de Tlemcen, il n'aurait pu être mené à bien sans l'aide des personnes à qui nous voudrions adresser tous nos remerciements.

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à notre encadreur Mr le professeur BEZZAR Abdelillah pour avoir accepté de diriger notre mémoire et dont l'aide précieuse nous a été indispensable sur le plan scientifique. Nous tenions également à le remercier pour la confiance et la sympathie qu'il nous a témoignées au cours de ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également notre Co-encadreur Mme DJAFOUR Nawel pour son immense implication et d'avoir suivi de près notre travail de recherche.

Monsieur le Professeur F. GHOMARI nous a fait l'honneur de présider notre jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de toute notre gratitude. Nous tenons à remercier également Mr F. HOUTI et Melle L. SAIL pour avoir accepté d'examiner ce travail. Nous les en remercions sincèrement.

Nous associons également à nos remerciements les membres d'équipe d'EOLE pour toute l'aide qu'ils ont apportée pour la réalisation du banc d'essai et l'expérimentation que nous avons effectuée au sein du laboratoire d'EOLE.

Enfin, Nous adressons un grand merci à nos deux chères familles et nos amis qui ont toujours été présents pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

Mes chers frères, Chems eddine et Sidali, pour leur appui et leur encouragement,

Toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Tous mes amis et mes collègues de la promotion GC 2014-2017, avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.

Mon maitre de Karaté SEROUTOU Abdelkrim et à tous mes amis de club U.S.M.G,
Que toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Par BELGHANEM Abdelkader.

Dédicaces

A la fin de ce cycle universitaire, il est de tradition d'exprimer mes reconnaissances à l'égard de ceux qui, par leurs apports multiformes ont contribué à l'aboutissement et à la réussite de celui-ci.

C'est ainsi qu'à travers ce mémoire, je tiens tout d'abord à présenter ma profonde gratitude envers le bon DIEU qui m'a guidé et illuminé dans le bon chemin.

Je tiens aussi à dédier ce mémoire à mes chers parents qui ont sacrifié leurs temps et leurs dévouements pour aboutir à ce cursus universitaire.

Je tiens aussi à remercier du plus profond de mon cœur à mes très chères sœurs Nassima, Lamia et Siham qui ont été toujours là pour moi, sans oublier mon cher neveu Rayane et mes chères nièces Linda, Meriem et Inès, et à toute ma famille.

J'exprime également ma gratitude à mes amis pour l'aide qu'ils m'ont apporté, et leur encouragement à finir ce travail.

Par DIB TARIK.

Résumé

Le renforcement des matériaux de construction, particulièrement les bétons par des fibres est une des techniques utilisée dans le but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et leurs durabilités. Les propriétés mécaniques du béton de fibre dépendent de plusieurs facteurs : la nature de la fibre, sa forme géométrique, leurs dimensions, le dosage, la distribution des fibres dans le béton.

Dans notre travail, nous avons étudié des bétons de fibres de polypropylène avec cinq fractions volumiques différentes (0,07 ; 0,1 ; 0,13 ; 0,2 ; 0,22%) pour des dosages massiques respectifs de (0,6 ; 0,9 ; 1,2 ; 1,8 ; 2 kg/m³). L'effet de la fibre polypropylène sur l'ouvrabilité et les paramètres mécaniques (compression et traction par flexion) ainsi que sur les indicateurs de durabilité (porosité accessible à l'eau, perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire) ont été effectués. Les résultats obtenus ont été comparés à un béton témoin sans fibre, l'ajout de la fibre polypropylène résulte d'une diminution de l'ouvrabilité du béton et une augmentation en même temps de la résistance à la compression de 23,12% pour un dosage de 0,9kg/m³ et à la traction par flexion de 11,71% pour un dosage de 0,6kg/m³, Cependant nous avons constaté que cette fibre a un effet significatif sur les paramètres de durabilité (porosité accessible à l'eau, perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire) pour un dosage de 0,6 kg/m³. Une diminution de tous les paramètres testés a été constatée pour le dosage de 2kg/m³.

Mots clés : fibre polypropylène, béton fibré, caractéristiques mécaniques, compression, traction, durabilité.

Summary

The reinforcement of building materials, particularly concretes by fibers is one of the techniques used in order to improve their mechanical characteristics and their durability. The mechanical properties of fiber concrete depend of many factors: the nature of the fiber, its geometric shape, its dimensions, the dosage of fibers, and the distribution of the fibers in the concrete

In our work, we studied polypropylene fiber concretes with five different volume fractions (0,07;0,1; 0,13; 0,2 and 0,22%) for respective mass dosages of (0,6; 0,9; 1,2; 1,8 and 2 kg / m³). The effect of polypropylene fiber on workability and mechanical parameters (compression and flexural by tensile) as well as durability indicators (porosity accessible to water, permeability to water, and capillary absorption) were performed. The results obtained were compared to a witness concrete without fiber. The addition of the polypropylene fiber results in a reduction in the workability of the concrete and an increase at the same time of the compressive strength of 23,12% for a dosage of 0,9 kg / m³ and for the flexural by tensile of 11,71% for a dosage of 0,6 kg / m³. However, we found that this fiber has a significant effect on the durability parameters (porosity accessible to water, permeability to water and capillary absorption) for dosage of 0,6 kg / m³. A decrease in all parameters tested was found for the dosage of 2kg / m³.

Keywords: polypropylene fiber, concrete fiber, mechanical properties, compression, tensile, durability.

ملخص

تقوية مواد البناء، وخاصة الخرسانة بالألياف، التي هي واحدة من التقنيات المستخدمة من أجل تحسين خواصها الميكانيكية واستخداماتها. تعتمد الخواص الميكانيكية للخرسانة من الألياف على العديد من العوامل: طبيعة الألياف، شكلها الهندسي، أبعادها، كمية الألياف وتوزيع الألياف في الخرسانة.

في عملنا التجريبي، درسنا ألياف البولي بروبيلين في الخرسانة مع خمسة نسب حجمية مختلفة (0.07، 0.1، 0.13، 0.2، 0.22%) التي تمثل في كمية ثقليه ذو (0، 0.6، 0.9، 1.2، 1.8، 2.0 كغم / م³). تم تنفيذ تأثير ألياف البولي بروبيلين على قابلية الخرسانة، قوة الضغط، قوة الشد بانثناء وكذلك مؤشرات الاستدامة (المسامية يمكن تحقيقها بالمياه، نفاذية المياه، وامتصاص شعري) التي أجريت. تمت مقارنة النتائج المتحصل عليها مع الخرسانة من دون الألياف. النتائج متحصل عليها تؤكد على ان الألياف البولي بروبيلين تؤدي الى تخفيض قابلية الخرسانة وزيادة في نفس الوقت قوة الضغط بنسبة ب 23.12% لكمية ذو 0.9 كغم / م³، زيادة قوة الشد بانثناء بنسبة ب 11.71% لكمية ذو 0.6 كغم / م³. كما وجدنا أن هذه الألياف لديها تأثير ايجابي على مؤشرات الاستدامة (المسامية يمكن تحقيقها بالمياه، نفاذية المياه وامتصاص الشعري) لكمية ذو 0.6 كغم / م³ و وجود انخفاض في جميع مؤشرات اختبار لكمية ذو 2 كغم / م³.

كلمات البحث: ألياف البولي بروبيلين و الخرسانة مع الألياف، الخواص الميكانيكية، الضغط، و الشد، الاستدامة.

Sommaire:

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des notations

Introduction générale.....	1
<u>Chapitre I.</u> Généralité sur les bétons fibrés.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Les bétons fibrés.....	4
I.3. Définition de la fibre	4
I.4 Les différents types de fibres.....	4
I.4.1. Fibres naturelles végétales	5
<i>I.4.1.1. Les fibres de cellulose</i>	<i>5</i>
I.4.2. Fibres naturelles minérales.....	6
<i>I.4.2.1. Les fibres d'amiante</i>	<i>6</i>
I.4.3. Fibres synthétiques d'origine minérale	7
<i>I.4.3.1. Les fibres de verre</i>	<i>7</i>
<i>I.4.3.2. Les fibres de carbone</i>	<i>8</i>
<i>I.4.3.3. Les fibres d'acier.....</i>	<i>9</i>
I.4.4. Fibres synthétiques organique	10
<i>I.4.4.1. Les fibres polypropylènes.....</i>	<i>10</i>
I.5. Les caractéristiques et les propriétés des fibres	11
I.6. Comportement de béton fibré à l'état frais :.....	12
I.7. Comportement de béton fibré à l'état durci :.....	12
I.7.1. Paramètres influençant le comportement mécanique	12
<i>I.7.1.1. Longueur des fibres.....</i>	<i>13</i>
<i>I.7.1.2. Orientation préférentielle des fibres</i>	<i>13</i>
<i>I.7.1.3. La taille fibre/granulats</i>	<i>13</i>
I.7.2. Comportement de béton fibré à la compression	14
I.7.3. Comportement à la traction	16
I.7.4. Comportement au retrait plastique.....	17
I.7.5. Comportement au fluage.....	17
I.7.6. La tenue au feu	18
I.8. Conclusion	19
<u>Chapitre II.</u> Revue bibliographique	20
II.1. Introduction	21
II.2. Essai sur le béton frais	21

II.2.1. L'ouvrabilité par le cône d'affaissement	21
II.2.1.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre d'ouvrabilité</i>	21
II.2.1.2 <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre d'ouvrabilité</i>	24
II.3. Essai sur le béton durci.....	27
II.3.1. Résistance à la compression.....	27
II.3.1.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre de compression</i>	27
II.3.1.2. <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de compression</i>	32
II.3.2. Résistance à la traction par flexion	36
II.3.2.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre de traction</i>	36
II.3.2.2. <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de traction par flexion</i>	40
II.4. Essai de durabilité	43
II.4.1. Essai d'absorption capillaire	43
II.4.1.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre d'absorption capillaire</i>	43
II.4.1.2. <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre d'absorption capillaire</i>	45
II.4.2. Essai de porosité.....	47
II.4.2.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre de porosité</i>	47
II.4.2.2. <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre porosité</i>	48
II.4.3. Essai de perméabilité à l'eau	50
II.4.3.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre de perméabilité à l'eau</i>	50
II.4.3.2. <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de perméabilité à l'eau</i>	53
II.4.4. Essai de diffusion des ions chlorure	55
II.4.4.1. <i>Les différents travaux effectués sur le paramètre de diffusion des ions chlorure</i>	55
II.4.4.2. <i>Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de diffusion des ions chlorure</i>	58
II.5. Conclusion.....	60
<u>Chapitre III. Matériaux et méthodes</u>	61
III.1. Introduction.....	62
III.2. Choix des matériaux	62
III.2.1. Ciment	62
III.2.2. Granulats	62
III.2.3. Eau de gâchage.....	62
III.2.4. Fibre polypropylène	62
III.2.5. Adjuvant	63

III.3. Propriétés des matériaux utilisés.....	63
III.3.1. Masses volumiques des granulats utilisés	64
III.3.2. Analyse granulométrique	64
III.3.2. Equivalent de sable	67
III.4. Préparation des bétons :.....	67
III.4.1. Paramètres étudiés	67
III.4.2. Nombre d'échantillons préparés.....	67
III.4.3. Composition de béton.....	68
III.4.4. Protocole de fabrication du béton	69
III.5. Méthodes.....	70
III.5.1. Essai sur le béton frais.....	70
<i>III.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams</i>	70
III.5.2. Essai sur le béton durci.....	71
<i>III.5.2.1. Essai de résistance à la compression</i>	71
<i>III.5.2.2. Essai de résistance à la traction par flexion</i>	72
III.5.3. Essai de durabilité	73
<i>III.5.3.1. Essai de la porosité accessible à l'eau.....</i>	73
<i>III.5.3.2. Essai d'absorption capillaire</i>	75
<i>III.5.3.3. Essai de mesure de la perméabilité à l'eau</i>	76
III.6. Planning des essais effectués	78
<u>Chapitre IV. Résultats et interprétations</u>	79
IV.1. Introduction	80
IV.2. Essai sur le béton frais.....	80
IV.2.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	80
IV.3. Essai sur le béton durci.....	82
IV.3.1. Essai de résistance à la compression	82
IV.3.2. Essai de résistance à la traction par flexion	84
IV.4. Essais de durabilité	86
IV.4.1. Essai de porosité accessible à l'eau	86
IV.4.2. Essai de perméabilité à l'eau	87
IV.4.3. Essai d'absorption capillaire.....	88
IV.5. Conclusion	92
Conclusion générale et recommandations.....	93
Références bibliographiques.....	94
Annexes	97

Liste des figures :

<u>Chapitre I. Généralité sur les bétons fibrés</u>	3
Figure I.1: La représentation de la fibre de cellulose	5
Figure I.2: La représentation de la fibre d'amiante	6
Figure I.3: La représentation de la fibre de verre	7
Figure I.4: La représentation de la fibre de carbone	8
Figure I.5: Les différents types de fibre d'acier (Yagoub, 2009)	9
Figure I.6: La représentation de la FPP de 6 ; 12 ; 19mm (Najimi et al., 2009)	10
Figure I.7: Illustration des différents facteurs influençant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres (Fritih, 2009)	11
Figure I.8: Schéma de disposition des fibres. (Belhadj, 2015)	13
Figure I.9: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur de la fibre. (Makhlouf, 2010)	14
Figure I.10: Représentation du comportement d'un cylindre en béton soumis à un effort de compression (Redaeilli, 2009)	14
Figure I.11: Courbe contrainte-déformation du béton en fibre d'acier (Majumdar and Narayan Swamy, 1977)	15
Figure I.12: Effet des fibres sur le contrôle des fissures en compression (Redaeilli, 2009)	15
Figure I.13: Illustration de l'apport du renfort par des fibres (Fritih, 2009)	16
Figure I.14: Illustration de principe de couture des fibres à travers une fissure dans le béton (Fritih, 2009)	16
Figure I.15: Processus de fissuration du béton (Fritih, 2009)	17
Figure I.16: Effet du feu sur les corps d'épreuve, sans fibres (à gauche, écaillage), avec fibres polypropylènes (à droite, coloration) (Shuttle worth, 2001)	18
<u>Chapitre II : Revue bibliographique</u>	20
Figure II.1 : Effet de la fraction volumique de la FPP sur l'affaissement (Zhang and Li, 2013)	22
Figure II.2 : Etude de l'affaissement avec un pourcentage différent des FPP (Saidani et al., 2016) ..	23
Figure II.3 : Résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours pour différentes fractions volumiques en FPP (Alhozaimy et al., 1996)	27
Figure II.4 : Résistance à la compression du béton avec des FPP à 28 jours (Toutanji, 1999).....	28
Figure II.5 : Résistance à la compression du béton avec des FPP par rapport à l'âge (Najimi et al., 2009)	29
Figure II.6 : Résistance à la compression de différents échantillons de béton après 28 jours de durcissement (Kakooei et al., 2012)	30
Figure II.7 : Mesure de la résistance à la compression à 28 jours (Singh, 2014)	32

Figure II.8 : Résultat des essais de résistance à la traction par flexion du béton à différentes fractions	36
Figure II.9 : Résistance à la traction par flexion par rapport à l'âge (Najimi et al., 2009) volumiques (Alhozaimy et al., 1996)	37
Figure II.10 : Résistance à la traction par flexion pour les différents bétons (Bagherzadeh, 2012) ..	38
Figure II.11 : Résistance à la traction par flexion à 28 jours (Singh, 2014)	39
Figure II.12 : Résistance à la traction par flexion à 7, 28 et 91 jours (Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015)	39
Figure II.13 : Coefficient d'absorption capillaire par rapport à la teneur en fibres (Ramezani pour et al., 2013)	44
Figure II.14 : Résultat de l'essai d'absorption capillaire pour différent fraction volumique en FPP (Sugandhini H. K. et al., 2016)	45
Figure II.15 : Profondeur de pénétration d'eau par rapport à la teneur en FPP pour l'essai de perméabilité à l'eau (Ramezani pour et al., 2013)	51
Figure II.16 : Effet de la fraction volumique de la fibre sur la profondeur de pénétration de l'eau (Zhang and Li, 2013)	52
Figure II.17 : Influence de la teneur en FPP sur la profondeur de pénétration de cl^- durant le cycle de séchage-humidification (Wang and Niu, 2011)	56
Figure II.18 : Influence de la teneur en FPP sur la profondeur de pénétration de cl^- durant le cycle de séchage-humidification pour $E/C=0,45$ (Söylev and Özturan, 2014)	56
Figure II.19 : Influence de la teneur en FPP sur la profondeur de pénétration de cl^- durant le cycle de séchage-humidification pour $E/C=0,65$ (Söylev and Özturan, 2014)	57
<u>Chapitre III. Matériaux et méthodes</u>	61
Figure III.1 : Photos sur les matériaux utilisés dans la préparation de nos bétons	63
Figure III.2 : Courbe granulométrique des granulats.	66
Figure III.3 : Les moules utilisés pour notre programme expérimental (à gauche prismatique de 40x10x10 cm et à droite cylindrique de 11x22 cm)	68
Figure III.4 : Matériels nécessaire pour la réalisation de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams .	70
Figure III.5 : Les étapes de déroulement de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams	71
Figure III.6 : Essai de compression	72
Figure III.7 : Essais de traction par flexion	72
Figure III.8 : Protocole de saturation - (a) : procédure (AFREM-AFGC, 1997) - (b) procédure (AFREM-AFGC, 1997) modifiée cité par (Kamèche Z., 2015)	73
Figure III.9 : Les étapes à suivre pour la mesure de la porosité accessible à l'eau	74
Figure III.10 : Courbe d'absorption capillaire selon la norme (ASTM C 1585 – 04, 2007)	75
Figure III.11 : Dispositif pour la réalisation de l'essai d'absorption capillaire	76
Figure III.12 : Essai de perméabilité à l'eau (Kamèche Z., 2015)	77
<u>Chapitre IV. Résultats et interprétations</u>	79

Figure IV.1 : résultats de l'essai d'affaissement.	99
Figure IV.2 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams pour les différents bétons	99
Figure IV.3 : résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de la FPP	83
Figure IV.4 : L'influence des FPP sur le contrôle des fissures	84
Figure IV.5 : résultats de la résistance à la traction par flexion obtenus pour les différents dosages de la FPP.	85
Figure IV.6 : Pourcentage de la porosité de béton sans et avec la FPP.	86
Figure IV.7 : Perméabilité à l'eau pour béton sans et avec la FPP.	88
Figure IV.8 : Evaluation de l'absorption capillaire initiale et secondaire pour BO, BF600, BF900, BF1200, BF1800 et BF2000.	89
Figure IV.9 : Résultats d'absorption capillaire initiale et secondaire pour les différents bétons.	90

Liste des tableaux :

<u>Chapitre I. Généralité sur les bétons fibrés</u>	3
Tableau I.1: Avantages, inconvénients et applications des fibres de cellulose (Makhlouf, 2010).....	6
Tableau I.2: Avantages, inconvénients et applications des fibres d’amiante (Makhlouf, 2010) et (Majumdar and Narayan Swamy, 1977).....	7
Tableau I.3: Avantages, inconvénients et applications de la fibre de verre (Yagoub, 2009) et (Majumdar and Narayan Swamy, 1977).....	8
Tableau I.4: Avantages, inconvénients et applications de la fibre de carbone (Yagoub, 2009) et (Majumdar, 1977).....	9
Tableau I.5: Avantages, inconvénients et applications de la fibre d’acier (Majumdar, 1977) et (Yagoub, 2009)	10
Tableau I.6 : Avantages, inconvénients et applications de la fibre polypropylène (Majumdar, 1977) et (Yagoub, 2009)	11
Tableau I.7 : Caractéristiques et propriétés des fibres (Majumdar, 1977)	11
<u>Chapitre II. Revue bibliographique</u>	20
Tableau II.1 : Influence du dosage en FPP sur l’affaissement (Toutanji, 1999)	21
Tableau II.2 : Influence de la longueur de la FPP sur l’ouvrabilité de béton (Najimi et al., 2009).....	21
Tableau II.3 : Influence du dosage en FPP sur l’ouvrabilité de béton (Karahana and Atiş, 2011)	22
Tableau II.4 : Influence du dosage en FPP sur l’ouvrabilité de béton (Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015).....	23
Tableau II.5: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre d’ouvrabilité de la FPP.....	25
Tableau II.6 : Résultats de l’essai de résistance à la compression à 28 jours (Karahana and Atiş, 2011).....	29
Tableau II.7 : Résistance à la compression des bétons à différents jours (Bagherzadeh, 2012)	30
Tableau II.8: Résultats de la résistance à la compression pour les différentes dosages en FPP (Vikrant et al., 2012)	31
Tableau II.9 : Détails des mélanges de béton et leur résistance à la compression à 28 jours (Rakesh et al., 2013)	31
Tableau II.10: Résultats de l’essai à la compression pour le béton avec FPP (Saidani et al., 2016) ..	32
Tableau II.11: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de compression de la FPP	34
Tableau II.12: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de traction par flexion de la FPP	41
Tableau II.13: Résultats de coefficient d’absorption capillaire par rapport à la teneur en FPP (Karahana and Atiş, 2011)	43
Tableau II.14 : Coefficient d’absorption capillaire pour le béton sans et avec fibre (Söylev and Özturan, 2014).....	44

Tableau II.15: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre d'absorption capillaire de la FPP.	46
Tableau II.16: Résultats de la porosité des bétons avec FPP (Karahan and Atiş, 2011)	47
Tableau II.17: Influence de la teneur en FPP sur la porosité (Fallah and Nematzadeh, 2017)	47
Tableau II.18: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de porosité de la FPP.....	49
Tableau II.19: Résultats d'essai expérimental de la perméabilité à l'eau de béton avec FPP (Suhaendi and Horiguchi, 2006)	50
Tableau II.20: Caractéristiques de la perméabilité à l'eau des bétons renforcés de FPP (Sadiqul Islam and Gupta, 2016)	52
Tableau II.21: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de perméabilité à l'eau de la FPP	54
Tableau II.22: Résultats de coefficient de diffusion des chlorures (Antoni et col. 2003)	55
Tableau II.23 : Résultats de coefficient de diffusion des chlorures pour E/C=0,45 (Söylev and Özturan, 2014).....	57
Tableau II.24: Résultats de coefficient de diffusion des chlorures pour E/C=0,6 (Söylev and Özturan, 2014).....	57
Tableau II.25: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de diffusion des ions chlorure de la FPP.....	59
<u>Chapitre III. Matériaux et méthodes</u>	61
Tableau III.1 : Les caractéristiques des FPP de type BM 12.....	62
Tableau III.2: Caractéristiques du superplastifiant « TEK – SUPERFLOW 2000 R » (Belaidi A. Brix A., 2014).....	63
Tableau III.3 : Masses volumiques des granulats utilisés	64
Tableau III.4 : Analyse granulométrique du sable 0/3.....	64
Tableau III.5 : Analyse granulométrique du gravillon 3/8.....	65
Tableau III.6 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	65
Tableau III.7 : Analyse granulométrique du gravier 16/25	66
Tableau III.8 : Caractéristiques des échantillons testés	67
Tableau III.9 : Quantité des matériaux pour la formulation des bétons.....	68
Tableau III.10 : Consistance des bétons en fonction de la hauteur de l'affaissement.....	71
Tableau III.11 : Planning des essais effectués	78
<u>Chapitre IV. Résultats et interprétations</u>	79
Tableau IV.1 : Résultats des essais de l'affaissement au cône d'Abrams	80
Tableau IV.2 : Résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours	82
Tableau IV.3 : Résultats des essais de la résistance à la traction par flexion à 28 jours.....	85
Tableau IV.4: Résultats des essais de porosité accessible à l'eau pour le béton sans fibre et avec différents dosages en FPP	86

Tableau IV.5 : Résultats des essais de perméabilité à l'eau pour le béton sans fibre et avec différents dosages en FPP.....	87
Tableau IV.6 : Détermination du coefficient d'absorption capillaire pour chaque béton.....	90
Annexes	97
Tableau A.1: Table d'élimination des valeurs aberrantes pour la loi normale donnée par (FAVRE J. L., 2004) cité par (Boukli Hacène S.M., 2010).....	97
Tableau A.2: Valeur v_n calculée d'après le test des valeurs aberrantes pour la résistance à la compression	97
Tableau A.3: Valeur v_n calculée d'après le test des valeurs aberrantes pour la résistance à la traction par flexion.....	98
Tableau A.4: Résultats de la phase d'absorption initiale en volume d'eau absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps.....	98
Tableau A.5: Résultats de la phase d'absorption secondaire en volume d'eau absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps.....	98

Table des notations

La liste qui suit répertorie l'ensemble des notations utilisées dans ce mémoire.

Abréviations:

B.O	Béton ordinaire
FPP	Fibre polypropylène
BF 600	Béton avec 0,6 kg/m ³ de FPP
BF 900	Béton avec 0,9 kg/m ³ de FPP
BF 1200	Bétons avec 1,2 kg/m ³ de FPP
BF 1800	Bétons avec 1,8 kg/m ³ de FPP
BF 2000	Béton avec 2 kg/m ³ de FPP
E/C	Rapport massique eau sur ciment
ITZ	Zone de transition interfaciale

	Signification	Unité
A	surface de l'échantillon en contact avec l'eau	m ²
a	arête de base de l'éprouvette	cm
f _c	résistance à la compression	MPa
f _t	contrainte de traction par flexion	MPa
F _r	force de rupture	KN
ΔH	charge de pression hydraulique	m
K	coefficient de perméabilité à l'eau	m/s
L	l'épaisseur de l'échantillon du béton	m
M _{air}	masse de l'échantillon saturé pesé à l'air	g
M _{sec}	masse de l'échantillon pesée à sec	g
M _{eau}	masse de l'échantillon pesée sous l'eau	g
P _{eau}	porosité accessible à l'eau	%
Q	débit volumique de l'eau	m ³ /s
S	coefficient d'absorption capillaire	m / s ^{0,5}
t	durée de l'essai	s
x	valeur de l'essai de résistance	MPa
\bar{x}	valeur moyenne de la résistance	MPa
σ	l'écart type	MPa

Introduction générale :

A chaque seconde dans le monde, sont coulés 190 m³ de béton soit une production annuelle mondiale de 6 milliards de m³¹, ce qui en fait le matériau manufacturé le plus utilisé au monde dans la construction des immeubles d'habitation, des tunnels, des bâtiments d'activité industrielle et de commerce, des ouvrages d'art, etc. Le béton est adapté pour rester robuste et durable pendant une longue période. Cependant, les ouvrages en béton armé sont touchés par différents processus de dégradation (corrosion des armatures, attaques par les sulfates, action du gel dégel, etc.). Ces dégradations sont liées à la pénétration d'eau, d'air et d'agents agressifs au sein du béton qui s'effectuent principalement selon trois modes de transports, la perméabilité, la diffusion et l'absorption (ou capillarité).

Le béton et le mortier sont des matériaux qui résistent mal à la traction et à la fissuration. Les conditions d'environnement rudes existant dans la région saharienne de notre pays, dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit à des retraits importants et des fissures dans les structures.

A cet effet, l'être humain a pensé au matériau composite qui est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles dont les propriétés se complètent. Les matériaux composites sont anciens, il y a plusieurs millénaires, les artisans de l'Égypte ancienne augmentaient les propriétés mécaniques des briques par l'adjonction de pailles courtes à l'argile fraîche.

Le renforcement des matériaux cimentaires par les fibres polypropylène est relativement nouveau par rapport à celui des fibres d'amiante ou d'aciers. La caractérisation de ce nouveau matériau composite nécessite, alors la multiplication des recherches et des essais, ainsi que le développement de nouveaux procédés d'expérimentation.

Devant l'évolution des matériaux composites, le béton ne fait pas l'exception, les chercheurs et les producteurs de fibres ont pensé à l'incorporation des fibres comme matériau de renfort dans les matrices cimentaires. Depuis lors, l'utilisation des fibres dans le béton est devenue de plus en plus une pratique courante. Des applications sont développées grâce à la capacité prouvée par l'expérience de ces nouveaux composites, à limiter et à contrôler la fissuration sous sollicitations mécaniques et pour améliorer la résistance au choc.

Depuis quelques années, il est question d'améliorer le comportement du béton tendu par l'adjonction de fibres. Les fibres polypropylènes peuvent-elles améliorer la durabilité et le comportement mécanique de béton ordinaire ?

C'est pour tenter de répondre à cette interrogation, que nous avons choisi d'axer notre travail de recherche sur l'étude de la durabilité et le comportement des fibres polypropylène à l'état frais et à l'état durci. Les expérimentations sur des éprouvettes que nous mettrons en œuvre tenteront de mettre en évidence l'apport des fibres sur les paramètres mécaniques et de durabilité.

¹ PLANETOSCOPE. 2012. *matieres-premieres-production-mondiale-de-beton* [Online]. Available: www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html [Accessed 15 mai 2017.]

Nous allons donc exposer ci-après le cheminement de notre mémoire qui est scindé en quatre chapitres :

Le premier chapitre montre les notions fondamentales des bétons renforcés par des fibres, à savoir leurs rôles, leurs comportements et les propriétés des principaux types de fibres utilisées dans les domaines de la construction.

Le deuxième chapitre est consacré à l'apport de la fibre polypropylène sur l'ouvrabilité de béton, les paramètres mécaniques (résistance à la compression et à la traction par flexion) ainsi que l'influence de ces fibres sur les facteurs de durabilité (absorption capillaire, porosité, perméabilité...).

Le troisième chapitre présente le programme expérimental ainsi que les méthodes utilisées dans notre étude et les caractéristiques des constituants élémentaires utilisées dans la formulation de notre béton tel que: le ciment, le sable, l'eau de gâchage, l'adjuvant et la fibre polypropylène.

Dans le quatrième chapitre, nous essayons d'établir une discussion à propos des résultats obtenus et les interpréter, en s'inspirant de notre recherche bibliographique.

Nous présentons à la fin une conclusion générale sur la résistance du béton de fibres polypropylènes et sa durabilité. En se basant sur les résultats obtenus, nous donnons ainsi quelques recommandations.

Enfin, nous espérons que ce travail apportera une contribution au développement et à la valorisation des fibres polypropylènes dans le domaine de la construction.

Chapitre I. Généralité sur les bétons fibrés.

I.1. Introduction :

Dans le domaine de la construction, le béton est un matériau de construction omniprésent et la fibre en fait maintenant partie intégrante. Dans ce chapitre, nous présentons l'intérêt de la fibre dans le béton, ainsi qu'une présentation des différents types de fibre existant avec leurs caractéristiques géométriques, mécaniques, avantages, inconvénients et domaine d'application. Un aperçu de l'effet des fibres sur diverses propriétés du béton à l'état frais et durci est présenté par la suite. La propriété de la fibre (dosage, forme, orientation...) peuvent-elles influencer le comportement mécanique et la durabilité du matériau de béton ?

I.2. Les bétons fibrés :

Le béton est un matériau fragile qui résiste très mal à la traction, sa rupture est brutale de façon que les fissures se propagent très rapidement. L'innovation dans la science de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux qui est le béton renforcé de fibres et la maîtrise de leurs propriétés mécaniques et la durabilité à l'environnement agressive. Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres, la matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres quant à eux sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chaque catégorie de fibres est caractérisée par sa nature, sa forme géométrique, son élancement, et par sa teneur volumique. Ces différents paramètres vont offrir aux bétons une meilleure :

- Répartition des contraintes mécaniques.
- Ductilité et la ténacité.
- Résistance résiduelle.
- Structure du béton.
- Durabilité.

I.3. Définition de la fibre :

Il est très difficile de fournir une définition stricte de la fibre, les fibres sont disponibles en différentes tailles et formes. L'Américaine Concrete Institut (Committee, 1973) considère que le rapport d'aspect d'une fibre (L/d , Longueur divisée par le diamètre de fibre équivalent) est le paramètre le plus approprié par lequel une fibre peut être décrite. Cependant, dans la production de bétons fibreux, la gamme de diamètres et de longueurs de diverses fibres utilisées est très étendue et certaines des fibres (par ex. fibre de verre) sont utilisées sous forme de faisceaux. Il n'est pas possible de classer les fibres par leur rapport d'aspect seul. Le choix d'une fibre doit être basé sur le fait que la fibre utilisée doit être, avant tout mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice, elle doit conserver ses propriétés dans le temps.

I.4 Les différents types de fibres:

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leurs origines (naturelles, artificielles et synthétiques), leurs formes (lisse, droite, ondulée, à crochet, munie de cônes aux extrémités, etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques (résistance à la traction, module d'élasticité, etc.) (Djebali, 2013).

Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour l'usage recherché (pièces minces, pièces massives, réparation de structure, projection, renforcement d'une pâte, etc.), il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice et le mode de performance du composite. Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants:

- Densité ;
- Résistance à la traction et à la compression ;
- Résistance aux impacts et à la fatigue ;
- Module d'élasticité ;
- Conductivités thermique et électrique ;
- Stabilité dimensionnelle (retrait) ;
- Résistance aux conditions environnementales ;
- Coût ;

Parmi les fibres les plus utilisées dans le domaine du béton, nous citons (Yagoub, 2009):

-Fibres naturelles végétales : cellulose, lin, sisal.

-Fibres naturelles minérales : amiante.

-Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, d'acier.

-Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, Nylon.

I.4.1. Fibres naturelles végétales :

I.4.1.1. Les fibres de cellulose :

La principale fibre naturelle végétale utilisée est la cellulose (cf. Figure I.1), ces fibres sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme additif au ciment d'amiante. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces utilisées dans l'isolation phonique et thermique des murs (Makhlouf, 2010).



Figure I.1 : la représentation de la fibre de cellulose²

² ECOHABITATION. 2000. *Image-principale cellulose* [Online]. Available: <http://www.ecohabitation.com/sites/www.ecohabitation.com/files/imagecache/G12-Image-principale/guide/fiches/cellulose-web.jpg> [Accessed 20 mars 2017].

Le tableau I.1 présente les avantages, inconvénients et le domaine d'application de la fibre de cellulose.

Tableau I.1: Avantages, inconvénients et applications des fibres cellulose (Makhlouf, 2010).

Avantages	Inconvénients	Applications
<ul style="list-style-type: none"> - Bonne isolation thermique et phonique ; - Elles ne se corrodent pas (ne rouillent pas) ; - Bonne résistante au feu, à la moisissure et à l'humidité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de l'ouvrabilité du béton, 	<ul style="list-style-type: none"> - Isoler les murs ; - Insonorisation de murs, planchers et plafonds ; - fabrication des plaques minces.

I.4.2. Fibres naturelles minérales :

I.4.2.1. Les fibres d'amiante :

La fibre d'amiante (cf. Figure I.2) est la fibre naturelle minérale peu coûteuse disponible à l'état naturel, elles sont produites de la roche des silicates magnésiens ayant des propriétés réfractaires. Elles sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes (Makhlouf, 2010).



Figure I.2 : la représentation de la fibre d'amiante³.

Le tableau I.2 présente les avantages, inconvénients et le domaine d'application de la fibre de d'amiante.

³ INSR. 2006. *Amiante* [Online]. Available: [http://www.amiante.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-AccesParReference/RubriqueAmiante2/\\$File/fset.html](http://www.amiante.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-AccesParReference/RubriqueAmiante2/$File/fset.html) [Accessed 20 mars 2017].

Tableau I.2 : Avantages, inconvénients et applications des fibres d'amiante (Makhlouf, 2010) et (Majumdar and Narayan Swamy, 1977)

Avantages	Inconvénients	Applications
<ul style="list-style-type: none"> - Fibre peu couteuse ; - Bonne résistance à la traction ; - Module d'élasticité élevée ; - Résistance thermique élevé ; - Elles ne se corrodent pas (ne rouillent pas) ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau toxique ; - Associé aux risques pour la santé, interdit dans de nombreux pays. 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu ; - Des conduites ou canalisations en amiante-ciment ; - Revêtement des murs.

I.4.3. Fibres synthétiques d'origine minérale :

I.4.3.1. Les fibres de verre:

Les fibres de verre (cf. Figure I.3) sont très efficaces grâce à leurs qualités mécaniques, elles sont produites en atténuant le verre fondu par diverses techniques. Mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment ; Certaines fibres de verre présentent des propriétés « alcali-résistantes » (Majumdar and Narayan Swamy, 1977)



Figure I.3: la représentation de la fibre de verre⁴.

⁴ AIRTECH. 2008. *Fibre de verre* [Online]. Available: <http://www.airtech-rc.com/pr161945/fibre-de-verre-coupee-de-4mm-200g> 25 mars 2017].

Le tableau I.3 présente les avantages, inconvénients et le domaine d'application de la fibre de verre

Tableau I.3: Avantages, inconvénients et applications de la fibre de verre (Yagoub, 2009) et (Majumdar and Narayan Swamy, 1977)

Avantages	Inconvénients	Applications
<ul style="list-style-type: none"> - Grande résistance à la traction ; - Excellent isolant ; - Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ; - Conductivité thermique relativement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à l'abrasion ; - Faible résistance à la fatigue ; - Réaction faible à la grande dureté ; - Faible résistance aux charges cycliques ; - Diminution de l'ouvrabilité du béton. 	<ul style="list-style-type: none"> - La réalisation d'éléments de faible épaisseur (bardages industriels, panneaux de façades, élément décoratifs, etc.); - Murs anti- bruit; - Tuyaux d'évacuation et canalisations divers; - Enduit pour blocs de béton.

I.4.3.2. Les fibres de carbone :

La fibre de carbone (cf. Figure I.4) se compose de fibres extrêmement fines, d'environ 5 à 10 micromètres de diamètre, et elle est composée principalement d'atomes de carbone. Les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes. Leur utilisation, pour le renforcement de structures vise à compléter la structure d'un ouvrage là où ses parties tendues sont insuffisamment dimensionnées (Belaribi, 2007)



Figure I.4: la représentation de la fibre de carbone⁵.

Le tableau I.4 présente les avantages, inconvénients et le domaine d'application de la fibre de carbone

⁵ YUNIU FIBERGLASSE. 2012. *Carbon fiberglass chopped strands* [Online]. Available: <http://www.fiberglassyn.com/Carbon-fiberglass-chopped-strands-pd6706745.html> [Accessed 25 mars 2017].

Tableau I.4: Avantages, inconvénients et applications de la fibre de carbone (Yagoub, 2009) et (Majumdar and Narayan Swamy, 1977).

Avantages	Inconvénients	Applications
<ul style="list-style-type: none"> - Grande résistance à la traction et à la compression ; - Module d'élasticité élevé ; - Excellente tenue à haute température ; - Grande résistance à la fatigue ; - Excellente rigidité ; - Résiste bien aux attaques acide et basique ; - Insensibilité à l'humidité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé ; - Sensibilité aux impacts et à l'abrasion ; - Mauvais isolant ; - Faible allongement ; - Diminution de l'ouvrabilité du béton. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisé pour les structure devant supporter un poids important (ouvrage d'art) ; - Renforcement des structures (augmentations de la durabilité d'anciennes structures) ; - Revêtement conducteur.

I.4.3.3. Les fibres d'acier :

Les fibres métalliques (cf. figure I.5) notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables par leur forme, leur longueur et leur état de surface (ronde, carrée, rectangulaire, etc.), de mieux s'ancrer dans le béton. Elles peuvent être comme fibres ondulées, droites, rubans, de fonte, à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc. (Belaribi, 2007) et (Yagoub, 2009)

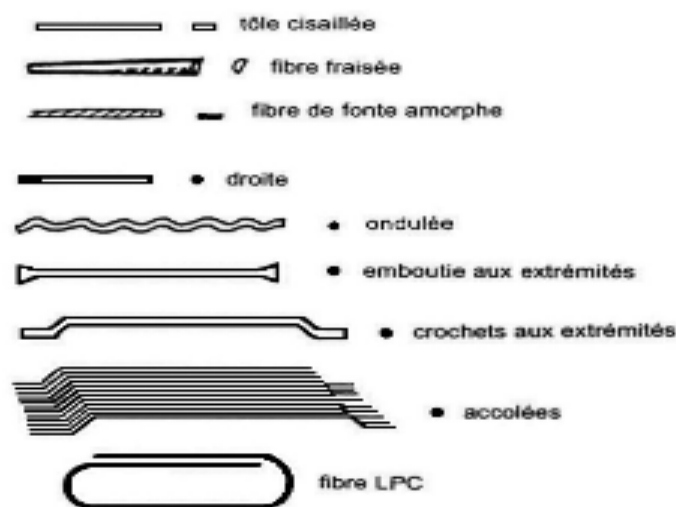


Figure I.5: les différents types de fibre d'acier (Yagoub, 2009)

Le tableau I.5 présente les avantages, inconvénients et le domaine d'application de la fibre d'acier

Tableau I.5 : Avantages, inconvénients et applications de la fibre d'acier ((Majumdar and Narayan Swamy, 1977) et (Yagoub, 2009)

Avantages	Inconvénients	Applications
<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance à la traction et à la flexion ; - Offre une bonne ductilité au béton (augmentation de la capacité de déformation) ; - Augmentation la résistance à l'usure, aux chocs et à la fatigue ; - Module d'élasticité élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> - Résiste mal au milieu acide ; - Risque de corrosion ; - Diminution de l'ouvrabilité du béton, 	<ul style="list-style-type: none"> - Les dallages, les sols industriels et de parkings et tabliers des ponts, etc... - Confection de pieux de fondation ; - Réaliser des bétons projetés ; - La réparation de revêtements de tunnels et de galeries ; - La réalisation de nombreux produits préfabriqués ; - La confection de mortier de réparation ou de scellement.

I.4.4. Fibres synthétiques organique :

I.4.4.1. Les fibres polypropylènes:

La fibre de polypropylène (cf. Figure I.6) est le matériau idéal dans les mélanges en béton pour diminuer le retrait plastique, les fissurations et augmenter les propriétés de la surface du béton. Ces fibres ne remplacent pas le renforcement structurel en acier mais elles peuvent remplacer les armatures qui sont utilisés uniquement pour empêcher les fissures de retrait plastique, et qui représentent un risque de corrosion (Yagoub, 2009)



Figure I.6: la représentation de la FPP de 6 ; 12 ; 19mm.(Najimi et al., 2009)

Le tableau I.6 présente les avantages, inconvénients et le domaine d'application de la fibre polypropylène(FPP)

Tableau I.6: Avantages, inconvénients et applications de la fibre polypropylène (Majumdar and Narayan Swamy, 1977) et (Yagoub, 2009)

Avantages	Inconvénients	Applications
<ul style="list-style-type: none"> - Améliore la cohésion à l'état frais ; - Réduit les fissurations due au retrait plastique ; - Ne se corrodent pas (ne rouillent pas) ; - Un bon allongement à la rupture qui augmente la ductilité du béton ; - Bonne résistance aux chocs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de l'ouvrabilité du béton ; - Un module d'élasticité relativement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bétons de dallages, chaussées et voiries, pistes d'atterrissage dans lesquels les fibres jouent un rôle d'anti-fissurant ; - Bétons et mortiers soumis aux chocs ; - Bétons nécessitant une forte cohésion à l'état frais ; - Bétons et mortiers projetés en couche mince ; - Bétons préfabriqués pour améliorer la manipulation des pièces au démoulage ; - Mortiers de chape et d'enduits.

I.5. Les caractéristiques et les propriétés des fibres :

Le tableau I.7 synthétise les différentes propriétés mécaniques et physiques des fibres, les fibres de carbone, d'acier et d'amiante sont les fibres les plus performantes en ce qui concerne les différentes caractéristiques mécaniques mais par contre ses fibres ont un allongement de rupture moins élevé. La fibre de polypropylène quant à elle a des caractéristiques physiques plus élevées et des propriétés mécaniques faibles, l'allongement de rupture de cette fibre est grand en ce qui favorise la ductilité du béton et donc la limitation des fissures due au retrait plastique et augmenter les propriétés de la surface du béton.

Tableau I.7 : caractéristiques et propriétés des fibres (Majumdar and Narayan Swamy, 1977)

Fibre	Diamètre (µm)	Densité (g/cm ³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (GPa)	Allongement de rupture (%)
Acier	5-500	7,84	200	1-3	3-4
Verre	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amiante	0,02-0,4	2,5-3,4	190	3-3,5	2,0-3,0
Polypropylène	20-200	0,9	3,5-5	0,45-0,76	15-25
Kevlar	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Carbone	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5

Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,9	16,0-20,0
Cellulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrylique	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polyéthylène	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3,0

I.6. Comportement de béton fibré à l'état frais :

Les fibres dans un mélange de béton agissent essentiellement comme des inclusions avec une grande surface. La géométrie de la fibre favorise le regroupement des fibres tandis que la grande surface réduit immédiatement l'eau libre disponible pour l'aptitude au travail du mélange frais. Les caractéristiques de fluidité et de compactibilité des mélanges de béton fibreux peuvent être grandement améliorées par l'incorporation de quantités appropriées de fines broyées ou de cendres combustibles ou par l'addition d'adjuvants liquides qui réduiraient le frottement interparticulaire entre les agrégats et les autres inclusions. Il faut veiller à ce que les mélanges soient compatibles avec la fibre et n'affectent pas les performances à long terme du composite (Majumdar and Narayan Swamy, 1977).

Les dispersions de fibres polymères ont également été utilisées avec succès pour améliorer la cohésion de la matrice et sa contrainte de rupture, la ductilité et la résistance de la liaison interfaciales matricielle-fibre. Outre la géométrie des fibres et le volume des fibres, la taille, la forme et la fraction volumique des granulats grossiers ont également une influence marquée sur l'interaction entre les fibres et l'agrégat et la rhéologie du mélange de fibres à l'état frais. Il est généralement avantageux d'augmenter la taille de la fibre à mesure que la taille d'agrégat augmente (Swamy, 1975).

I.7. Comportement de béton fibré à l'état durci :

I.7.1. Paramètres influençant le comportement mécanique :

Il est difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable (Fritih, 2009) .En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture.

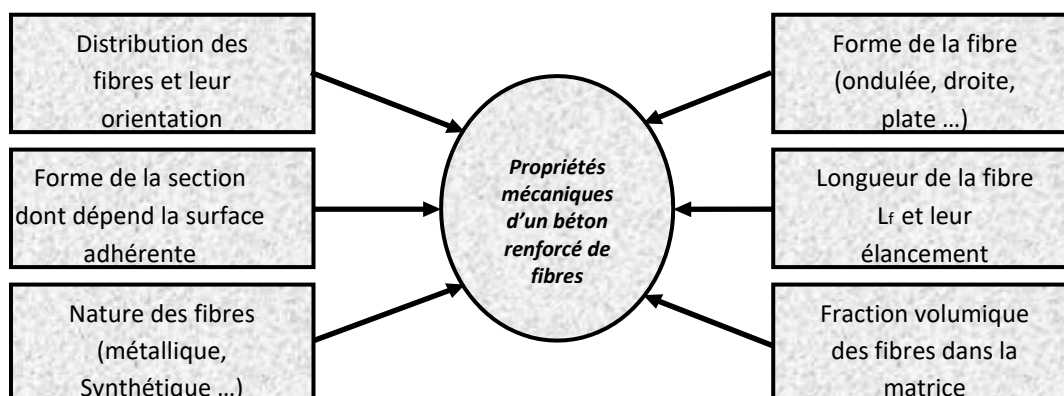


Figure I.7 : illustration des différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de la fibre (Fritih, 2009)

1.7.1.1. Longueur des fibres :

La longueur des fibres est un paramètre qui peut influencer sur l'efficacité du renfort et l'ouvrabilité du mélange. Un renforcement efficace de la matrice n'est assuré que si les fibres sont suffisamment longues afin de limiter à l'ouverture de fissures inter granulaires. De plus, les fibres doivent être ancrées le plus solidement possible dans la matrice pour couder effectivement les deux lèvres des fissures. Les fibres courtes seraient contournées, voire elles-mêmes source de rupture si la liaison fibre était de mauvaise qualité.

Pour les bétons de fibre, nous pouvons utiliser des microfibrilles afin d'améliorer la capacité portante et la ductilité des structures. Par contre, elles ne permettent pas d'améliorer la résistance intrinsèque du matériau. (Belhadj, 2015)

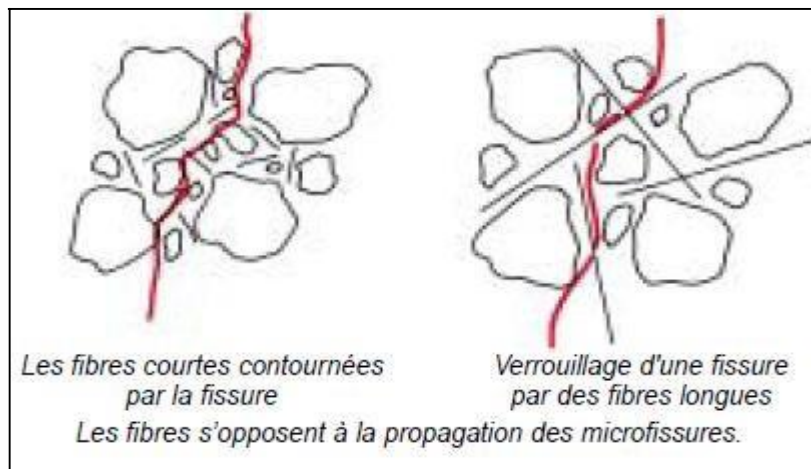


Figure I.8: Schéma de disposition des fibres. (Belhadj, 2015)

1.7.1.2. Orientation préférentielle des fibres :

Une fibre orientée parallèlement à la direction d'application des contraintes et perpendiculairement à la direction de propagation des fissures offre le meilleur comportement mécanique des bétons renforcés de fibre.

La vibration du béton de fibres favorise une bonne orientation bidimensionnelle des fibres, dans un plan horizontal, ce qui rend le matériau plus performant si cette orientation coïncide avec la direction des contraintes majeures, ainsi que l'utilisation de la table vibrante provoque une orientation préférentielle des fibres, perpendiculairement au sens de la vibration (Belhadj, 2015).

1.7.1.3. La taille fibre/granulats :

Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre des bétons de fibre est souvent difficile et a toujours posé de problème. Selon (Makhlouf, 2010) pour faciliter cette mise en œuvre, la composition du béton ne doit en aucun cas contenir des éléments dont la taille des granulats est supérieure au quart de la longueur de la fibre, (Belhadj, 2015) quant à lui il recommande que la dimension du plus gros granulats est le tiers de la longueur des fibres. Les bétons de sable se révèlent dans ce cas compatibles à l'inclusion des fibres (Makhlouf, 2010)

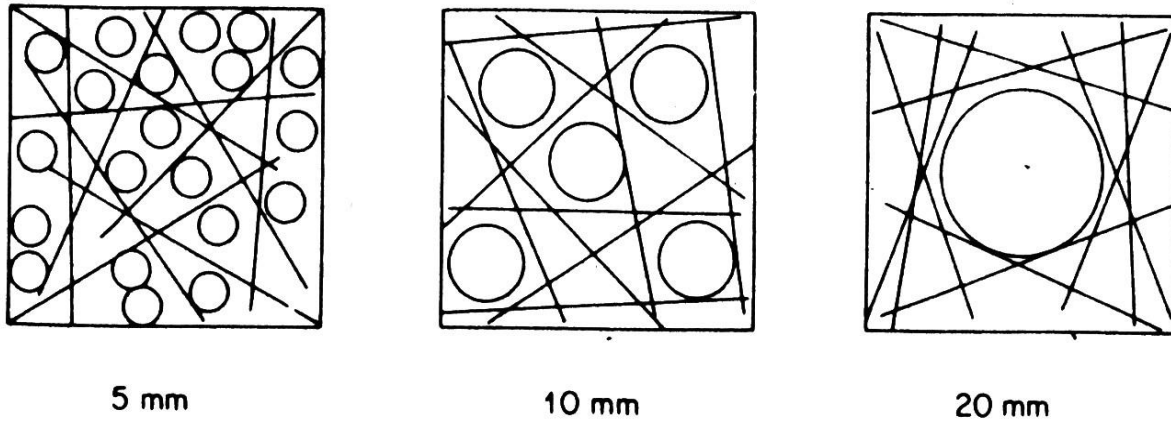


Figure I.9 : Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur de la fibre. (Makhlouf, 2010)

I.7.2. Comportement de béton fibré à la compression :

La figure I.10 montre le comportement d'un cylindre en béton soumis à un effort de compression. Pour un béton ordinaire, le comportement est linéaire élastique jusqu'à environ 30% de la résistance à la compression. Au-delà de cette phase dans les micro-défauts préexistants dans l'éprouvette de béton, des microfissures naissent et sont souvent la conséquence d'irrégularités dans le champ de compression dues à la présence d'inclusions plus rigides (les granulats) ou moins rigides (les pores) (Redaelli, 2009). Alors ces fissures se propagent parallèlement à l'effort de compression jusqu'à une contrainte d'environ 70-75% de la résistance à la compression. Pour des contraintes supérieures, les fissures commencent à interagir (Majumdar and Narayan Swamy, 1977). La rupture est atteinte par la formation d'un mécanisme global dont la forme dépend des caractéristiques du matériau, de sa géométrie (Redaelli, 2009).

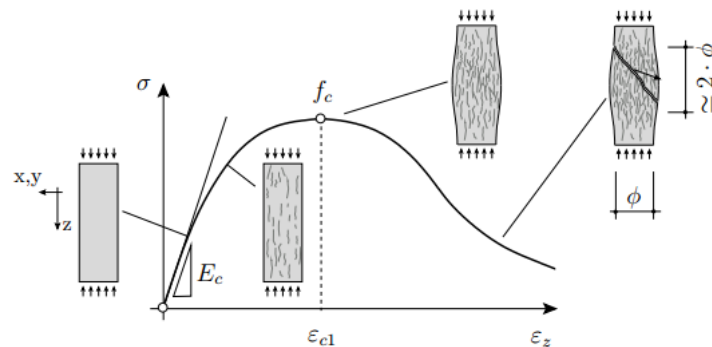


Figure I.10: Représentation du comportement d'un cylindre en béton soumis à un effort de compression (Redaelli, 2009)

La figure I.11 montre la courbe contrainte-déformation de compression dans un béton de fibres métalliques ayant un dosage en ciment de 500 kg/m^3 . La même allure que celui du béton sans fibre est obtenue avec un même comportement dans la phase élastique, sauf que la résistance à la compression finale (f_c) est de 10 à 15% plus importante. La différence des contraintes post-pic obtenue entre les deux dosages étudiés (2 et 3%) est de l'ordre 50 %.

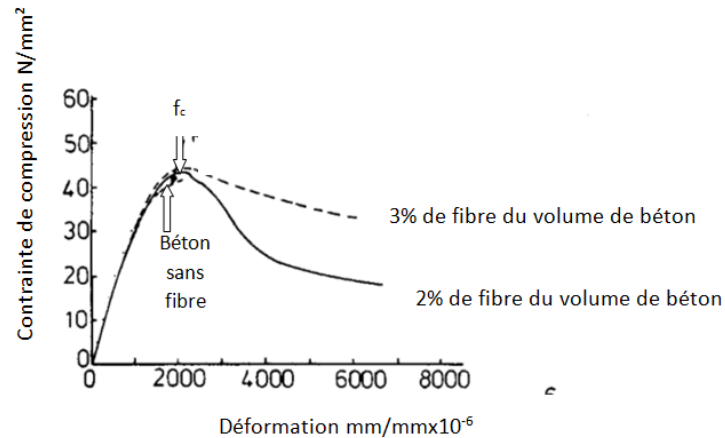


Figure I.11 : Courbe contrainte-déformation du béton en fibre d'acier (Majumdar and Narayan Swamy, 1977)

L'ajout de fibres n'influence que faiblement sur le comportement avant pic. Les valeurs de (f_c) et (ϵ_c) peuvent théoriquement augmenter, grâce au contrôle de la fissuration exercé par les fibres pendant la phase de propagation des fissures longitudinales. En revanche, l'ajout d'un taux important de fibres dans le mélange augmente le nombre de micro-défauts présents dans le matériau (Neves R. D and F. de Almeida, 2005). Les fibres influencent généralement de façon positive la ductilité en compression et augmentent l'énergie nécessaire à l'ouverture et au glissement le long des surfaces de rupture. Les fibres empêchent l'éclatement et la séparation des morceaux en béton fissuré et garantissent une résistance résiduelle importante. Cette efficacité des fibres peut être influencée par la direction de bétonnage comme dans le cas des agrégats, la présence des fibres peut entraîner la formation de vides à cause des effets locaux de la ségrégation (cf. Figure I.12) (Redaelli, 2009).

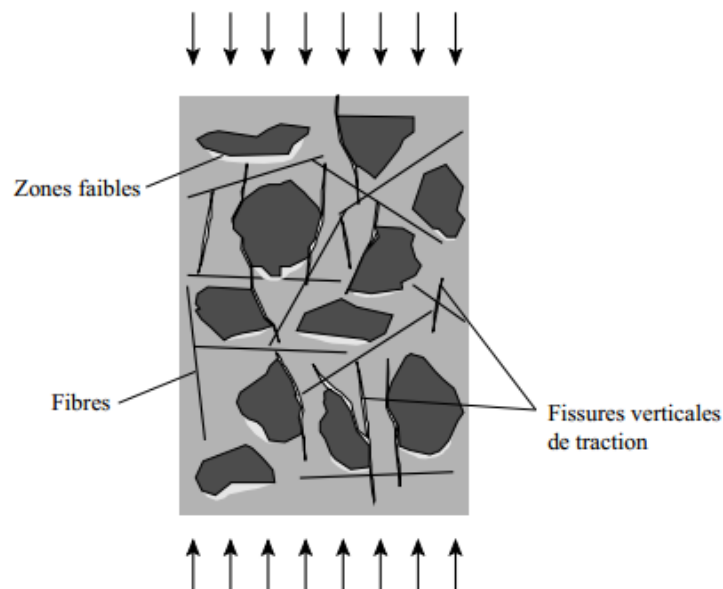


Figure I.12: Effet des fibres sur le contrôle des fissures en compression (Redaelli, 2009)

I.7.3. Comportement à la traction :

La figure I.13 (a) montre deux pièces en béton l’une sans fibre (I) et l’autre avec fibre (II) soumises à la traction, dans ce cas les fibres interviennent essentiellement dans la phase de fissuration assurant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements. Avant fissuration, les fibres n’ont aucune ou peu d’influence sur le comportement mécanique à la traction. Une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe réduisent la propagation des fissures. (Fritih, 2009)

La figure I.13 (b) montre la transformation du comportement fragile d’un matériau sans fibre en un comportement ductile d’un béton fibré ce qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

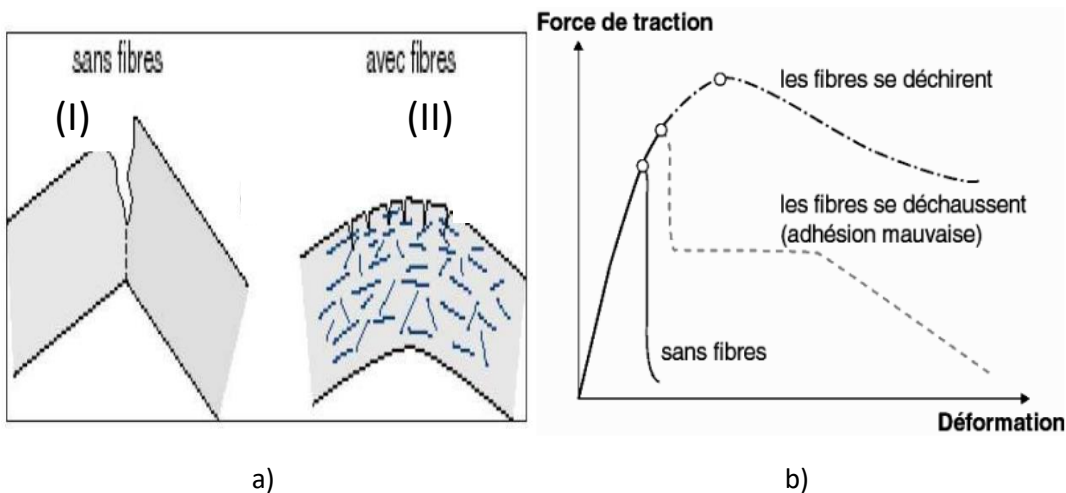


Figure I.13 : Illustration de l’apport du renfort par des fibres (Fritih, 2009)

La figure I.14 montre le mécanisme de couture des fibres qui assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice, contribue à l’amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures et confère ainsi une bonne ductilité au béton.

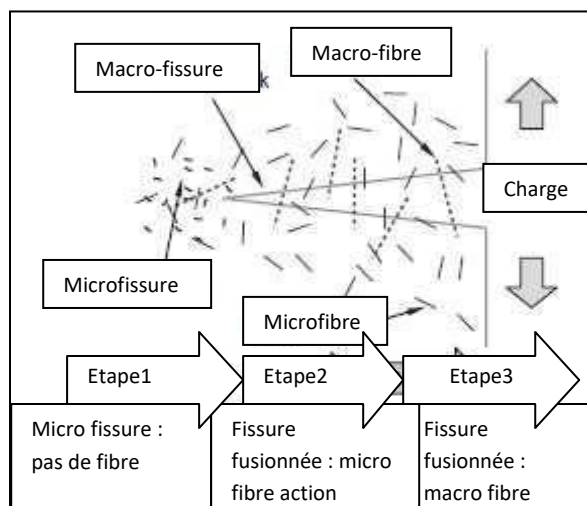


Figure I.14 : illustration de principe de couture des fibres à travers une fissure dans le béton (Fritih, 2009)

Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction. Le principe d’action des fibres se manifeste à deux échelles : le matériau et la structure.

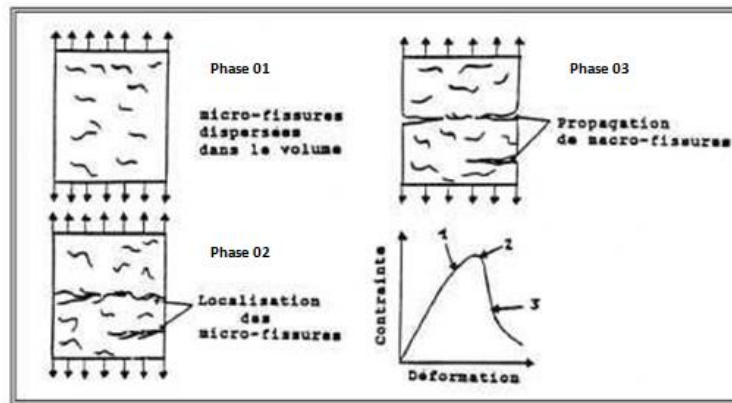


Figure I.15 : Processus de fissuration du béton (Fritih, 2009)

On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (cf. Figure I.15).

Phase 01 :

On observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice (forte porosité, microfissures dues aux phénomènes de retrait) et ceci avant toute action extérieure. Elle se caractérise par un endommagement inhérent au matériau. La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron. Durant cette phase, les fibres sont inactives. (Belhadj, 2015)

Phase 02 :

Elle correspond au développement des macro-fissures qui résultent de la coalescence des microfissures. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. (Belhadj, 2015)

Phase 03 :

On observe la propagation des macro-fissures qui conduit à la rupture totale du matériau (Belhadj, 2015)

I.7.4. Comportement au retrait plastique :

Au très jeune âge, le retrait plastique du matériau peut laisser apparaître des fissures. Cette problématique peut avoir des conséquences sur les propriétés du produit au cours du temps et sur la durabilité de l'ouvrage. Du fait de leur souplesse, les fibres polypropylènes (FPP) sont très réactives vis-à-vis des fissures potentielles. En effet, de faibles déplacements sur les fibres liés aux faibles ouvertures de fissures génèrent dans ces fibres des efforts suffisants pour s'opposer à la propagation des fissures. Cette efficacité est accrue par le fait que les (FPP) sont bien ancrées (Rossi, 2010)

I.7.5. Comportement au fluage :

Le fluage est un point à considérer vis-à-vis des aspects mécaniques. Le fluage d'un matériau caractérise le fait que celui-ci se déforme dans le temps, même sous des efforts constants. Les fibres métalliques, au regard des niveaux de contrainte atteints dans le béton ne subissent pas de fluage. Ce n'est pas le même effet pour la (FPP) du fait de leur faible module d'élasticité, les (FPP) vont

subir de très grands déplacements, correspondant à des grandes ouvertures de fissures, En conséquence, dans les structures âgées et fissurées en béton comportant des (FPP), les fissures sont beaucoup plus ouvertes qu'avec des fibres métalliques et la déformée de ces structures peut être trop importante (Rossi, 2010)

I.7.6. La tenue au feu :

Le béton est un matériau poreux qui renferme de l'eau, cette eau excédentaire est nécessaire à l'ouvrabilité du béton à l'état frais. Dans le cas d'élévation importante de la température, l'eau restée prisonnière se transforme en vapeur créant des contraintes internes pouvant entraîner un écaillage du béton en surface.

La tenue au feu est un aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés. Les fibres métalliques n'apportent pas un plus déterminant dans la tenue au feu des structures. Par contre, les microfibres de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique. Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu de s'échapper et de réduire la pression dans les pores. Ce phénomène constitue un moyen efficace pour limiter l'écaillage de surface d'un béton soumis à une élévation de température excessive (Rossi, 2010)



Figure I.16: Effet du feu sur les corps d'épreuve, sans fibres (à gauche, écaille), avec fibres polypropylènes (à droite, coloration) (Shuttle worth, 2001)

I.8. Conclusion :

L'utilisation des fibres de toutes natures dans plusieurs domaines en particulier dans la construction est de plus en plus pratiquée. Vu les problèmes de santé que présente les fibres d'amiante, leur substitution par des fibres végétales ou synthétiques est plus en plus utilisée. De ce fait, de récentes recherches sont en cours dans le but d'améliorer les propriétés des matériaux renforcés par ces fibres.

La nature des fibres utilisées est en relation avec leurs applications et les modes de mise en œuvre. Le choix des fibres dépend du rôle que l'on désire faire jouer. Il est certain qu'un rôle structural assez élevé associé à une grande durabilité et à une utilisation économique exige l'emploi de fibres de haut module d'élasticité comparé à celui de la matrice.

En général, on peut affirmer que les fibres fortes que certaines avec les modules d'élasticité beaucoup plus élevés que celles du ciment et du béton, si elles sont présentes dans la matrice et ayant des rapports d'aspect appropriés amélioreront les différentes caractéristiques mécaniques de la matrice non renforcée. L'amélioration peut être importante en fonction de la fibre, sa géométrie, son orientation et du dosage volumique dans la matrice et la fabrication du composite.

L'incorporation de la plupart des fibres discutées dans ce chapitre confère une pseudo-ductilité au béton après la fissuration de la matrice. Cette caractéristique de l'extraction des fibres confère à la matière un degré élevé des améliorations apportées au retrait, à la fatigue, de résistance aux chocs, ce qui modifie la nature de l'insuffisance fragile des matériaux cimentaires. Comme le cas au très jeune âge, du fait des faibles ouvertures des fissures pouvant se créer et du mauvais ancrage de certaines fibres dans la matrice peu compacte et adhérente. Les microfibres de polypropylène sont efficaces vis-à-vis de la propagation des fissurations due au retrait plastique ; Ce phénomène constitue un moyen efficace pour les propriétés de la surface de béton au cours du temps et sur la durabilité de l'ouvrage. Les microfibres de polypropylène sont recommandées aussi pour améliorer la tenue au feu des structures en béton pour limiter le phénomène d'écaillage de surface d'un béton soumis à une élévation de température excessive.

Le chapitre 2 sera consacré à une synthèse bibliographique sur tous les paramètres influençant le comportement du béton aux (FPP) à l'état frais, durci et ainsi que sur des paramètres de sa durabilité.

Chapitre II. Revue bibliographique.

II.1. Introduction :

Après avoir établi au chapitre précédent, le bilan des recherches sur le béton fibré et les différents types de fibre avec leurs comportements mécaniques et physiques sur la matrice de béton. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux travaux effectués par différents auteurs sur les différents paramètres influençant le comportement du béton fibré à l'état frais, durci, ainsi que sa durabilité en prenant en considération la nature, la forme géométrique, les dimensions et le dosage de la FPP. Les principaux résultats de cette étude nous ont servi à la définition de notre programme expérimental.

II.2. Essai sur le béton frais :

II.2.1. L'ouvrabilité par le cône d'affaissement :

II.2.1.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre d'ouvrabilité:

L'affaissement au cône d'Abrams est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés pour obtenir une indication sur l'ouvrabilité du béton frais. Voici un aperçu sur l'ajout de la FPP sur l'ouvrabilité pour les articles suivants:

(Toutanji, 1999) a déterminé l'ouvrabilité d'un béton préparé avec des FPP de 6 et 51 mm de longueur et avec un dosage volumique de 0,1 ; 0,3 et 0,5% correspondant à un dosage massique de 0,9 ; 2,7 et 4,5kg/m³. Les résultats obtenus montrent qu'avec l'augmentation de la fraction volumique de la FPP de 0,1 ; 0,3 et 0,5 %, une diminution respective de l'affaissement est de l'ordre de 14 ; 7 et 4,4 cm ainsi le béton qui était très plastique pour devenir ferme (cf. Tableau II.1)

Tableau II.1: Influence du dosage en FPP sur l'affaissement (Toutanji, 1999)

Longueur de la FPP (mm)	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Affaissement (cm)
6 et 51	0,1	0,9	14
	0,3	2,7	7
	0,5	4,5	4,4

(Najimi et al., 2009) ont étudié l'effet de la FPP de 6 ; 12 et 19 mm de longueur sur l'affaissement d'un béton avec un dosage massique de 2 kg/m³ de FPP. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de la FPP diminue l'ouvrabilité du béton normal de 7 cm aux alentours de 3 cm pour toutes les longueurs de la fibre de 6 ; 12 et 19 mm et donc le béton était plastique pour devenir ferme mais la longueur de la fibre n'a pas une grande influence sur ce paramètre pour un même dosage (cf. Tableau II.2)

Tableau II.2 : Influence de la longueur de la FPP sur l'ouvrabilité de béton (Najimi et al., 2009)

Mélange	Affaissement	
Béton sans FPP	7	
Mix 1	3.5	
Mix 2	3	
Mix 3	3	
Mix 1= FPP de 6mm	Mix 2 = FPP de 12mm	Mix 3 = FPP de 19mm

(Karahan and Atiş, 2011) ont étudié l'influence de la FPP sur l'ouvrabilité des bétons frais. Les fibres utilisées ont une longueur de 19 mm et un dosage volumique de 0 ; 0,05 ; 0,1 et 0,2 % correspondant à un dosage massique de 0 ; 0,45 ; 0,9 et 1,8 kg/m³. Les résultats montrent une réduction de l'affaissement des bétons fibrés avec l'augmentation de la teneur en fibres de 17cm pour le béton normal et le béton avec 0,45 kg/m³ à 16 et 14cm pour les dosages de 0,9 et 1,8 kg/m³ (cf. Tableau II.3)

Tableau II.3 : Influence du dosage en FPP sur l'ouvrabilité de béton (Karahan and Atiş, 2011)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Affaissement (cm)
A1	0	0	17
A2	0,05	0,45	17
A3	0,1	0,9	16
A4	0,2	1,8	14
A1 : Béton sans FPP		A2 : Béton avec 0,45 kg/m ³ de FPP	
A3 : Béton avec 0,9kg/m ³ de FPP		A4 : Béton avec 1,8kg/m ³ de FPP	

(Zhang and Li, 2013) ont étudié l'effet de la FPP sur l'ouvrabilité et la durabilité du composite de béton contenant 15% de la cendre volante et 6% de fumée de silice. Les auteurs ont utilisé des fractions volumiques de la FPP de (0 ; 0,06 ; 0,08 ; 0,1 et 0,12%) soit des dosages massiques de (0 ; 0,54 ; 0,72 ; 0,9 et 1,08 kg /m³) avec une proportion de fibre de 60% de longueur de 10-15mm et un pourcentage de 40% de longueur de 15-20 mm.

À partir de la figure ci-dessous, les auteurs ont montré que l'addition de la FPP diminue l'affaissement du composite de béton avec 15% de cendre volante et 6% de fumée de silice. Avec l'augmentation de la fraction volumique de la fibre, l'affaissement diminue progressivement de 22 cm pour un béton sans fibres à 20,3 cm pour un dosage de 0,12 % de la FPP (cf. Figure II.1)

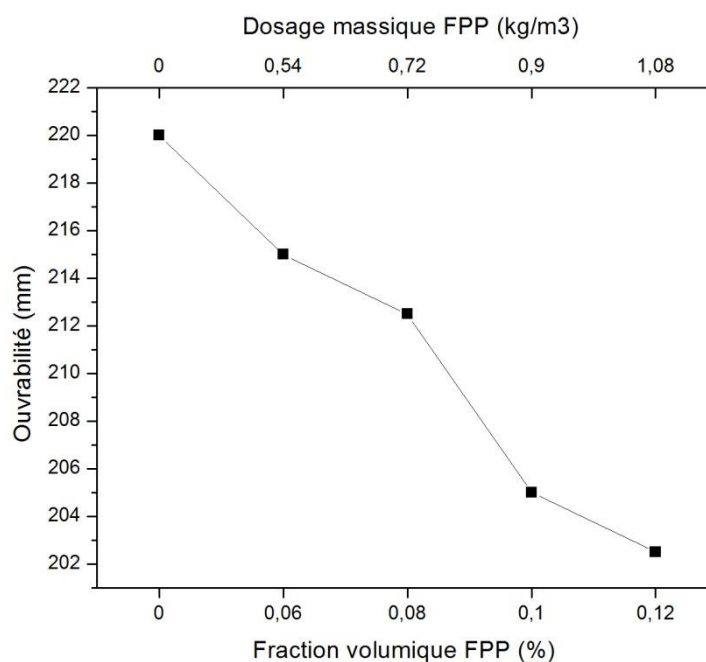


Figure II.1 : Effet de la fraction volumique de la FPP sur l'affaissement (Zhang and Li, 2013)

(Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015) ont effectué un test d'ouvrabilité pour un béton contenant de la fumée de silice et de la FPP de 12 mm de longueur avec l'ajout d'un super plastifiant. La fraction volumique de la fibre est de 0 ; 0,15 ; 0,30 et 0,45% correspondant à un dosage massique de 0 ; 1,35 ; 2,7 et 4,05 kg/m³. Les résultats montrent qu'il y a une chute de l'ouvrabilité pour le béton sans fibre de 17cm à 13 ; 11,5 et 8 cm pour un dosage de 1,35 ; 2,7 et 4,05 kg/m³ respectivement (cf. Tableau II.4)

Tableau II.4 : Influence du dosage en FPP sur l'ouvrabilité de béton (Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Affaissement (cm)
BO	0	0	17
3	0,15	1,35	13
4	0,30	2,7	11.8
5	0,45	4,05	8
BO : Béton sans FPP 3 : Béton avec 1.35kg/m ³ de FPP		4 : Béton avec 2.7 kg/m ³ de FPP 5 : Béton avec 4.05kg/m ³ de FPP	

(Saidani et al., 2016) ont mesuré l'affaissement au cône d'Abrams pour un béton normal avec différents dosages en microfibre polypropylène FPP de 6 mm de longueur ayant un dosage volumique de 0 ; 1 ; 2 et 4 % par rapport au volume du ciment correspondant à un dosage massique de 0 ; 1,7 ; 3,4 et 6,8 kg/m³ en fibre.

Les résultats montrent qu'il y a une certaine limite à l'ajout de la FPP au mélange. Avec un dosage de 1,7 et 3,4kg/m³ de fibre, l'affaissement était de 9,3cm pour un béton normal pour atteindre 2 et zéro cm et pour l'augmentation de ce dosage à plus de 6,8 kg/m³, le mélange semble être trop collant et relativement sec après avoir retiré le cône d'affaissement et donc cela attire l'attention sur la quantité d'eau qui a été aspirée par les fibres. En outre, les particules d'agrégats ont été séparées et non pas bien entourées par le mélange, comme on peut le voir sur la figure (cf. Figure II.2)

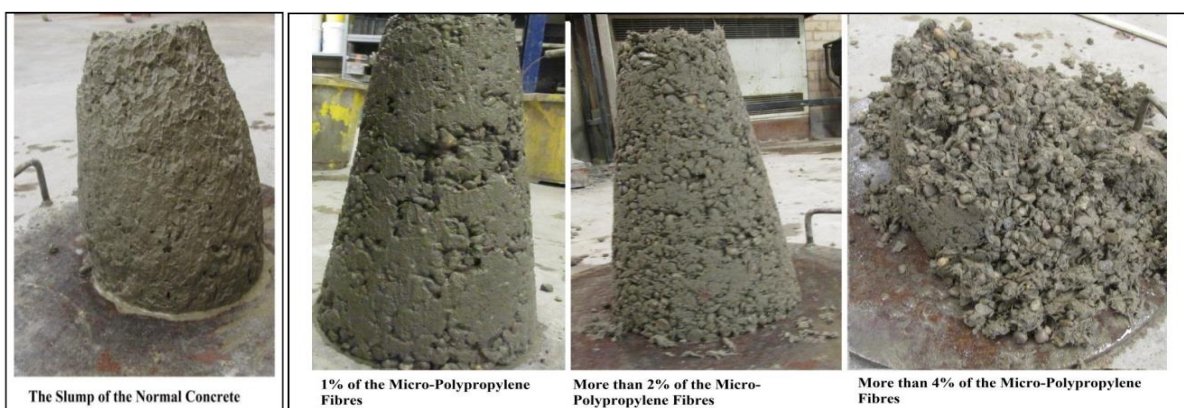


Figure II.2 : Etude de l'affaissement avec un pourcentage différent des FPP (Saidani et al., 2016)

II.2.1.2 Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre d'ouvrabilité :

L'ouvrabilité du béton de FPP dépend de trois acteurs principaux qui sont la géométrie des fibres, la granulométrie de la matrice et le volume de FPP dans le composite.

Les auteurs ont constaté que la FPP diminue l'affaissement de béton. D'une part, cette chute est en fonction de la longueur qui n'a pas une grande influence sur l'ouvrabilité et d'autre part, de la proportion volumique de la FPP introduite dans le béton. Une forte proportion en FPP entraîne une diminution rapide de l'ouvrabilité du béton du fait que l'incorporation des FPP dans le béton se traduit par une augmentation de la surface dans le mélange. Ainsi, pour augmenter l'ouvrabilité du béton en FPP, il faut ajouter un superplastifiant dans le mélange.

Tableau II.5: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre d'ouvrabilité de la FPP

Auteur	Longueur de la FPP (mm)	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Affaissement (cm)	Observation
(Toutanji, 1999)	6 et 51	0,1	0,9	14	On observe que le béton avec un réducteur d'eau était très plastique pour devenir ferme donc, il y a une influence du dosage en FPP sur l'ouvrabilité
		0,3	2,7	7	
		0,5	4,5	4,4	
(Najimi et al., 2009)	Sans FPP	0	0	7	La longueur de la fibre n'a pas une grande influence sur l'affaissement pour un même dosage en FPP
	6	0,22	2	3,5	
	12			3	
	19			3	
(Karahan and Atiş, 2011)	Sans fibre	0	0	17	On constate qu'il y a un rôle important pour le plastifiant qui est de 1% du poids de ciment sur l'ouvrabilité car le béton devient liquide mais avec l'augmentation du dosage en fibre, l'affaissement tendre à diminuer par rapport au béton sans FPP
	19	0,05	0,45	17	
		0,1	0,9	16	
		0,2	1,8	14	
(Zhang and Li, 2013)	Sans FPP	0	0	22	Les auteurs ont montré que l'addition de la FPP diminue progressivement l'affaissement du composite de béton avec 15% de cendre volante ; 6% de fumée de silice et d'un superplastifiant de 1,2% du poids de ciment
	60% de fibre de 10 à 15 mm et 40% de fibre de 15 à 20mm	0,06	0,54	21,5	
		0,08	0,72	21,3	
		0,1	0,9	20,5	
		0,12	1,08	20,3	
(Afroughsab et and Ozbakkaloglu, 2015)	Sans FPP	0	0	17	Les auteurs observent une diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation de la teneur en FPP malgré l'ajout de la fumée de silice et de superplastifiant au béton qui contient de la FPP
	12	0.15	1.35	13	
		0,30	2.7	11.8	
		0,45	4.05	8	

(Saidani et al., 2016)	Sans FPP 6	0	0	9,3	Il y a une certaine limite à l'ajout de la FPP au mélange et sans superplastifiant, l'utilisation de quantités supérieures peut entraîner des problèmes en ce qui concerne la maniabilité du béton, en raison de la surface élevée de ce type de fibre qui provoque la formation « d'oursins »
		0,19	1,7	2	
		0,38	3,4	0	
		0,76	6,8		

II.3. Essai sur le béton durci:

II.3.1. Résistance à la compression :

II.3.1.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre de compression :

L'essai de compression sur des éprouvettes en béton est le principal outil pour caractériser la qualité des produits en béton durci. Nous nous intéressons à l'ajout de la FPP dans le béton pour voir s'il y a une augmentation ou une diminution de cette résistance d'après les différentes études réalisées.

(Alhozaimy et al., 1996) utilisent différents dosages en FPP de (0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 et 0,3%) soit (0 ; 0,45 ; 0,9 ; 1,8 et 2,7 kg/m³) d'une longueur de 19 mm dans un béton. Les auteurs mesurent la résistance à la compression mesurée à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de 152mm de diamètre et 305mm de hauteur.

Les résultats montrent des phénomènes distincts : une chute de 4% de la résistance pour un dosage de 0,45 kg/m³ et une amélioration de 12 et 16% pour des dosages de fibre 0,9 et 1,8 kg/m³ par rapport au béton témoin (cf. Figure II.3)

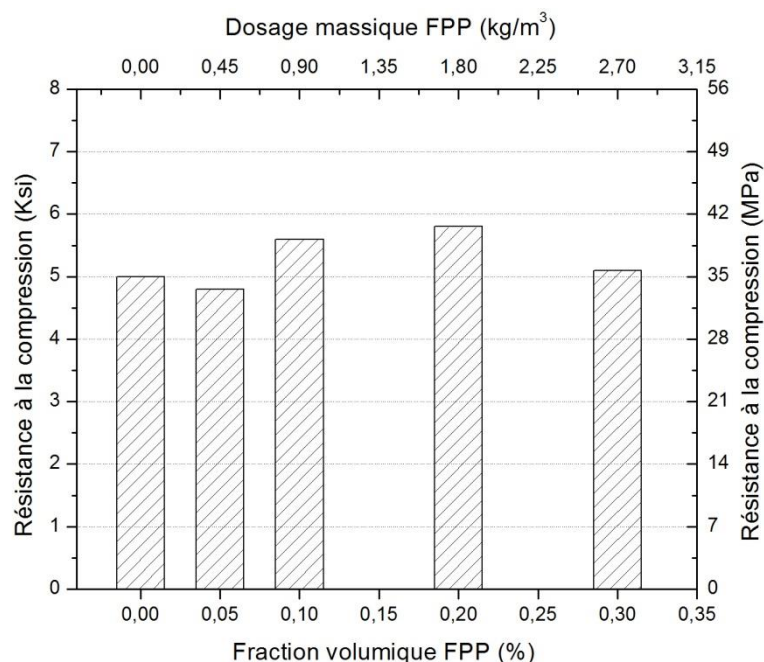


Figure II.3 : Résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours pour différentes fractions volumiques en FPP (Alhozaimy et al., 1996)

(Toutanji, 1999) a déterminé la résistance à la compression sur des échantillons de béton de 102 mm de diamètre et 204 mm de hauteur. Le béton a été préparé avec des FPP de 6 et 51 mm de longueur et d'un dosage volumique de 0,1 ; 0,3 et 0,5% correspondant à un dosage massique de 0,9 ; 2,7 et 4,5kg/m³. Les résistances obtenues pour les trois échantillons respectifs sont de l'ordre 32,4 ; 33,9 et 35 MPa, ce qui montre une légère augmentation de ce paramètre de 4,63 et 8,02% par rapport à la teneur en fibre. La même tendance d'augmentation de la résistance en fonction de la fibre a été obtenues pour les mêmes bétons amélioré avec de la fumée de silice (cf. Figure II.4)

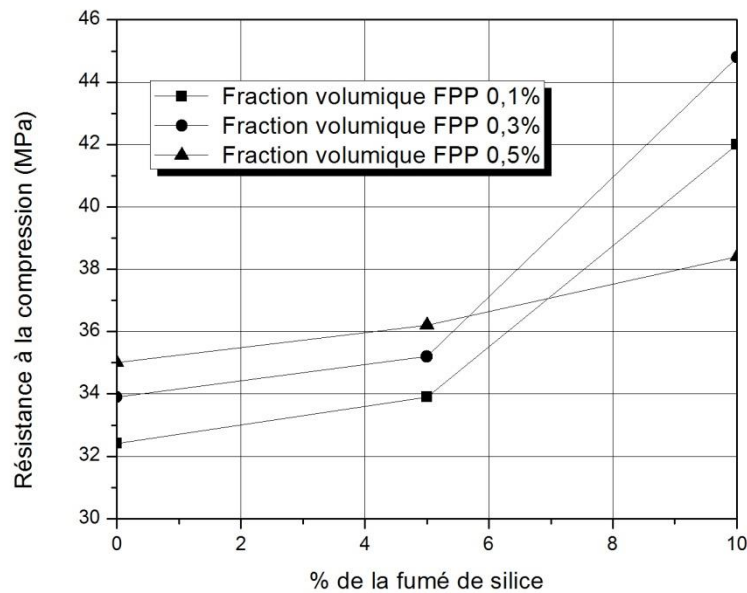


Figure II.4 : Résistance à la compression du béton avec des FPP à 28 jours (Toutanji, 1999)

(Najimi et al., 2009) ont étudié l'effet de l'ajout de la FPP sur la résistance à la compression. A cet effet, trois mélanges de béton sont constitués de FPP de 6 mm, 12 mm et 19 mm avec un dosage massique de 2 kg/m^3 . La résistance à la compression a été déterminée au bout de 7 ; 28 ; 56 et 90 jours.

D'après les résultats, pour toutes les échéances de différentes longueurs, on constate une chute de la résistance par rapport au béton témoin, la faible résistance a été signalée pour la plus petite longueur. A 28 jours, les résultats montrent que l'ajout de fibres polypropylène de 6 ; 12 et 19mm diminue légèrement la résistance à la compression de 13,51 ; 10,81 et 5,40 % par rapport au béton témoin. Par contre, il y a une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la longueur de la fibre (cf. Figure II.5)

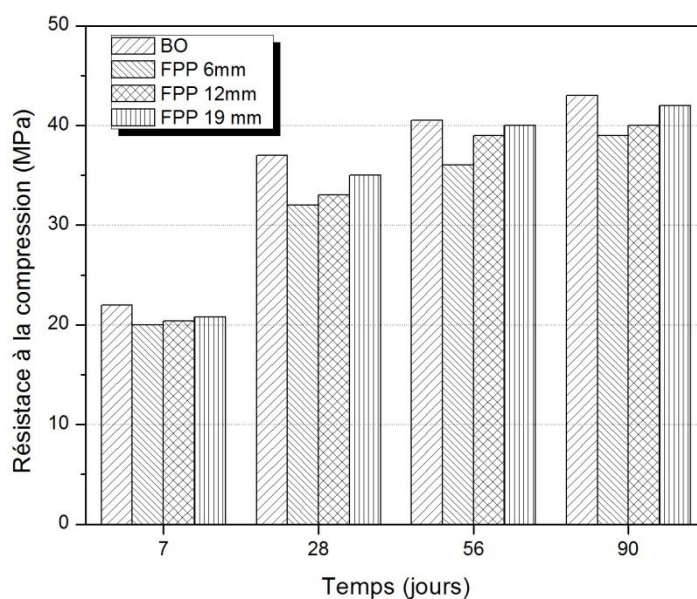


Figure II.5 : Résistance à la compression du béton avec des FPP par rapport à l'âge (Najimi et al., 2009)

(Karahan and Atiş, 2011) ont étudié l'influence de la FPP sur la résistance à la compression du béton pour des éprouvettes de 150mm de diamètre et une hauteur de 300mm. Les fibres utilisées dans le béton ont une longueur de 19 mm avec un dosage volumique de 0 ; 0,05 ; 0,1 et 0,2 % qui correspond à un dosage massique de 0 ; 0,45 ; 0,9 et 1,8 kg/m³

Les résultats du test de la résistance à la compression montrent une légère augmentation de 2,3% du béton contenant 0,45 kg/m³ de fibre puis une diminution de 1,9 et 2,99 % pour les autres dosages. Ceci peut être expliqué par la redistribution de la structure des vides dus à l'inclusion de la fibre et la présence de liaisons interfaciales (ITZ) entre les fibres, granulats et le ciment (cf. Tableau II.6)

Tableau II.6 : Résultats de l'essai de résistance à la compression à 28 jours (Karahan and Atiş, 2011)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)
A1	0	0	63,4
A2	0,05	0,45	64,9
A3	0,1	0,9	62,2
A4	0,2	1,8	61,5
A1 : Béton sans FPP		A2 : Béton avec 0,45 kg/m ³ de FPP	
A3 : Béton avec 0,9kg/m ³ de FPP		A4 : Béton avec 1,8kg/m ³ de FPP	

(Kakooei et al., 2012) ont effectué des essais de compression d'un béton constitué de granulats siliceux avec un dosage massique en FPP de (0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2kg/m³). Les fibres utilisées ont une longueur de 19 mm.

Selon les résultats des essais, la résistance du béton a augmenté proportionnellement avec l'augmentation des rapports volumiques des fibres polypropylènes, les plus fortes valeurs de la

résistance ont été observé dans les rapports volumiques de 1,5 et 2kg/m³ soit une augmentation de 48 et 52% par rapport au béton témoin (cf. Figure II.6)

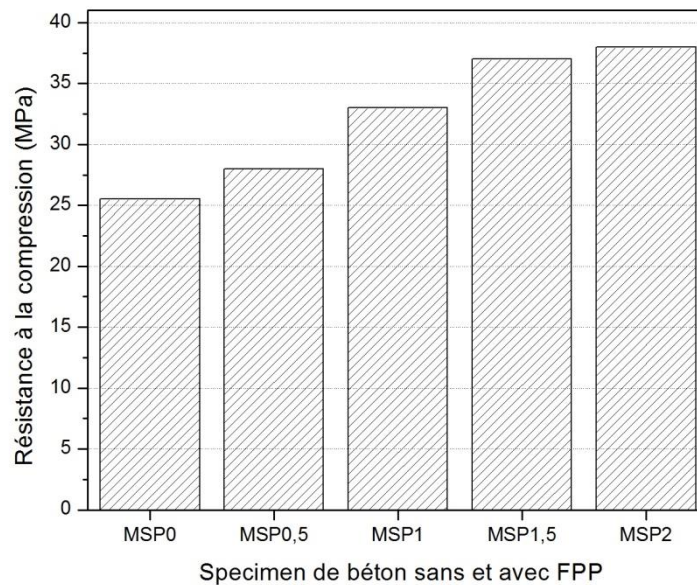


Figure II.6 : Résistance à la compression de différents échantillons de béton après 28 jours de durcissement (Kakooei et al., 2012)

(Bagherzadeh, 2012) a étudié l'influence de la FPP sur la résistance à la compression d'un béton ordinaire en utilisant des éprouvettes cubiques de 150 mm de côté. Les fibres utilisées ont une longueur de 6 et 12mm pour un dosage volumique de 0 ; 0,15 et 0,35 % du poids de ciment correspond à un dosage massique de 0 ; 0,71 et 1,7 kg/m³.

Le tableau ci-dessous montre une augmentation de la résistance à 28 jours pour les échantillons contenant 0,71 et 1,7kg/m³ de fibre de 12mm de longueur est de l'ordre de 11 et 18% par rapport au béton témoin, par contre, les échantillons contenant 0,71 et 1,7kg/m³ de fibre de 6mm de longueur est de l'ordre de 4 % et 5,8 %. A cet effet la longueur de la fibre de 12 mm a montré une meilleure performance par rapport à celle de 6 mm (cf. Tableau II.7)

Tableau II.7 : Résistance à la compression des bétons à différents jours (Bagherzadeh, 2012)

Code	7 jours (MPa)	14jours (MPa)	28jours (MPa)
LF1	10,5±0,07	18,2±0,14	22,2±0,13
LF2	11,2±0,20	18,8±0,04	24,8±0,06
LF3	12,0±0,30	19,1±0,08	26,3±0,14
LF4	10,7±0,23	18,4±0,12	23,1±0,30
LF5	10,9±0,16	18,7±0,61	23,5±0,28

LF1 : Béton sans FPP
 LF2 : Béton avec 0,71 kg/m³ de FPP de 12 mm de longueur
 LF3 : Béton avec 1,7kg/m³ de FPP de 12mm de longueur
 LF4 : Béton avec 0,71 kg/m³ de FPP de 6 mm de longueur
 LF5 : Béton avec 1,7 kg/m³ de FPP de 6 mm de longueur

(Vikrant et al., 2012) ont préparé des éprouvettes de béton de 100mm de diamètre et 200mm de hauteur sans et avec fibre ayant un dosage de 0,9kg/m³ pour les différentes longueurs (15 ; 20 et 24 mm). Les résistances à la compression obtenues à 28 jours augmentent de 2,6 ; 3,7 et 5,9% par rapport au béton sans fibre ; et donc, la fibre de 24 mm offre une meilleure amélioration par rapport aux autres (cf. Tableau II.8)

Tableau II.8: Résultats de la résistance à la compression pour les différents dosages en FPP (Vikrant et al., 2012)

Jours	Résistance à la compression (MPa)			
	0%	PF1	PF2	PF3
7	14,10	14,44	14,62	14,72
28	21,67	22,23	22,48	22,96
0% : Béton sans fibre		PF1 : 0,9kg/m ³ de FPP d'une longueur de 15 mm		
PF2 : 0,9kg/m ³ de FPP d'une longueur de 20 mm		PF3 : 0,9kg/m ³ de FPP d'une longueur de 24 mm		

(Rakesh et al., 2013) ont effectué un programme expérimentale pour voir l'influence de la FPP d'une longueur de 18mm sur la résistance à la compression d'un béton avec une proportion volumique de 0 ; 0,05 ; 0,1 et 0,15 % soit un dosage massique de 0 ; 0,45 ; 0,9 et 1,35 kg/m³. Pour les essais, les auteurs ont utilisé des éprouvettes cubiques de 150 mm de côté.

Les résultats montrent qu'il y a une augmentation de la résistance à la compression de 1,24 et 3,73% pour un dosage massique de 0,45 et 0,9 kg/m³ en fibre et une diminution de 0,41% pour un dosage massique de 1,35 kg/m³ (cf. Tableau II.9)

Tableau II.9 : Détails des mélanges de béton et leur résistance à la compression à 28 jours (Rakesh et al., 2013)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)
S-1	0	0	48,2
S-2	0,05	0,45	48,8
S-3	0,1	0,9	50
S-4	0,15	1,35	48

(Singh, 2014) a étudié l'influence des FPP de 9 mm sur la résistance à la compression d'un béton ordinaire. La teneur en fibres varie de 0 ; 0,13 ; 0,4 ; 0,66 ; 0,93 % soit un dosage massique de 0 ; 1,2 ; 3,61 ; 6 et 8,4 kg/m³ en fibre. Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cubiques de 150mm de côté.

Les résultats montrent que la résistance à 28 jours augmente de l'ordre de 1,23 ; 4,55 ; 4 et 2,44% avec les additions de 1,2 ; 3,6 ; 6 et 8,4kg/m³ de fibre par rapport au béton normal. D'après les résultats l'ajout de 0,4% qui correspond à 3,6 kg/m³ de fibres dans le béton présente un maximum d'avantages en termes de résistance à la compression (cf. Figure II.7)

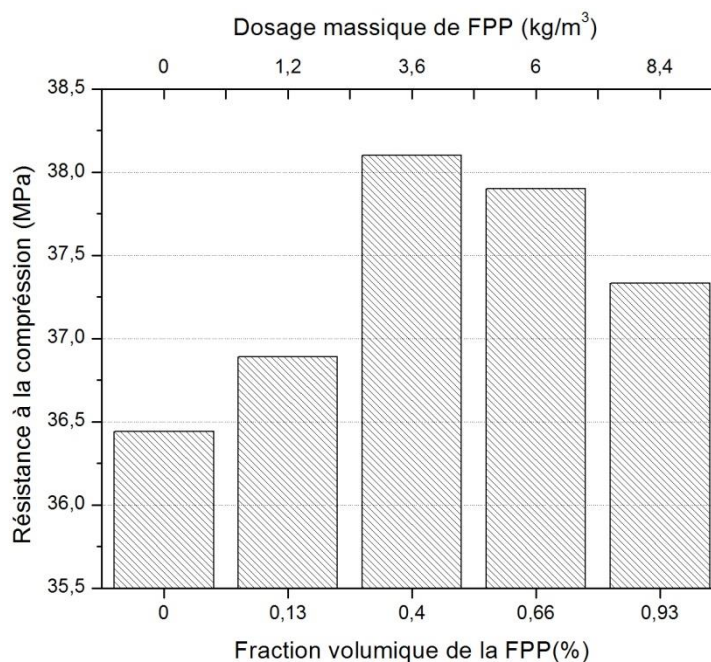


Figure II.7 : Mesure de la résistance à la compression à 28 jours (Singh, 2014)

(Saidani et al., 2016) ont montré que la meilleure ouvrabilité est obtenue avec un dosage en microfibre polypropylène de 6 mm de longueur est de 1 % du dosage volumique du ciment ou un dosage massique en fibre de 1,7 kg/m³. Les auteurs ont étudié l'influence de ce dosage sur la résistance à la compression d'éprouvette cubique de 100mm de côté. Les résultats obtenus sur 7 ; 14 et 28 jours nous montrent une légère chute de 1,3 ; 0,77 et 0,34% (cf. Tableau II.10)

Tableau II.10: Résultats de l'essai à la compression pour le béton avec FPP (Saidani et al., 2016)

Jours	Résistance à la compression (MPa)	
	Béton sans fibre	Béton avec 1,7 kg/m ³ de FPP
7	46	45,4
14	52	51,6
28	58,4	58,2

(Ardehana and Desai, 2012) cités par (Saidani et al., 2016) ont utilisé des FPP de 12mm de longueur pour le renforcement du béton. Les auteurs ont constaté que la résistance à la compression atteint sa valeur maximale aux alentours d'un dosage en fibre de 0,3% soit 2,7 kg/m³, puis elle commence à diminuer.

II.3.1.2. Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de compression :

La résistance à la compression est le premier paramètre recherché et employé dans le dimensionnement des structures. L'introduction des FPP dans la matrice des bétons peut engendrer une augmentation de la résistance selon (Alhozaimy et al., 1996), (Rakesh et al., 2013) pour les dosages de 0,9 et 1,8 kg/m³ ainsi que (Toutanji, 1999), (Kakooei et al., 2012), (Karahana and Atiş, 2011), (Bagherzadeh, 2012) et (Vikrant et al., 2012) ont constaté qu'il y'a une amélioration de ce

paramètre avec l'accumulation de la teneur en FPP et des meilleurs performances sont obtenus pour la FPP respectivement de 12mm et 24mm de longueur. Néanmoins (Najimi et al., 2009) et (Saidani et al., 2016) ont aperçue qu'il y a une diminution de la résistance à la compression surtout pour la fibre de 6mm de longueur.

Ces résultats trouvés dans la littérature montrent que la présence de la FPP a un effet positif sur la résistance à la compression jusqu'à un certain dosage au-delà duquel l'effet inverse sera constaté. Ce gain en résistance varie en fonction de type, de la longueur et du dosage de la FPP introduit dans le béton.

Tableau II.11: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de compression de la FPP

Auteur	Longueur de la FPP (mm)	Jours	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Observation
(Alhozaimy et al., 1996)	19	28	0	0	35	une amélioration pour les dosages de 0,9 et 1,8 kg/m ³ en FPP par rapport au béton témoin
			0,05	0,45	-1,4	
			0,1	0,9	+4,2	
			0,2	1,8	+5,6	
			0,3	2,7	+0,7	
(Toutanji, 1999)	6 et 51	28	0,1	0,9	32,4	une légère augmentation pour les dosages en FPP de 2,7 et 4,5kg/m ³
			0,3	2,7	+1,5	
			0,5	4,5	+2,6	
(Najimi et al., 2009)	Sans fibre	7	0	0	22	une chute de la résistance surtout pour la FPP de 6mm de longueur
			0,22	2	-2	
					-1,6	
	6 12 19	28	0	0	37	
			0,22	2	-5	
					-4	
	Sans fibre	90	0	0	43	
			0,22	2	-4	
					-3	
(Karahan and Atiş, 2011)	19	28	0	0	63,4	une augmentation pour un dosage de 0,45kg/m ³ puis une diminution
			0,05	0,45	+1,5	
			0,1	0,9	-1,2	
			0,2	1,8	-1,9	
(Kakooei et al., 2012)	19	28	0	0	25,5	une amélioration importante de la résistance avec l'augmentation de dosage en FPP pour le béton contenant des agrégats siliceux
			0,055	0,5	+2,5	
			0,11	1	+7,5	
			0,16	1,5	+11,5	
			0,22	2	+12,5	

(Bagherzadeh, 2012)	Sans fibre		0	0	10,5	une augmentation de la résistance avec l'augmentation du dosage en FPP et avec une meilleure performance pour les fibres de 12mm				
	6 12	7	0,08 0,19	0,71 1,7	+0,2 +0,7		+0,4 +1,5			
	Sans fibre	14	0	0	18,2					
	6 12		0,08 0,19	0,71 1,7	+0,2 +0,6		+0,5 +0,9			
	Sans fibre	28	0	0	22,2					
	6 12		0,08 0,19	0,71 1,7	+0,9 +2,8		+1,3 +4,1			
(Singh, 2014)	9	28	0 0,13 0,4 0,66 0,93	0 1,2 3,6 6 8,4	36,44 +0,45 +1,66 +1,46 +0,89	un maximum d'avantage en termes de résistance à la compression pour un dosage de 3,6 kg/m ³				
(Rakesh et al., 2013)	18	28	0 0,05 0,1 0,15	0 0,45 0,9 1,35	48,2 +0,6 +1,8 -0,2	le meilleur résultat est obtenu pour un dosage de 0,9 kg/m ³				
(Vikrant et al., 2012)	Sans fibre	7	0	0	14,1	la fibre de 24 mm offre une meilleure amélioration par rapport aux autres FPP				
	15 20 24		0,1	0,9	+0,34 +0,52 +0,62					
	Sans fibre	28	0	0	21,67					
	15 20 24		0,1	0,9	+0,63 +0,88 +1,36					
(Saidani et al., 2016)	Sans FPP	6	7	0	0,19	0	1,7	46 52 58,4	-0,6 -0,4 -0,2	une légère diminution de la résistance pour la fibre de 6mm par rapport au béton témoin

II.3.2. Résistance à la traction par flexion :

II.3.2.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre de traction :

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures. Et donc, l'objectif principal de la revue bibliographique sur le comportement de béton durci est de voir si la FPP a une meilleure influence sur la résistance à la traction par flexion pour les différentes recherches faites.

(Alhozaimy et al., 1996) ont conçu un programme expérimental pour étudier l'effet de la FPP d'une longueur de 19mm et avec différents dosages massiques en fibre de (0 ; 0,45 ; 0,9 ; 1,8 et 2,7 kg/m³) soit des fractions volumiques de (0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 et 0,3%) sur les propriétés de la résistance à la traction par flexion.

D'après la figure ci-dessous, Les résultats montrent que les FPP n'apportent pas d'amélioration appréciable pour les différents dosages sauf une légère amélioration de 12,12% est obtenue pour le dosage de 0,1% soit 0,9 kg/m³ en fibre par rapport au béton sans fibre (cf. Figure II.8)

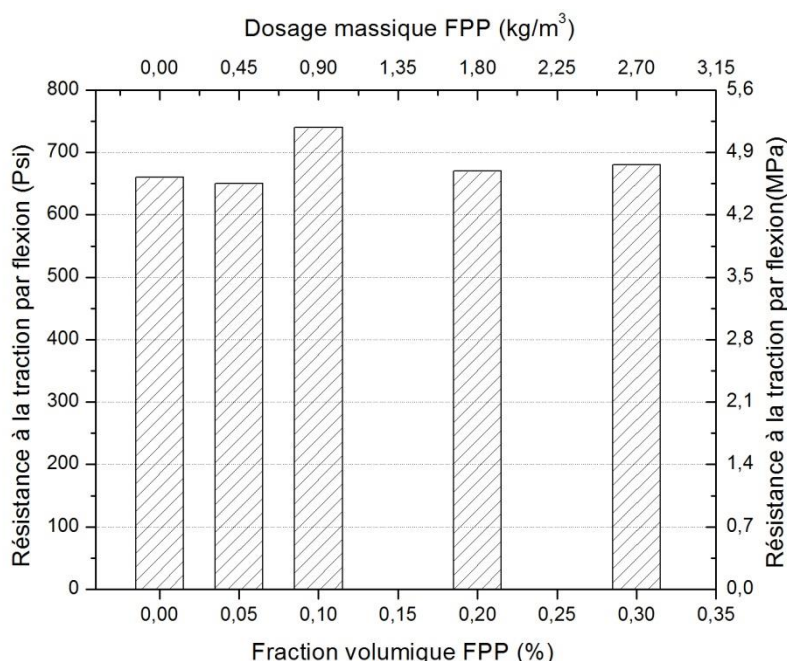


Figure II.8 : Résultat des essais de résistance à la traction par flexion du béton à différentes fractions volumiques (Alhozaimy et al., 1996)

(Najimi et al., 2009) ont étudié l'effet de l'ajout de la FPP sur la résistance à la traction par flexion par un essai à trois points. A cet effet, trois mélanges de béton sont constitués de FPP de 6; 12 et 19 mm avec un dosage massique de 2 kg/m³. La résistance obtenue a été mesurée à 7 ; 28 ; 56 et 90 jours.

Les auteurs ont constaté une augmentation de la résistance par rapport au béton témoin pour toutes les échéances et pour les différentes longueurs. A titre d'exemple à 28 jours, les résultats montrent une amélioration de 8 ; 12 et 16 % avec l'augmentation de la longueur de la fibre (cf. Figure II.9)

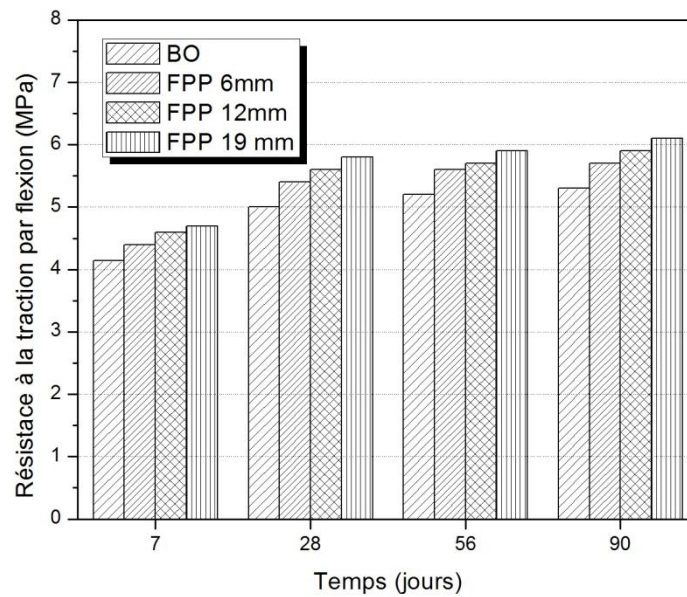


Figure II.9 : Résistance à la traction par flexion par rapport à l'âge (Najimi et al., 2009)

(Bagherzadeh, 2012) a étudié l'influence de la FPP sur la résistance à la traction par flexion en utilisant des éprouvettes de $100 \times 100 \times 500$ mm pour un essai à quatre points. Les fibres utilisées ont une longueur de 6 et 12mm et une fraction volumique de 0 ; 0,15 et 0,35 % du poids de ciment correspond à un dosage massique de 0 ; 0,71 et $1,7 \text{ kg/m}^3$ en fibre.

Les résultats montrent que les bétons renforcés de fibres ont montré une augmentation de la résistance comparée au béton témoin sans fibres.

Les bétons ayant une teneur en fibres de $1,7 \text{ kg/m}^3$ montrent clairement les meilleures performances par rapport aux bétons qui ont une teneur de $0,71 \text{ kg/m}^3$. Aussi l'amélioration pour le dosage élevé en FPP est de l'ordre de 30,77% et 23,07% respectivement par rapport aux longueurs de 12 et 6 mm, ceci indique que la fibre de 12 mm offre la meilleure résistance (cf. Figure II.10)

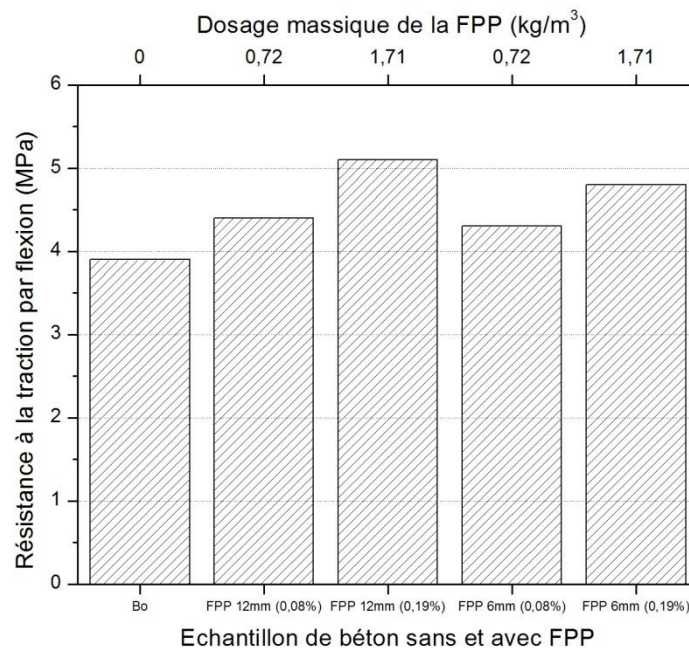


Figure II.10 : Résistance à la traction par flexion pour les différents bétons (Bagherzadeh, 2012)

(Murahari and Rama mohan Rao, 2013) cité par (Madhavi et al., 2014) ont testé des spécimens de 500 x 100 x 100 mm en utilisant un essai de traction par flexion à quatre points. Les auteurs constatent que la résistance augmente avec une teneur en fibre allant jusqu'à 0,3% soit 2,7 kg/m³ de fibre puis elle diminue.

(Singh, 2014) a étudié l'influence des FPP de 9 mm sur la résistance à la traction par flexion. La teneur en fibres varie de 0 ; 0,13 ; 0,4 ; 0,66 ; 0,93 % soit un dosage massique de 0 ; 1,2 ; 3,61 ; 6 ; 8,4 kg/m³. Les éprouvettes utilisées sont prismatiques et elles ont des dimensions de 700 x 150 x 150 mm.

Les résultats montrent que la résistance mécanique à 28 jours augmente respectivement de 7,29 ; 39,06 ; 51,05 et 46,35% avec l'addition de 0,13 ; 0,4 ; 0,66 ; 0,93 % de fibre par rapport au béton normal. D'après les résultats, l'ajout de 0,4% soit 6kg/m³ de fibres dans le béton présente la meilleure résistance à la traction par flexion (cf. Figure II.11)

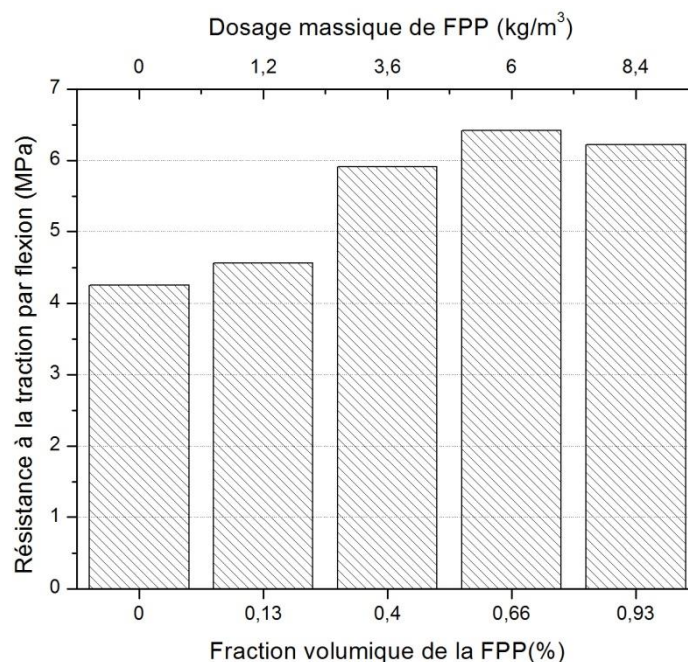


Figure II.11 : Résistance à la traction par flexion à 28 jours (Singh, 2014)

(Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015) ont fait une étude expérimentale pour étudier la résistance à la traction par flexion pour un béton ordinaire contenant de la fumer de silice et de la FPP de 12mm de longueur la fraction volumique de cette dernière varie de 0,15 ; 0,3 et 0,45% ce qui correspond à un dosage massique de 1,35 ; 2,7 et 4,05 kg/m³.

Les résultats sont observé à 7 ; 28 et 91 jours, notamment, les auteurs ont constaté que l'ajout de la FPP a un effet positif sur ce paramètre ce qui signifie une augmentation de la résistance à la traction par flexion à 28 jours de 9 ; 10 et 13% pour un dosage en fibre de 1,35 ; 2,7 et 4,05 kg/m³, respectivement. (cf. Figure II.12)

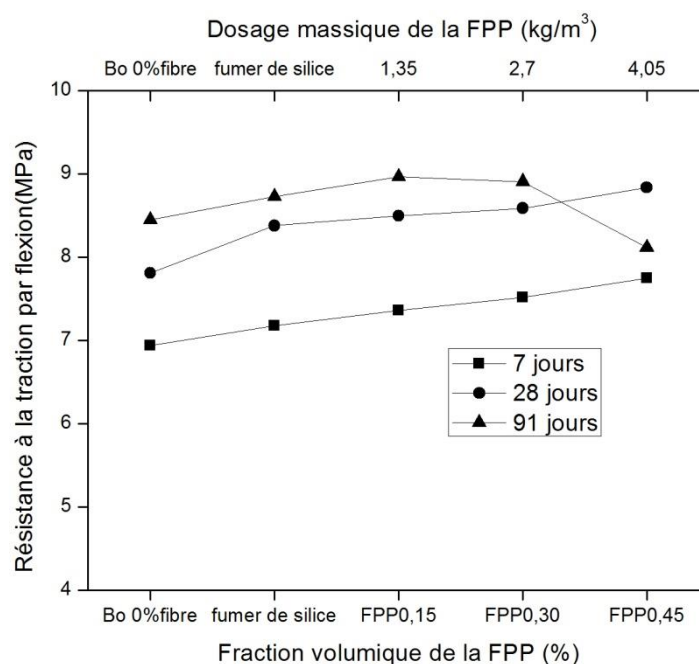


Figure II.12 : Résistance à la traction par flexion à 7, 28 et 91 jours (Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015)

II.3.2.2. Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de traction par flexion :

Le comportement du béton en traction par flexion est conditionné par la fissuration de la zone tendue. D'après (Alhozaimy et al., 1996) et (Singh, 2014) ont signalé une amélioration pour le dosage de $0,9 \text{ kg/m}^3$ et un sommet de gain en termes de résistance pour un dosage de 6 kg/m^3 . En ce qui touche la longueur de la FPP, (Najimi et al., 2009) et (Bagherzadeh, 2012) ont remarqué que la FPP de 12mm et 19mm donne une meilleure résistance par rapport à celle de 6mm.

Finalement, les auteurs ont tous noté qu'il y'a une amélioration de la résistance à la traction par flexion car la présence des FPP peut jouer un rôle de stabilisateur après rupture de la matrice de béton, les FPP s'opposent à l'ouverture des fissures. En effet, les bétons sans fibres se dégradent rapidement après fissuration et les bétons de FPP continuent à reprendre des efforts même après que la charge maximale soit atteinte.

Tableau II.12: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de traction par flexion de la FPP.

10	longueur (mm)	jours	Résistance à la traction par flexion (MPa)													Observation	
			Fraction volumique(%)	0	0,05	0,08	0,1	0,13	0,15	0,19	0,2	0,22	0,3	0,4	0,45		0,66
Dosage massique en fibre (kg/m ³)			0	0,45	0,71	0,9	1,2	1,35	1,7	1,8	2	2,7	3,6	4,05	6	8,4	
(Alhozaimy et al., 1996)	19	28	4,62	-0,07		+0,56				+0,07		+0,14					une meilleure amélioration pour le dosage de 0,9 kg/m ³ en FPP par rapport aux autres dosages
(Najimi et al., 2009)	6	7	4,15								+0,25						la fibre de 19mm donne une meilleure résistance par rapport aux autres longueurs
	12										+0,45						
	19											+0,55					
	6	28	5								+0,4						
	12										+0,6						
	19											+0,8					
	6	90	5,3								+0,4						
	12										+0,6						
	19											+0,8					
(Bagherzadeh , 2012)	6	28	3,9		+0,4				+0,9								une augmentation de la résistance avec l'augmentation du dosage en FPP pour les différentes longueurs, la meilleure performance c'est pour les FPP de 12mm de longueur
	12				+0,5				+1,2								

(Singh, 2014)	9	28	4,25				+0,3					+1,66		+2,17	+1,97	un maximum d'avantage en termes de résistance pour un dosage de 6kg/m ³
(Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015)	12	28	7,81				+0,7				+0,78		+1,03			Les auteurs observent une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en FPP

II.4. Essai de durabilité:

La durabilité est un facteur important dans le développement durable qui constitue l'une des préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil et donc l'étude de durabilité des bétons aux FPP fera l'objet de cette recherche bibliographique en considérant les essais de porosité, absorption capillaire, perméabilité à l'eau, diffusion des ions chlorure.

II.4.1. Essai d'absorption capillaire :

II.4.1.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre d'absorption capillaire:

(Karahan and Atiş, 2011) ont mesuré l'absorption capillaire d'un béton avec l'ajout de la FPP de 19 mm de longueur et avec un dosage volumique de 0 ; 0,05 ; 0,1 et 0,2 % qui correspond à 0 ; 0,45 ; 0,9 et 1,8 kg/m³ de fibre. Le niveau d'eau dans la cuve a été maintenu à environ 5 mm au-bas des échantillons au cours de cette expérience. La quantité d'eau absorbée a été mesurée durant les échéances suivantes : 1 ; 4 ; 9 ; 16 ; 25 ; 36 ; 49 ; 64 et 81 min.

Les résultats obtenus montrent que l'addition de la FPP au béton a augmenté le coefficient d'absorption capillaire de 4,76 ; 28,57 et 38,09% par rapport au béton témoin (cf. Tableau II.13)

Tableau II.13: Résultats de coefficient d'absorption capillaire par rapport à la teneur en FPP (Karahan and Atiş, 2011)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient d'absorption capillaire (10 ⁻⁶) (m/s ^{0,5})
A1	0	0	2,1
A2	0,05	0,45	2,2
A3	0,1	0,9	2,7
A4	0,2	1,8	2,9
A1 : Béton sans FPP		A2 : Béton avec 0,45 kg/m ³ de FPP	
A3 : Béton avec 0,9kg/m ³ de FPP		A4 : Béton avec 1,8kg/m ³ de FPP	

(Ramezianpour et al., 2013) ont réalisé un essai d'absorption capillaire sur des échantillons cubiques de 150 mm du béton avec des FPP de 12mm de longueur et d'un dosage massique de (0 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9 ; 2 et 4kg/m³). Les échantillons ont été séchés pendant 14 jours à 60°C dans l'étuve jusqu'à stabilisation de la masse. Le niveau d'eau a été maintenu à 5 mm au-dessus de la base de l'échantillon durant l'essai, la variation de la masse a été mesurée après 0 ; 12 ; 24 ; 36 et 72 h.

La figure ci-dessous montre que le coefficient d'absorption capillaire des bétons constitués de la FPP est inférieur au béton sans fibre, le dosage de 0,9kg/m³ en FPP donne la plus faible valeur. Ce résultat montre qu'il y a une réduction significative de la porosité capillaire (cf. Figure II.13)

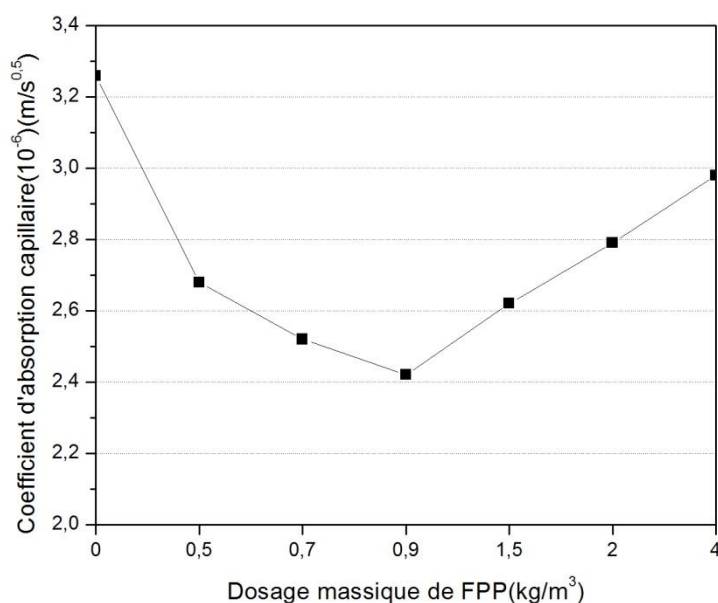


Figure II.13 : Coefficient d'absorption capillaire par rapport à la teneur en fibres (Ramezianpour et al., 2013)

(Söylev and Özturan, 2014) Ont effectué un essai d'absorption capillaire pour un béton ordinaire contenant un volume de 0,1% de la FPP de 13 mm de longueur soit un dosage massique de 0,9kg/m³. La mesure de ce paramètre a été prise à 6h, les résultats obtenus montrent que le coefficient d'absorption capillaire a augmenté par rapport au béton sans fibre (cf. Tableau II.14)

Tableau II.14 : Coefficient d'absorption capillaire pour le béton sans et avec fibre (Söylev and Özturan, 2014)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient d'absorption capillaire (10 ⁻⁶) (m/s ^{0,5})
Sans fibre	0	0	6,1
Avec fibre	0,1	0,9	7,8

(Sugandhini H. K. et al., 2016) ont déterminé le coefficient d'absorption capillaire d'un mélange constitué de (ciment, cendre volante et FPP de 12 mm). Trois échantillons cylindriques de 100 mm de diamètre et 50 mm de hauteur ont été préparé avec différents dosage volumique de FPP (0 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 et 0,8%) soit (0 ; 1,8 ; 3,6 ; 5,4 ; 7,2kg/m³). Les échantillons après durcissement de 28 jours sont placés dans une étuve à 50 ° C jusqu'à stabilisation de la masse. L'absorption sur les échantillons a été mesurée à 60 secondes, 5min, 10min, 20min, 30 min, 60min, 2h, 3h, 4h, 5h et 6h.

Les auteurs observent une réduction progressive de ce paramètre, moins de porosité capillaire jusqu'à la fraction volumique de 0,6% soit 5,4 kg/m³, puis une augmentation pour la fraction volumique de 0,8% (cf. figure II.14)

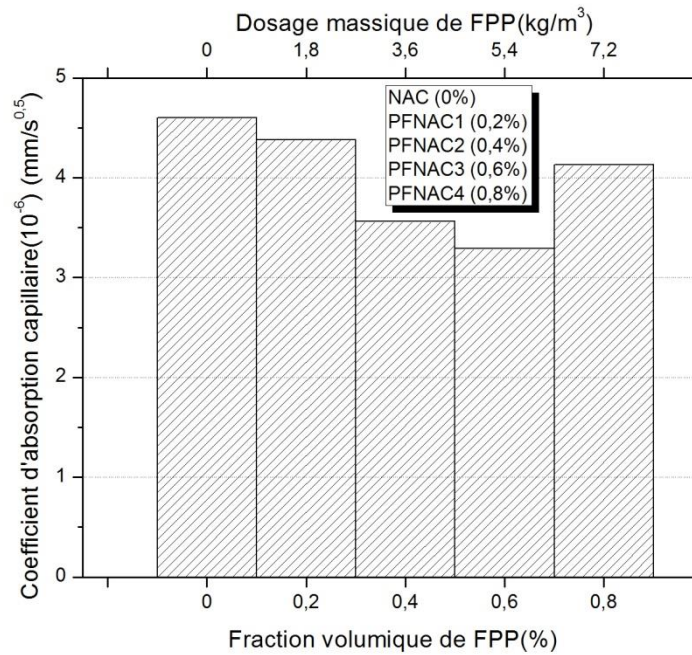


Figure II.14 : Résultat de l'essai d'absorption capillaire pour différent fraction volumique en FPP (Sugandhini H. K. et al., 2016)

II.4.1.2. Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre d'absorption capillaire :

(Ramezianpour et al., 2013) et (Sugandhini H. K. et al., 2016) constatent une diminution du coefficient d'absorption capillaire pour le béton avec FPP par rapport au béton sans fibre donc moins de porosité capillaire puis il commence à augmenter avec l'augmentation de la teneur en FPP mais (Karahan and Atiş, 2011) et (Söylev and Özturan, 2014) observent une augmentation de ce paramètre avec l'ajout de la FPP dans la matrice de béton.

Tableau II.15: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre d'absorption capillaire de la FPP.

Auteur	Longueur de la FPP (mm)	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient d'absorption capillaire (*10 ⁻⁶) (m/s ^{0,5})	Observation
(Karahan and Atiş, 2011)	19	0	0	2,1	Les auteurs observent une augmentation du coefficient d'absorption capillaire avec l'augmentation de la teneur en fibre
		0,05	0,45	2,2	
		0,1	0,9	2,7	
		0,2	1,8	2,9	
(Ramezani pour et al., 2013)	12	0	0	3,26	Il y'a une diminution du coefficient d'absorption capillaire jusqu'à un dosage massique de 0,9 kg/m ³ en FPP puis une augmentation
		0,055	0,5	2,68	
		0,08	0,7	2,5	
		0,1	0,9	2,42	
		0,16	1,5	2,62	
		0,22	2	2,78	
		0,44	4	2,98	
(Söylev and Özturan, 2014)	13	0	0	6,1	Les auteurs constatent une augmentation du coefficient d'absorption capillaire avec le dosage de 0,9kg/m ³
		0,1	0,9	7,8	
(Sugandhini H. K. et al., 2016)	12	0	0	4,6	Une réduction progressive de ce paramètre, jusqu'à la fraction volumique de 0,6% soit 5,4 kg/m ³ puis une augmentation pour la fraction volumique de 0,8%
		0,2	1,8	4,38	
		0,4	3,6	3,56	
		0,6	5,4	3,29	
		0,8	7,2	4,13	

II.4.2. Essai de porosité :

II.4.2.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre de porosité:

(Karahane and Atiř, 2011) ont montré que la quantité de pores a augmenté avec l'ajout de FPP de 19mm de longueur. La porosité a augmenté d'environ 6 ; 18 et 28% respectivement au dosage volumique de fibre de 0,05 ; 0,1 et 0,2 % qui correspond à 0 ; 0,45 ; 0,9 et 1,8 kg/m³ comparativement au mélange témoin sans fibre (cf. Tableau II.16)

Tableau II.16: Résultats de la porosité des bétons avec FPP (Karahane and Atiř, 2011)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Porosité (%)
A1	0	0	7,09
A2	0,05	0,45	7,51
A3	0,1	0,9	8,28
A4	0,2	1,8	8,97
A1 : Béton sans FPP		A2 : Béton avec 0,45 kg/m ³ de FPP	
A3 : Béton avec 0,9kg/m ³ de FPP		A4 : Béton avec 1,8kg/m ³ de FPP	

(Fallah and Nematzadeh, 2017) Pour étudier l'effet de la porosité sur les bétons contenant de la FPP. Les auteurs ont utilisé des FPP de 12mm de longueur et des fractions volumiques de (0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 et 0,5%) soit un dosage massique de (0 ; 0,9 ; 1,8 ; 2,7 ; 3,6 ; 4,5 kg/m³).

Les résultats obtenues montrent une diminution de la porosité de 4,9 ; 11,68 et 2,68% pour les bétons contenant 0,9 ; 1,8 ; 2,7kg/m³ de FPP, puis une augmentation de 2,26 et 2,76% pour les bétons contenant 3,6 ; 4,5 kg/m³ de FPP par rapport au béton témoin. L'utilisation de fraction volumique élevée en FPP conduit à l'agglomération de la FPP (phénomène d'oursin) dans les pores à l'intérieur de l'échantillon de béton, ce qui augmente la porosité (cf. Tableau II.17)

Tableau II.17: Influence de la teneur en FPP sur la porosité (Fallah and Nematzadeh, 2017)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Porosité (%)
Béton sans FPP	0	0	7,96
PP 0,1	0,1	0,9	7,57
PP 0,2	0,2	1,8	7,03
PP 0,3	0,3	2,7	7,77
PP 0,4	0,4	3,6	8,14
PP 0,5	0,5	4,5	8,18
PP 0,1 : béton avec 0,9 kg/m ³ de FPP		PP 0,2 : béton avec 1,8 kg/m ³ de FPP	
PP 0,3 : béton avec 2,7 kg/m ³ de FPP		PP 0,4 : béton avec 3,6 kg/m ³ de FPP	
PP 0,5 : béton avec 4,5 kg/m ³ de FPP			

II.4.2.2. Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre porosité :

(Karahan and Atiş, 2011) Constate une augmentation de la porosité avec l'ajout de la FPP de 19mm de longueur. En revanche (Fallah and Nematzadeh, 2017) montrent qu'il y a une diminution de la porosité avec l'ajout de la FPP de 12mm de longueur jusqu'à un certain dosage, suivi d'une augmentation avec l'utilisation de fraction volumique élevée en FPP ce qui conduit à l'agglomération de la FPP.

Tableau II.18: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de porosité de la FPP.

Auteur	Longueur de la FPP (mm)	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Porosité (%)	Observation
(Karahan and Atiş, 2011)	19	0	0	7,09	Les auteurs observent qu'il y a une augmentation de la porosité avec l'augmentation de la teneur en FPP
		0,05	0,45	7,51	
		0,1	0,9	8,28	
		0,2	1,8	8,97	
(Fallah and Nematzadeh, 2017)	12	0	0	7,96	Il y a une diminution de la porosité puis une augmentation par rapport au béton sans FPP, le meilleur résultat est obtenu pour un dosage de 1,8 kg/m ³
		0,1	0,9	7,57	
		0,2	1,8	7,03	
		0,3	2,7	7,77	
		0,4	3,6	8,14	
		0,5	4,5	8,18	

II.4.3. Essai de perméabilité à l'eau :

II.4.3.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre de perméabilité à l'eau :

(Suhaendi and Horiguchi, 2006) ont mesuré le coefficient de perméabilité à l'eau pour un béton contenant un dosage en FPP de (0 ; 0,25 et 0,5%) soit un dosage massique de 0 ; 2,25 et 4,5 kg/m³. Les fibres utilisées ont une longueur de 6 et 30mm. Les résultats obtenus indiquent une augmentation du coefficient de perméabilité à l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibre, de la longueur des fibres (cf. Tableau II.19)

Tableau II.19: Résultats d'essai expérimental de la perméabilité à l'eau de béton avec FPP (Suhaendi and Horiguchi, 2006)

Mélange	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient de perméabilité à l'eau ($K_w * 10^{-12}$) (m/s)
Béton sans FPP	0	0	2,38
P6-0,25	0,25	2,25	3,84
P6-0,5	0,5	4,5	15,5
P30-0,25	0,25	2,25	14
P30-0,5	0,5	4,5	17,9
P6-0,25 : Béton avec 2,25 kg/m ³ de FPP de 6 mm de longueur P6-0,5 : Béton avec 4,5 kg/m ³ de FPP de 6 mm de longueur P30-0,25 : Béton avec 2,25 kg/m ³ de FPP de 30 mm de longueur P30-0,5 : Béton avec 4,5 kg/m ³ de FPP de 30 mm de longueur			

(Ramezani pour et al., 2013) ont effectué un essai de pénétration d'eau sur des échantillons cubique de 150 mm de côté sous une pression de 5 bars pendant 72 h pour mesurer la perméabilité du béton avec des FPP de 12mm de longueur et un dosage massique de (0 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9 ; 2 et 4kg/m³).

Les résultats obtenus indiquent que toutes les profondeurs de pénétration d'eau pour les bétons fibrés sont inférieures à celle du béton témoin (cf. Figure II.15). En effet, la profondeur minimale de pénétration est de 7,7 mm pour l'échantillon contenant une teneur en fibres de 0,7 kg / m³ soit 30% inférieure à celle du béton sans fibre, ce résultat peut être probablement liée à l'effet de blocage des pores par les FPP au-delà de ce dosage une augmentation de la profondeur de pénétration d'eau est signalée, ce phénomène est dû à l'accroissement de la porosité induit par la forte addition de la FPP.

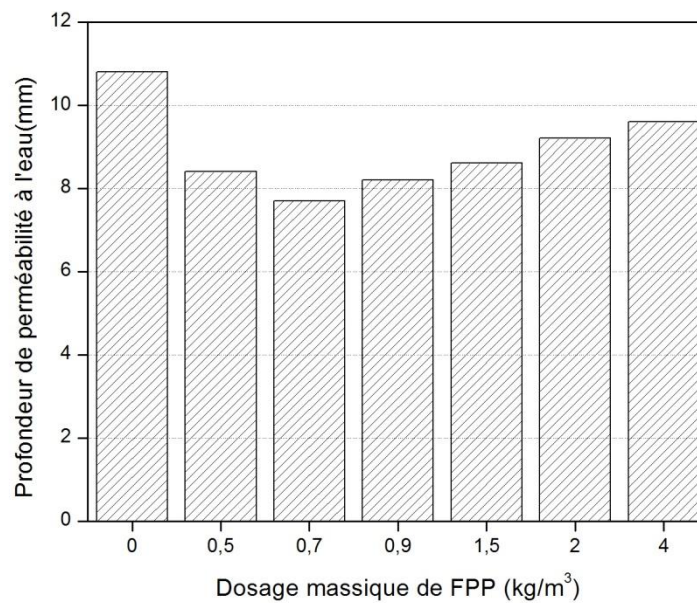


Figure II.15 : Profondeur de pénétration d'eau par rapport à la teneur en FPP pour l'essai de perméabilité à l'eau (Ramezani pour et al., 2013)

(Zhang and Li, 2013) ont utilisé une série d'éprouvettes de 175 ; 185 mm de diamètre avec une même hauteur de 150 mm pour déterminer la profondeur de pénétration de l'eau du composite de béton contenant 15% des cendres volantes et 6% de fumées de silice. Il a utilisé quatre fractions de volume de fibres différentes (0 ; 0,06 ; 0,08 ; 0,1 et 0,12%) soit des dosages massiques de (0 ; 0,54 ; 0,72 ; 0,9 et 1,08 kg/m³) avec une proportion de fibre de 60% de longueur 10-15mm et un pourcentage de 40% de longueur 15-20 mm. La pression de l'eau a été contrôlée à 35 bars. Le test devrait durer 24 h avant que les spécimens ne soient retirés de l'instrument.

Les résultats obtenus montrent que l'addition de la FPP diminue considérablement la profondeur de pénétration de l'eau. Comme la fraction de fibre de fibres de polypropylène est augmentée de 0 à 0,12%, la profondeur de pénétration de l'eau diminue de 20% de 8,7 mm à 7 mm (cf. Figure II.16)

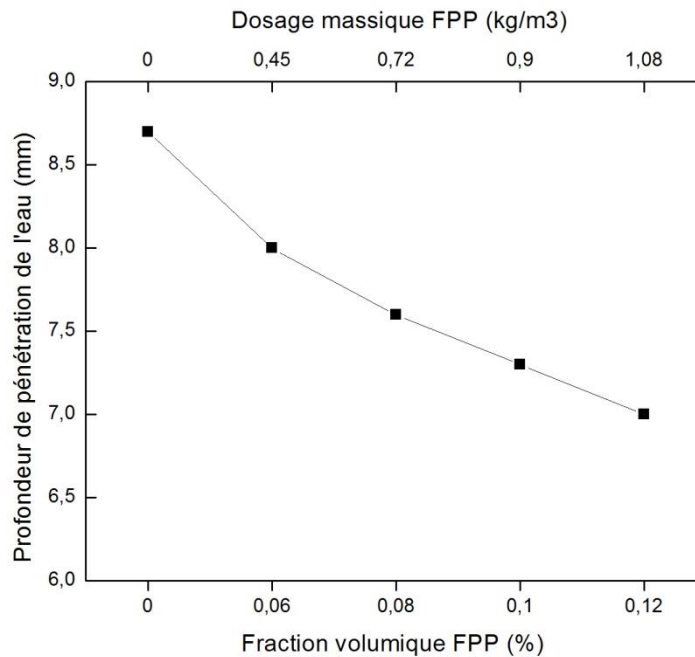


Figure II.16 : Effet de la fraction volumique de la fibre sur la profondeur de pénétration de l'eau (Zhang and Li, 2013)

(Sadiqul Islam and Gupta, 2016) ont déterminé la perméabilité à l'eau pour un béton contenant des FPP de 6mm de longueur et avec diverses proportions de (0 ; 0,2 ; 0,25 et 0,3%) en volume de béton soit (0 ; 1,8 ; 2,25 et 2,7kg/m³). Les résultats du tableau (cf. Tableau II.20) ont montré qu'avec l'addition des FPP, le coefficient de perméabilité à l'eau a augmenté avec l'accroissement de la teneur en fibre et c'est à cause de la quantité de FPP qui modifie la zone de transition interfaciale (ITZ).

Tableau II.20: Caractéristiques de la perméabilité à l'eau des bétons renforcés de FPP (Sadiqul Islam and Gupta, 2016)

Type de béton	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient de perméabilité à l'eau ($K_w * 10^{-12}$) (m/s)
F1	0	0	5,94
F2	0,2	1,8	14,89
F3	0,25	2,25	24,19
F4	0,3	2,7	30,65
F1 : Béton sans FPP		F2 : Béton avec 1,8 kg/m ³ de FPP	
F3 : Béton avec 2,25 kg/m ³ de FPP		F4 : Béton avec 2,7 kg/m ³ de FPP	

II.4.3.2. Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de perméabilité à l'eau :

(Suhaendi and Horiguchi, 2006) et (Sadiqul Islam and Gupta, 2016) observent une augmentation du coefficient de perméabilité à l'eau avec l'augmentation de la longueur et de la teneur volumique en FPP mais (Ramezani pour et al., 2013) et (Zhang and Li, 2013) constatent que la profondeur de pénétration d'eau pour les bétons avec FPP sont inférieures à celle du béton témoin liée à l'effet de blocage des pores par les FPP, ce phénomène est dû à la diminution de la porosité.

Tableau II.21: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de perméabilité à l'eau de la FPP

Auteur	Longueur de la FPP (mm)	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient de perméabilité à l'eau (K _w * 10 ⁻¹²) (m/s)	Profondeur de pénétration d'eau (mm)	Observation
(Suhaendi and Horiguchi, 2006)	Béton sans FPP	0	0	2,38		On observe qu'il y a une augmentation du coefficient de perméabilité à l'eau avec l'augmentation de la teneur et de la longueur de la FPP
	6	0,25	2,25	3,84		
		0,5	4,5	15,5		
	30	0,25	2,25	14		
		0,5	4,5	17,9		
(Ramezani pour et al., 2013)	12	0	0		11	les profondeurs de pénétration d'eau pour les bétons avec FPP sont inférieures à celle du béton témoin
		0,055	0,5		8,4	
		0,08	0,7		7,7	
		0,1	0,9		8,1	
		0,17	1,5		8,6	
		0,22	2		9,2	
		0,44	4		9,7	
(Zhang and Li, 2013)	60% de fibre de 10 à 15 mm et 40% de fibre de 15 à 20mm	0	0		8,7	La profondeur de perméabilité à l'eau diminue avec l'augmentation de la fraction volumique en FPP
		0,06	0,54		8	
		0,08	0,72		7,6	
		0,1	0,9		7,4	
		0,12	1,08		7	
(Sadiqul Islam and Gupta, 2016)	6	0	0	5,94		le coefficient de perméabilité à l'eau a augmenté avec l'accroissement de la teneur en FPP
		0,2	1,8	14,89		
		0,25	2,25	24,19		
		0,3	2,7	30,65		

II.4.4. Essai de diffusion des ions chlorure:

II.4.4.1. Les différents travaux effectués sur le paramètre de diffusion des ions chlorure:

(Antoni, 2003) a déterminé le coefficient de diffusion du chlorure dans un béton renforcé par les FPP de 12mm de longueur et d'un dosage volumique en fibre de 0 et 0,1% du béton soit un dosage massique de 0 et 0,9 kg/m³

Les résultats montrent que la pénétration des chlorures dans le béton augmente car la diffusion de chlorure pour le béton de FPP est d'environ 1,5 fois plus élevée comparée au béton sans FPP. Ceci peut être dû à l'ajout de FPP dans le béton provoquant un volume des vides dans le béton. La zone de transition interfaciale (ITZ) de la FPP et du béton pourrait également avoir provoqué une pénétration plus élevée du chlorure (cf. Tableau II.22)

Tableau II.22: Résultats de coefficient de diffusion des chlorures (Antoni, 2003)

Type de béton	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m ³)	Coefficient de diffusion (D *10 ⁻¹²) (m ² /s)	
Béton sans FPP	0	0	15,67	16,92
			17,39	
			17,69	
Béton avec 0,9 kg/m ³ de FPP	0,1	0,9	24,66	25,76
			25,91	
			26,71	

(Wang and Niu, 2011) ont mesuré la profondeur de pénétration de Cl⁻ durant des cycles de séchage-humidification sur des bétons avec cendre volante et des fibres d'une longueur de 19mm. Les dosages utilisés sont de 0 ; 0,1 ; 0,3 et 0,5 % par rapport au volume béton. Ce qui correspond à un dosage massique de 0 ; 0,9 ; 2,7 et 4,5kg/m³.

Les résultats présentés dans la figure (cf. Figure II.17) montrent que la profondeur de pénétration de Cl⁻ augmente progressivement avec le nombre de cycle séchage-humidification. La profondeur de pénétration correspondant au dosage 0,9 kg/m³ en fibre est la plus faible ; tandis que la plus forte profondeur correspond au dosage de la FPP 4,5kg/m³

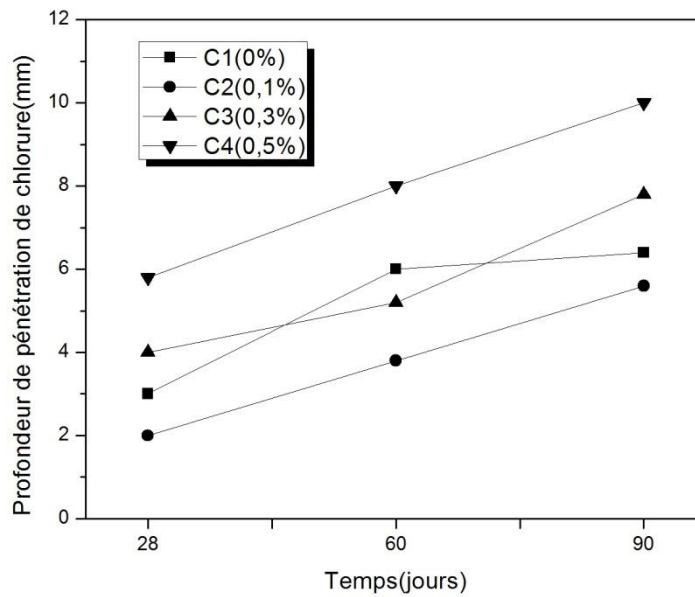


Figure II.17 : Influence de la teneur en FPP sur la profondeur de pénétration de Cl^- durant le cycle de séchage-humidification (Wang and Niu, 2011)

(Söylev and Özturan, 2014) ont étudié la profondeur de pénétration de Cl^- durant des cycles de séchage-humidification pour un béton ordinaire en faisant varier le rapport E/C qui est égale à 0,45 et 0,65 avec l'ajout de la FPP de 13mm d'une proportion volumique de 0,1% qui correspond à $0,9 \text{ kg/m}^3$. Les résultats montrent que la FPP diminue progressivement la pénétration de Cl^- avec l'augmentation de la profondeur pour E/C = 0,45 (cf. Figure II.18) et E/C=0,65 (cf. Figure II.19)

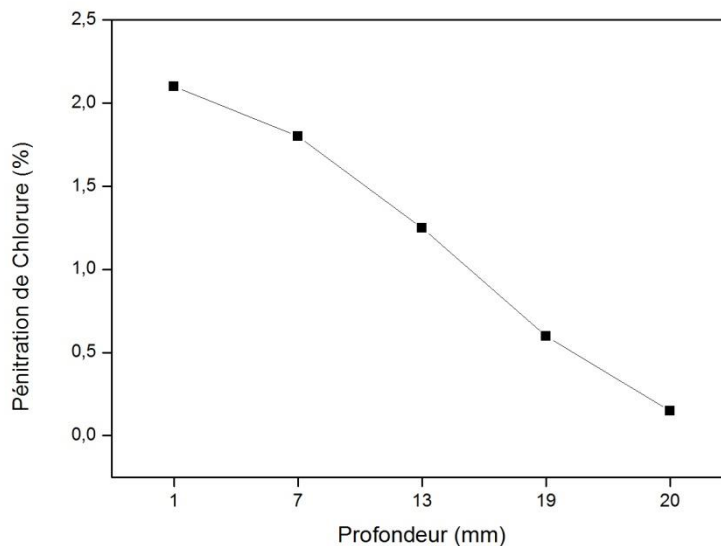


Figure II.18 : Influence de la teneur en FPP sur la profondeur de pénétration de Cl^- durant le cycle de séchage-humidification pour E/C=0,45 (Söylev and Özturan, 2014)

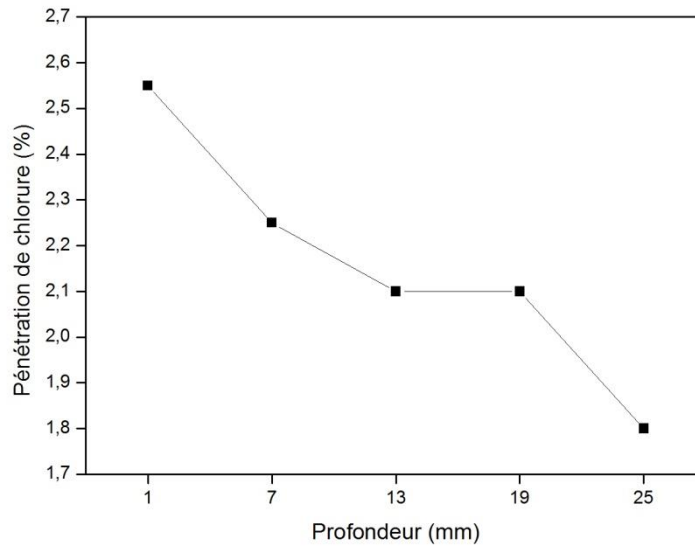


Figure II.19 : Influence de la teneur en FPP sur la profondeur de pénétration de Cl^- durant le cycle de séchage-humidification pour $E/C=0,65$ (Söylev and Özturan, 2014)

Les résultats du coefficient de diffusion pour les deux rapports E/C pendant 12 et 24 semaines sont présentés dans les tableaux suivants, les auteurs ont constaté qu'il y a une augmentation de ce paramètre pour $E/C= 0,45$ avec l'addition de la FPP par rapport au béton sans fibre. (cf. Tableau II.23).

Tableau II.23 : Résultats de coefficient de diffusion des chlorures pour $E/C=0,45$ (Söylev and Özturan, 2014)

Type de béton	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m^3)	Coefficient de diffusion (m^2/s)	
			12 semaines	24 semaines
Béton sans FPP	0	0	$1,15 \times 10^{-11}$	$4,36 \times 10^{-12}$
			$7,93 \times 10^{-12}$	$8,03 \times 10^{-12}$
Béton avec $0,9 kg/m^3$ de FPP	0,1	0,9	$7,93 \times 10^{-12}$	$8,03 \times 10^{-12}$

Pour le rapport $E/C = 0,65$, ils ont montré qu'il y a une diminution de coefficient de diffusion par rapport au béton témoin. (Cf. Tableau II.24).

Tableau II.24: Résultats de coefficient de diffusion des chlorures pour $E/C=0,65$ (Söylev and Özturan, 2014)

Type de béton	Fraction volumique en FPP (%)	Dosage massique en FPP (kg/m^3)	Coefficient de diffusion (m^2/s)	
			12 semaines	24 semaines
Béton sans FPP	0	0	$4,40 \times 10^{-11}$	$3,81 \times 10^{-11}$
			$3,46 \times 10^{-11}$	$1,01 \times 10^{-10}$
Béton avec $0,9 kg/m^3$ de FPP	0,1	0,9	$3,46 \times 10^{-11}$	$1,01 \times 10^{-10}$

II.4.4.2. Principaux renseignements tirés de la littérature du paramètre de diffusion des ions chlorure:

(Antoni, 2003) montre que la quantité ajoutée de la FPP dans le béton augmente la zone de transition interfaciale (ITZ) de la FPP et du béton ce qui augmente la quantité des pores dans le béton mais (Wang and Niu, 2011) et (Söylev and Özturan, 2014) observent une diminution de la profondeur de pénétration des ions de chlore pour un dosage de $0,9 \text{ kg/m}^3$ en FPP.

Tableau II.25: Récapitulatif de la synthèse bibliographique du paramètre de diffusion des ions chlorure de la FPP.

Auteur	Longueur de la FPP (mm)	Fraction volumique en FPP (%)		Dosage massique en FPP (kg/m ³)		Coefficient de diffusion (m ² /s)				Observation
(Antoni, 2003)	12	0		0		16,92				la pénétration des chlorures dans le béton augmente car la diffusion de chlorure pour le béton de FPP augmente
		0,1		0,9		25,76				
(Söylev and Özturan, 2014)	13	E/C=0,45	E/C=0,65	E/C=0,45	E/C=0,65	E/C=0,45	E/C=0,45	E/C=0,65	E/C=0,65	Les auteurs constatent une augmentation de ce paramètre pour E/C= 0,45 avec l'addition de la FPP par rapport au béton sans fibre par contre pour le rapport E/C =0,65, ils ont montré qu'il y a une diminution du coefficient de diffusion.
		/		/		12semaines	24semaine	12semaines	24semaines	
		0	0	0	0	1,15x10 ⁻¹¹	4,36 x10 ⁻¹²	4,40x10 ⁻¹¹	3,81x10 ⁻¹¹	
		0,1	0,1	0,9	0,9	7,93x10 ⁻¹²	8,03x10 ⁻¹²	3,46x10 ⁻¹¹	1,01x10 ⁻¹⁰	

II.5. Conclusion:

D'après la revue bibliographique effectuée, les FPP apportent au béton de nombreux avantages, notamment sur le comportement mécanique sous sollicitation de compression et de traction par flexion jusqu'à un certain dosage au-delà duquel l'effet inverse sera constaté. Ce gain en résistance mécanique varie en fonction de type, de la longueur et du dosage de la FPP introduit dans le béton.

La présence des FPP joue un rôle de stabilisateur après rupture de la matrice de béton, les FPP s'opposent à l'ouverture des fissures ce qui est important pour la durabilité de béton, pour les essais de durabilité, les auteurs constatent qu'il y a un effet de blocage des pores par les FPP pour des dosages inférieur à 1kg/m^3 . Au-delà de ce dosage une augmentation de la profondeur de pénétration d'eau et des ions chlorure est signalée, ce phénomène est dû à l'accroissement de la porosité induit par la forte addition de la FPP et l'augmentation de la zone de transition interfaciale (ITZ) de la FPP et du béton qui pourraient également avoir provoqué une pénétration plus élevée des ions de chlorure.

Il faut ajouter un superplastifiant dans le mélange pour augmenter l'ouvrabilité du béton qui contient une fraction volumique élevée de la FPP.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition de notre béton de FPP. Ainsi les essais et les méthodes utilisés dans notre programme expérimental.

Chapitre III. Matériaux et méthodes

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les matériaux utilisés pour la préparation de nos bétons ainsi que leurs caractéristiques. Les procédures relatives à la préparation et à la confection des bétons testés sont aussi présentées. Nous décrivons par la suite les méthodes expérimentales préconisées, nous citons l'affaissement au cône d'Abrams pour les bétons fibrés à l'état frais, la résistance à la compression et à la traction par flexion du béton à l'état durci et enfin les indicateurs de durabilité porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire et la perméabilité à l'eau.

Dans ce travail nous voulons tester l'apport de fibre polypropylène (FPP) sur le béton de référence étudié au laboratoire EOLE (Boukli Hacène S.M., 2010). Les dosages de la FPP sont choisis conformément aux recommandations des fiches techniques du produit.

III.2. Choix des matériaux :

III.2.1. Ciment :

Le ciment utilisé est de type CEM II/A 42.5 provenant de la société des ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent. Le ciment est composé de 85% de clinker ; 3% de gypse, 10% de pouzzolane et de 2% de calcaire sableux.

III.2.2. Granulats :

Pour la composition des bétons étudiés, nous avons utilisé les granulats concassés provenant de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) située dans la wilaya de Tlemcen. Ces granulats calcaires concassés sont commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/3, gravillon 3/8 et graviers de classes 8/16, 16/25.

III.2.3. Eau de gâchage :

Pour la confection des différents bétons, l'eau utilisée est l'eau de robinet distribuée par le réseau du service public de la Daïra de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen.

III.2.4. Fibre polypropylène :

Les FPP utilisées sont de type BM12, fabriqué par la société Belgian fibers company et leurs caractéristiques sont consignées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Les caractéristiques des FPP de type BM 12.

Couleur	Blanche
Longueur	12 mm
Densité	0.91 g/cm ³
Point de fusion	170°C
Résistance à la traction	300-400 N/mm ²
Résistance au milieu chimique	Bonne

III.2.5. Adjuvant :

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser un adjuvant commercialisé par le groupe des sociétés HASNAOUI (Sidi Bel Abbès), cet adjuvant est conforme à la norme (NF EN 934-2, 2012). C'est un superplastifiant pour améliorer l'ouvrabilité du mélange, il est désigné sous l'appellation « TEK–SUPERFLOW 2000 R ». Les propriétés physiques de ce superplastifiant sont résumées dans le tableau III.2

Tableau III.2: Caractéristiques du superplastifiant « TEK – SUPERFLOW 2000 R » (Belaidi A. Brix A., 2014)

Etat	Liquide
Couleur	Brune
Densité à 20° C	1,17 ±0,3 %
PH à 20°C	9,5±1
Teneur en chlorures	1%
Extrait sec	35% ±2%



Figure III.1 : Photos sur les matériaux utilisés dans la préparation de nos bétons.

III.3. Propriétés des matériaux utilisés:

Les matériaux que nous allons utiliser pour préparer nos béton doivent être conformes en premier lieu aux normes en vigueur et en second lieu ayant des propriétés proches de ceux du béton de référence (Boukli Hacène S.M., 2010)

III.3.1. Masses volumiques des granulats utilisés:

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont déterminées selon la norme (NF EN 12620, 2008)(cf. tableau III.3).

Tableau III.3 : Masses volumiques des granulats utilisés

Granulats utilisés	Mv app. (kg/m ³)	Mv abs. (kg/m ³)
Sable (0/3)	1488	2631
Gravillon (3/8)	1420	2586
Gravier (8/16)	1391	2564
Gravier (16/25)	1342	2542

D'après les résultats obtenus, les masses volumiques (apparente et absolue) répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620 qui impose une masse volumique apparente comprise entre 1300 kg/m³ et 1600 kg/m³ et une masse volumique absolue comprise entre 2500 kg/m³ et 2700 kg/m³.

III.3.2. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique consiste à tamiser une masse des granulats sur une série de tamis. Les refus sur chaque tamis sont pesés pour en déduire les tamis. Cela permettra d'analyser la distribution dimensionnelle des grains de l'échantillon et de tracer la courbe granulométrique. L'analyse granulométrique est fait conformément à la norme (NF EN 933-1, 2012).

➤ Sable (0/3) :

Tableau III.4 : Analyse granulométrique du sable 0/3

Nature de l'échantillon: Sable			Classe granulaire d/D: 0/3	
Masse sèche: M= 1kg ≥ 0,2 D (D en mm)			Procédé utilisé: Tamisage par voie sèche	
Ouverture de Tamis (mm)	Masse des refus Mi(g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés (%) Pr=(Mc/M)*100	Pourcentage des Tamis cumulés (%) Pt=100-Pr
5	0	0	0	100
2,5	288,4	288,4	28,70	71,29
1,25	131,8	420,2	41,81	58,18
0,63	245,2	665,4	66,22	33,77
0,315	108,0	773,4	76,97	23,02
0,16	37,6	811,0	80,71	19,28
0,08	36,0	847,0	84,29	15,70
Fond	157,8	1004,8	100	0

➤ Gravillon (3/8) :

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du gravillon 3/8

Nature de l'échantillon: Gravillon			Classe granulaire d/D: 3/8	
Masse sèche: M=1,6 kg ≥ 0,2 D (D en mm)			Procédé utilisé: Tamisage par voie sèche	
Ouverture de Tamis (mm)	Masse des refus Mi(g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés (%) Pr=(Mc/M)*100	Pourcentage des Tamis cumulés (%) Pt=100-Pr
12,5	0	0	0	100
10	14	14	0,87	99,12
8	112	126	7,88	92,11
6,3	446	572	35,79	64,20
5	550	1122	70,21	29,78
4	334	1456	91,11	8,88
3,15	80	1536	96,12	3,88
2,5	30	1566	97,99	2,00
2	6	1572	98,37	1,62
Fond	26	1598	100	0

➤ Gravier (8/16) :

Tableau III.6 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.

Nature de l'échantillon: Gravier			Classe granulaire d/D: 8/16	
Masse sèche: M=3,2 kg ≥ 0,2 D (D en mm)			Procédé utilisé: Tamisage par voie sèche	
Ouverture de Tamis (mm)	Masse des refus Mi(g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés (%) Pr=(Mc/M)*100	Pourcentage des Tamis cumulés (%) Pt=100-Pr
25	0	0	0	100
20	28	28	0,87	99,12
16	118	146	4,56	95,43
12,5	1626	1772	55,40	44,59
10	1058	2830	88,47	11,52
8	298	3128	97,79	2,20
6,3	44	3172	99,17	0,82
5	12	3184	99,54	0,45
Fond	14,5	3198,5	100	0

➤ Gravier (16/25) :

Tableau III.7 : Analyse granulométrique du gravier 16/25.

Nature de l'échantillon: Gravier			Classe granulaire d/D: 16/25	
Masse sèche: M= 5kg ≥ 0,2 D (D en mm)			Procédé utilisé: Tamisage par voie sèche	
Ouverture de Tamis (mm)	Masse des refus Mi(g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés (%) Pr=(Mc/M)*100	Pourcentage des Tamisats cumulés (%) Pt=100-Pr
40	0	0	0	100
31,5	302	302	6,04	93,96
25	1628	1930	38,60	61,40
20	2166	4096	81,92	18,08
16	514	4610	92,20	7,80
13	280	4890	97,80	2,20
10	74	4964	99,28	0,72
Fond	36	5000	100	0

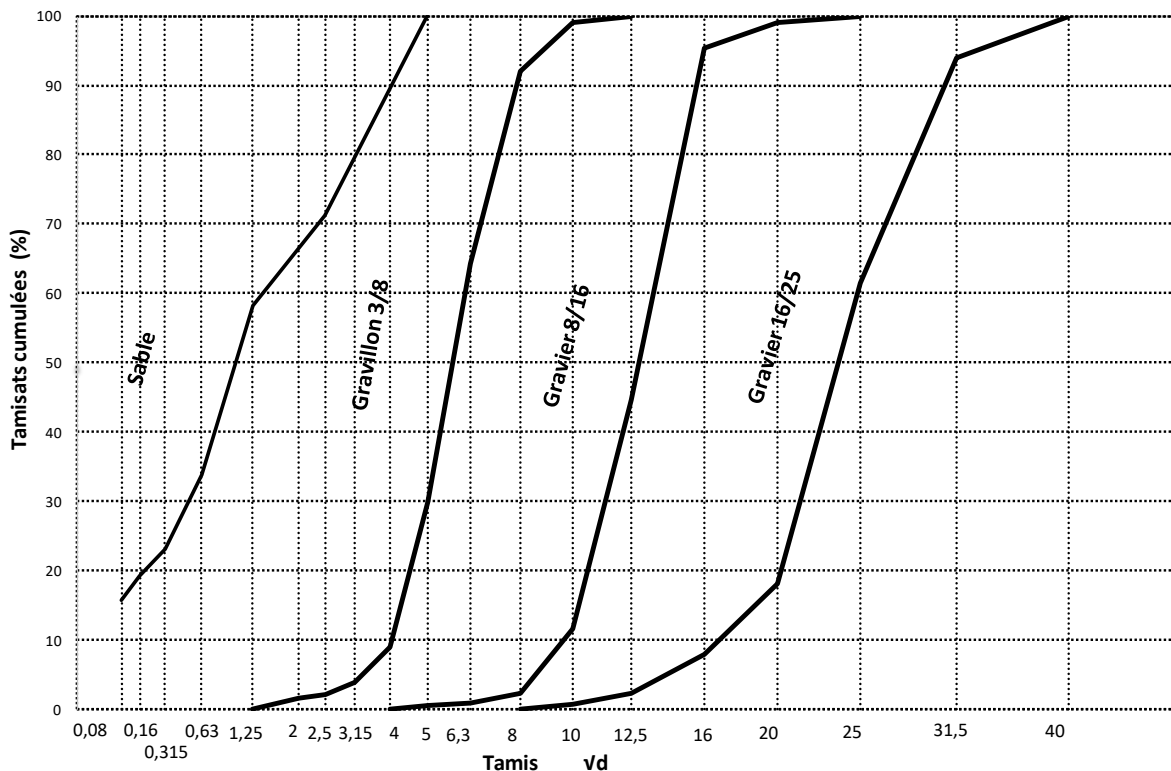


Figure III.2: Courbe granulométrique des granulats.

L'analyse granulométrique a révélé que le pourcentage des fines est de 15.7% et le module de finesse de sable est de 2,94. Au vu de ces résultats, le sable peut être classé légèrement grossier selon la norme (NF P 18 – 541, 1994). Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2.2 et 2.8, le module optimum est de 2,5.

III.3.2. Equivalent de sable :

L'équivalent de sable est utilisé pour évaluer la propreté de sable entrant dans la composition du béton. Le processus d'exécution est défini selon la norme (NF P 18-598, 1991). D'après les résultats obtenus, ESV=70,4 % (mesure à vue) et ESP=68,5 % (mesure par le piston), le sable est légèrement argileux de propreté admissible pour un béton de qualité.

III.4. Préparation des bétons :

III.4.1. Paramètres étudiés :

Afin de voir l'influence des (FPP) sur le béton de référence, nous avons choisis d'étudier leurs apports par rapport aux six paramètres suivant :

- L'affaissement au cône d'Abrams,
- Essais de compression,
- Essai de traction par flexion,
- Porosité accessible à l'eau,
- Perméabilité à l'eau,
- Absorption capillaire.

III.4.2. Nombre d'échantillons préparés :

Afin de préparer nos bétons, il est nécessaire de quantifier les quantités de béton à préparer en fonction des paramètres que nous allons étudier. Le tableau III.8 résume les caractéristiques géométriques de chaque échantillon ainsi que la quantité totale du béton à préparer.

Tableau III.8 : Caractéristiques des échantillons testés

	Compression	Traction	Porosité	Perméabilité	Absorption Capillaire
Taille et formes des Echantillons	Cylindrique $\varnothing 11 \times 22 \text{ cm}^3$	Prismatique $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$	Cylindrique $\varnothing 11 \times 5 \text{ cm}^3$	Cylindrique $\varnothing 11 \times 5 \text{ cm}^3$	Cubique $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$
Nombres	3	3	3		0
Volume total	$3 \times (3.14 \times (11^2/4) \times 22) = 6,27 \text{ litres ou } 0,00627 \text{ m}^3$	$3 \times (10 \times 10 \times 40) = 12 \text{ litres ou } 0,012 \text{ m}^3$	$3 \times (3.14 \times (11^2/4) \times 22) = 6,27 \text{ litres ou } 0,00627 \text{ m}^3$		(récupérer de l'essai de traction par flexion)
Volume nécessaire pour chaque dosage	Le volume total nécessaire est de <u>24.54 litres</u> pour chaque dosage mais nous avons pris <u>30 litres</u> .				

Pour la mise en œuvre des bétons, nous procédons au remplissage de deux types de moules (cf. Figure III.3)



Figure III.3 : les moules utilisés pour notre programme expérimental (à gauche prismatique de 40x10x10 cm et à droite cylindrique de 11x22 cm)

III.4.3. Composition de béton :

Dans le cadre de notre étude, l'ensemble des bétons testés ont été préparé selon les dosages recommandés pour le béton de référence (BO) (Boukli Hacène S.M., 2010). Ainsi pour notre programme expérimental, nous avons choisi les dosages volumiques (0 ; 0,07 ; 0,1 ; 0,13 ; 0,2 et 0,22%) soit un dosage massique de (0 ; 0,6 ; 0,9 ; 1,2 1,8 ; 2Kg/m³). Nous avons pris aussi un (E/C =0.55) dans nos bétons puisque la teneur en fine dans le sable utilisé est de 15,7 %. Un superplastifiant d'une quantité de 1,5% du poids de ciment était nécessaire pour les dosages en (FPP) supérieure à 0,6 kg/m³ car au-delà de ce dosage le béton sans adjuvant est devenu très ferme.

Le tableau 3.9 récapitule la quantité des matériaux utilisés dans notre formulation en fonction de dosage en (FPP)

Tableau III.9 : Quantité des matériaux pour la formulation des bétons

	Pour 1m ³	Pour 30 Litres					
	(E/C= 0,5)	(E/C= 0,55)					
Composition	BO (Boukli Hacène S.M., 2010)	BO (Boukli Hacène S.M., 2010)	BF 600	BF 900	BF 1200	BF 1800	BF 2000
Sable (0/3) (kg)	660	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8
Gravier (3/8) kg)	144	4,32	4,32	4,32	4,32	4,32	4,32
Gravier (8/16) (kg)	432	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96

Gravier (16/25) (kg)	533	15,99	15,99	15,99	15,99	15,99	15,99
Ciment (kg)	350	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Eau (L)	175	5,775	5,775	5,775	5,775	5,775	5,775
Adjuvant (g)	—	—	—	157,5	157,5	157,5	157,5
FPP (g)	—	—	18	27	36	54	60
B.O : Béton ordinaire		BF 600 : Béton avec 0,6 kg/m ³ de FPP			BF 900 : Béton avec 0,9 kg/m ³ de FPP		
BF 1200 : Béton avec 1,2 kg/m ³ de FPP		BF 1800 : Béton avec 1,8 kg/m ³ de FPP			BF 2000 : Béton avec 2 kg/m ³ de FPP		

III.4.4. Protocole de fabrication du béton :

Nous avons utilisé les étapes suivantes lors de la préparation des matériaux et le malaxage du béton avec la (FPP):

- Après avoir séché les granulats dans l'étuve à 105±5° C pendant 24h puis refroidis à l'air ambiant.
- Pré mouillage du malaxeur, afin d'éviter l'absorption d'eau par celui-ci.
- Introduction des constituants du plus gros granulats au plus petit.
- Répartition des FPP dans la cuve du malaxeur.
- Malaxage à sec des constituants avec les FPP pendant 1 minute, afin d'homogénéiser le mélange avant l'introduction d'eau.
- Addition de 1/3 de l'eau totale de gâchage dans le malaxeur en mélangeant pendant 1 minute.
- L'ajout du reste d'eau de 2/3 et éventuellement l'adjuvant dans le malaxeur en mélangeant pendant 1 minute et 30 secondes.
- La totalité de mélange dans le malaxeur est de 3 minutes et 30 secs.

Une fois le béton prêt, les moules des éprouvettes ont été préparés selon les étapes suivantes recommandées par la norme (NF EN 12390-2, 2012)

- Après gâchage, on procède au remplissage des moules à raison de deux couches avec 10 coups par une tige de picage pour chaque couche. Les moules ont été précédemment enduits d'huile.
- Araser et lisser la surface du béton.

- Enfin, la conservation des éprouvettes se fait dans le laboratoire, et après 24h les éprouvettes sont démoulées et immergées dans un bassin d'eau jusqu'à la date des essais.

III.5. Méthodes :

III.5.1. Essai sur le béton frais :

III.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

L'ouvrabilité a été mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams et les procédures ont été suivies telles que décrit dans la norme (NF EN 12350-2, 2012). L'appareillage nécessaire pour effectuer cet essai est le moule sans fond de forme tronconique de dimensions de 10x20x30 cm soit ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm) et d'une tige de piquage de diamètre de 16 mm.



Figure III.4 : matériels nécessaire pour la réalisation de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

Déroulement de l'essai :

- Au moyen d'une pelle creuse, nous introduisons le béton dans le moule en 3 couches égales. A l'aide de la tige, on pique chaque couche 25 fois en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du mélange.
- Araser la surface des bords supérieurs du moule. Après nous soulevons avec précaution le moule et la valeur de l'affaissement est mesurée sur le béton dans la minute qui suit le démoulage.

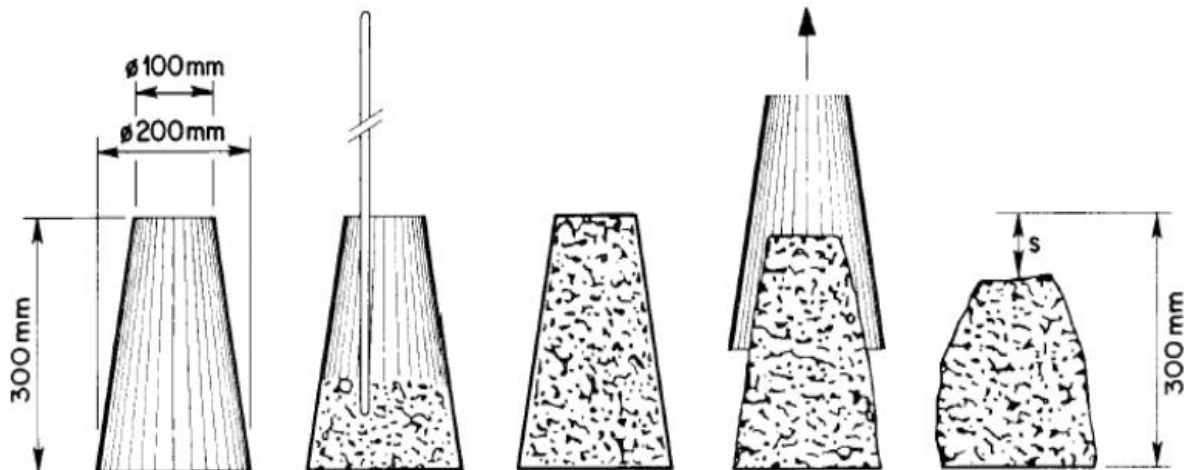


Figure III.5 : Les étapes de déroulement de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

Le tableau III.10 récapitule les cinq classes de consistances des bétons en fonction de la hauteur de l'affaissement selon la norme (NF EN 206-1, 2004).

Tableau III.10 : Consistance des bétons en fonction de la hauteur de l'affaissement

Classe	Consistance du béton	Affaissement (mm)
S1	Ferme	De 10 à 40
S2	Plastique	De 50 à 90
S3	Très plastique	De 100 à 150
S4	Fluide	De 160 à 210
S5	Très fluide	≥220

III.5.2. Essai sur le béton durci :

III.5.2.1. Essai de résistance à la compression :

L'essai de compression a été déterminé après 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de 11x22 cm conformément à la norme (NF EN 12390-3, 2012).

Conduite de l'essai:

Nous avons suivi les étapes suivantes pour déterminer la résistance à la compression :

- Retirer les éprouvettes du lieu de conservation peu avant l'essai,
- Nettoyer les faces des éprouvettes avec un chiffon sec,
- Les extrémités des éprouvettes ont été préalablement rectifiées pour assurer la planéité des surfaces au contact et donc assurer une application uniforme de la force sur toute la surface de l'éprouvette.
- Après un centrage de l'éprouvette, les éprouvettes sont soumises à une charge de manière continue et uniforme sans chocs de sorte que l'on provoque un accroissement uniforme de contrainte de $(0,6 \pm 0,4 \text{ MPa})$ jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

- La contrainte de rupture (f_c) est donnée directement par la machine d'essai avec une précision de 0.5 MPa.

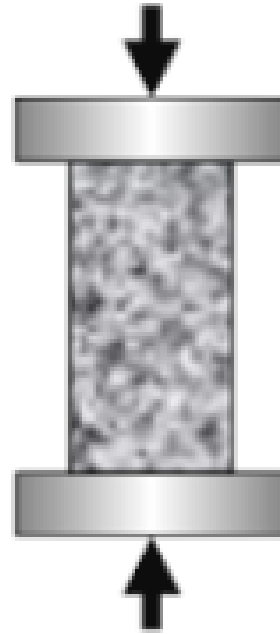


Figure III.6 : Essai de compression

III.5.2.2. Essai de résistance à la traction par flexion :

Cet essai est réalisé selon la norme (NF EN 12390-5, 2012) sur des éprouvettes prismatiques de 10 x 10 x 40 cm avec deux charges concentrées, égales et appliquées au tiers de la portée. L'éprouvette repose sur deux appuis constitués par des rouleaux en acier de 20 mm de diamètre. La charge est appliquée de manière continue et sans choc.

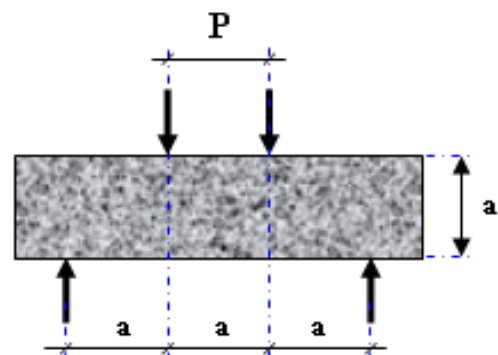


Figure III.7 : Essais de traction par flexion

Après avoir noté la charge maximale de rupture atteinte, la résistance à la traction par flexion f_t est calculée suivant la formule ci-dessous:

$$f_t = \frac{30 F_r}{a^2} \quad (3.1)$$

Avec :

f_t : contrainte de traction par flexion (MPa)

F_r : force de rupture (KN)

a : arête de base de l'éprouvette (cm)

III.5.3. Essai de durabilité :

III.5.3.1. Essai de la porosité accessible à l'eau :

Cet essai est réalisé sur des disques de 5 cm d'épaisseur et de 11 cm de diamètre, Le protocole expérimental utilisé dans cette étude pour mesurer la porosité est le protocole modifié de (AFREM-AFGC, 1997).

La figure suivante montre le protocole utilisé dans l'essai de porosité accessible à l'eau.

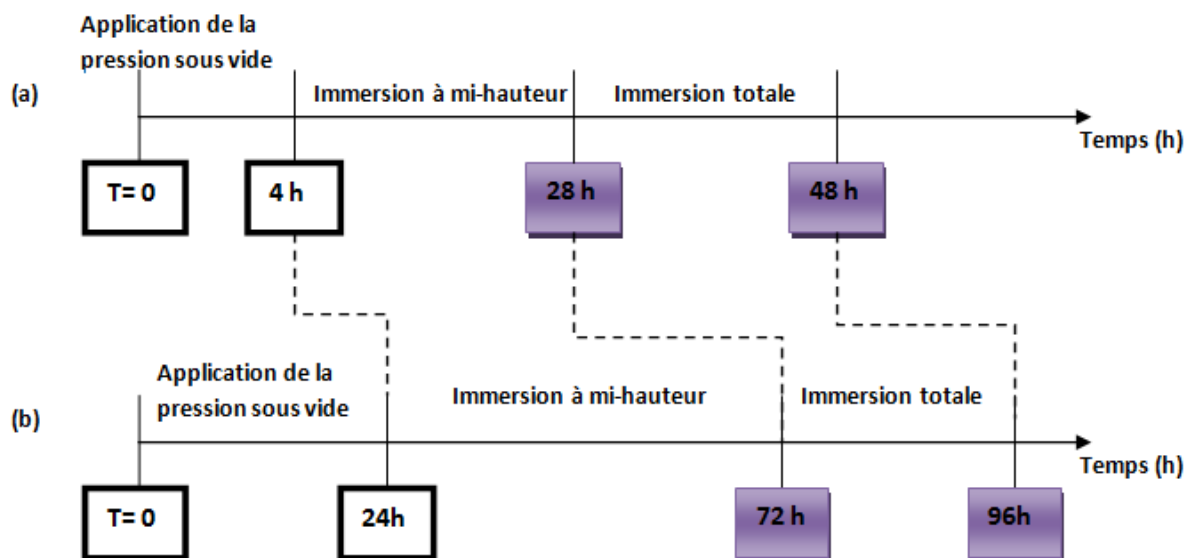


Figure III.8 : Protocole de saturation - (a) : procédure AFPC-AFREM (1997) - (b) procédure (AFREM-AFGC, 1997) modifiée cité par (Kamèche Z., 2015)



Séchage des échantillons dans l'étuve.

Conduite de l'essai :**Détermination de M_{sec} :**

Séchage de l'échantillon à l'étuve à 60 °C jusqu'à la stabilisation de la masse

Le séchage est arrêté lorsque la différence entre deux pesées à 24 heures d'intervalle est inférieure à 0,05 %,



Saturation des échantillons sous vide.

Saturation sous vide :

On place l'échantillon dans un dessiccateur hermétiquement fermé connecté à une pompe à vide.

1. Application de la pression sous vide pendant 24h.
2. Immersion à mi-hauteur pendant 48h.
3. Immersion totale pendant 24h.



Pesage des échantillons immergé à l'eau et en air.

Détermination de M_{eau} :

Peser le corps d'épreuve complètement immergé à l'aide d'un dispositif de pesée hydrostatique.

Détermination de M_{air} :

Peser le corps d'épreuve saturé à l'air après essuyage de l'échantillon avec un chiffon.

Figure III.9 : Les étapes à suivre pour la mesure de la porosité accessible à l'eau

On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau:

$$P_{eau} (\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (3.2)$$

Avec :

M_{air} (g) : La masse de l'échantillon saturé pesé à l'air,

M_{sec} (g) : La masse de l'échantillon pesée à sec,

M_{eau} (g) : La masse de l'échantillon pesée sous l'eau.

III.5.3.2. Essai d'absorption capillaire :

Le taux d'absorption capillaire est évalué en utilisant des échantillons cubiques de 10 cm de béton. Après durcissement de 28 jours, les échantillons sont placés dans une étuve à 55°C jusqu'à stabilisation de la masse. Les surfaces latérales de l'échantillon sont ensuite imperméabilisées avec de la résine époxy afin d'assurer seulement le contact entre la surface de la base et l'eau.

Pour réaliser l'essai, les échantillons sont immergés dans l'eau et le niveau d'eau est maintenu à 5 mm au-dessus de la base de l'échantillon. Le suivi de l'évolution de la masse des éprouvettes a été fait aux échéances suivantes : 5, 15, 30min puis 1, 2, 3, 4 et 5h ensuite tous les jours jusqu'à stabilisation de la masse de (0,05%). Cet essai est réalisé suivant la norme (ASTM C 1585 – 04, 2007) où le coefficient d'absorption capillaire est défini en réalisant une régression linéaire des courbes de volume d'eau absorbée par unité de surface en fonction du temps. Ces courbes peuvent être décomposées en deux phases. La première phase est la phase d'absorption initiale où l'absorption d'eau est rapide et la deuxième phase c'est la phase secondaire où la vitesse d'absorption d'eau diminue. (cf. Figure III.10)

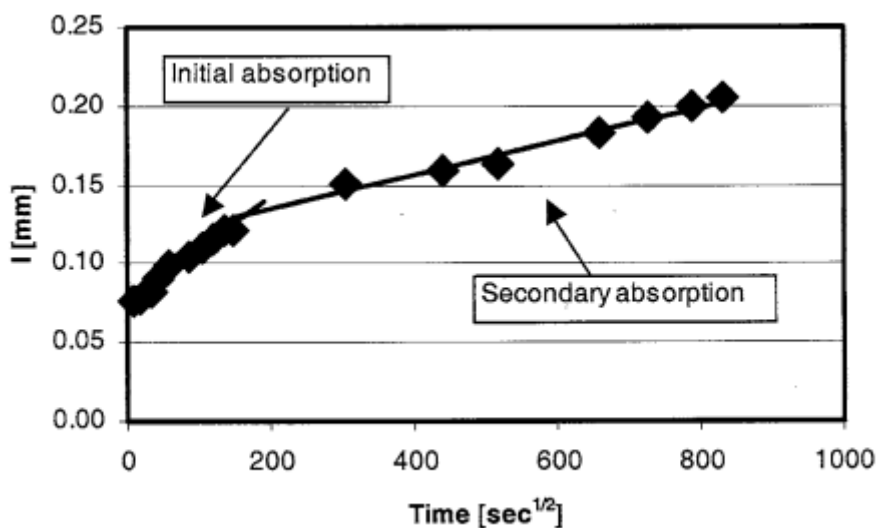


Figure III.10 : Courbe d'absorption capillaire (ASTM C 1585 – 04, 2007)

Le coefficient d'absorption capillaire est calculé en fonction de la pente de la droite du volume d'eau absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps:

$$\frac{Q}{A} = S\sqrt{t} + c \quad (3.3)$$

Avec :

S : Le coefficient d'absorption capillaire ($m / s^{0,5}$)

Q : Le volume d'eau absorbé (m^3)

A : La surface de l'échantillon en contact avec l'eau (m^2)

t : La durée de l'essai (s)

c : est un coefficient constant

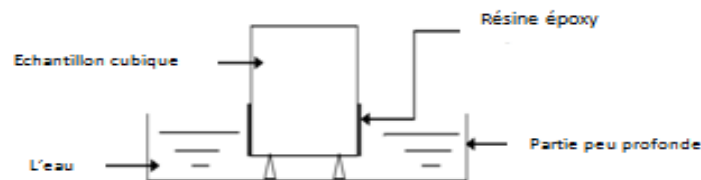


Figure III.11: Dispositif pour la réalisation de l'essai d'absorption capillaire

III.5.3.3. Essai de mesure de la perméabilité à l'eau:

Le principe de l'essai de perméabilité à l'eau est basé sur une mesure de la pénétration de l'eau sous pression à travers la « peau du béton ».

Protocole de mesure de la perméabilité à l'eau :

La perméabilité à l'eau du béton a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à l'eau équipé avec un compresseur pour l'alimentation en air comprimé et des tubes manomètres pour la mesure des débits d'eau sur les échantillons de 5cm de hauteur et de 11 cm de diamètre suivant la norme (NF EN12390-8, 2012).

L'essai consiste à soumettre un échantillon de béton, protégé latéralement (recouvert avec deux couches de résine époxy) pour assurer un écoulement unidirectionnel, à une pression constante d'eau et mesurer le débit volumique infiltrant l'échantillon.

Après avoir purgé tout l'air contenu dans le circuit d'eau, l'échantillon de 5cm de hauteur est placé entre les supports du perméamètre (les deux plateaux en acier) de l'appareil pour la fixation de l'échantillon et les articulations en caoutchouc dur placées sur les faces supérieures et inférieures pour assurer l'étanchéité et l'efficacité des fuites d'eau sous pression dans la zone de contact entre l'échantillon et l'eau.

Il est donc possible de calculer la perméabilité à l'eau à partir du débit de l'eau mesuré à l'aide d'un tube manomètre après l'application d'une pression d'eau constante sur l'échantillon et au bout de 24h sous une pression de 3bars.

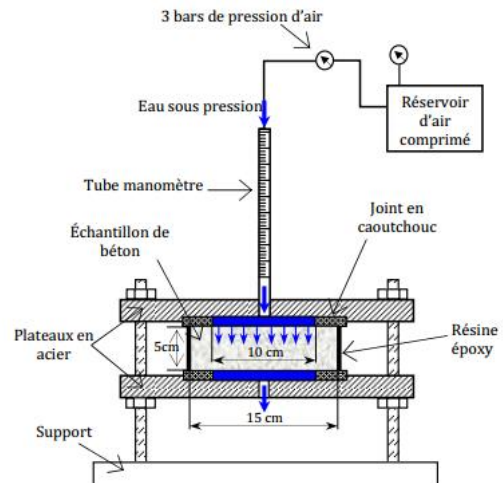


Figure III.12 : Essai de perméabilité à l'eau (Kamèche Z., 2015)

La valeur des débits d'eau mesurée pendant les 24 h a été utilisée pour déterminer le coefficient de perméabilité à l'eau K en appliquant la loi de Darcy : $Q=K \times A \times i$

$$K = \frac{Q * L}{A * \Delta H} \quad (3.4)$$

Avec :

K : est le coefficient de perméabilité à l'eau (m/s),

Q : est le débit de l'eau qui s'écoule du côté amont de l'échantillon (m³/s),

L : est l'épaisseur de l'échantillon du béton (m),

A : est la surface de contact de l'eau avec l'échantillon (m²),

ΔH : est la charge de pression calculée par la différence entre la pression à l'intérieur et l'extérieur de l'échantillon de béton (pression de l'eau exprimée en termes d'une hauteur h de la colonne d'eau) (m).

III.6. Planning des essais effectués:

		Fevrier 2017																											
		1	2	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23	26	27	28								
		M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M								
Préparation des échantillons																													
Confection des éprouvettes BO & BF600																													
Confection des éprouvettes BF900 & BF1200																													
Confection des éprouvettes BF2000																													
Confection des éprouvettes BF1800																													
		mars-17																											
		1	2	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23	26	27	28	29	30						
		M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J						
Essai de compression et traction par flexion BO & BF600																													
Essai de compression et traction par flexion BF900 & BF1200																													
Essai de compression et traction par flexion BF2000																													
Essai de compression et traction par flexion BF1800																													
Stabilisation de la mase pour l'essai de porosité																													
Stabilisation de la mase pour l'essai d'absorption capillaire																													
		avr-17																											
		2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	16	17	18	19	20	23	24	25	26	27	30							
		D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D							
Stabilisation de la mase pour l'essai de porosité																													
Stabilisation de la mase pour l'essai d'absorption capillaire																													
Essai de porosité																													
		mai-17																											
		1	2	3	4	7	8	9	10	11	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30	31					
		L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M	J	D	L	M	M					
Essai d'absorption capillaire																													
Essai de porosité																													
Essai de perméabilité à l'eau																													

Chapitre IV. Résultats et interprétations

IV.1. Introduction :

Ce chapitre comprend l'analyse et la discussion des résultats obtenus sur les différents échantillons du béton avec FPP. Les résultats englobent le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci ainsi que les différents indicateurs de durabilité (porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire).

IV.2. Essai sur le béton frais :

IV.2.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

Les résultats obtenus nous montrent que l'affaissement a diminué de 9 à 2,66 cm du béton ordinaire à un béton avec $0,6\text{kg/m}^3$ de FPP, cela est dû à l'incorporation de la FPP dans le béton, cette dernière diminue l'ouvrabilité de béton (elle rigidifie la matrice), comme dans le cas trouvé par (Saidani et al., 2016), le mélange semble être trop collant et relativement sec après avoir retiré le cône d'affaissement et donc cela attire l'attention sur la quantité d'eau qui a été aspirée par les FPP. L'ajout de superplastifiant est recommandé pour augmenter l'ouvrabilité dans le mélange (cf. Tableau IV.1)

Tableau IV.1 : Résultats des essais de l'affaissement au cône d'Abrams

Mélange	Dosage volumique (%)	Dosage Massique (Kg/m^3)	Affaissement (cm)	Consistance du béton
BO	0	0	9 (sans adjuvant)	Plastique
BF600	0,07	0,6	2,66 (sans adjuvant)	Ferme
BF900	0,1	0,9	19 (avec superplastifiant)	Fluide
BF1200	0,13	1,2	16,67 (avec superplastifiant)	Fluide
BF1800	0,2	1,8	15,66 (avec superplastifiant)	Fluide
BF2000	0,22	2	14,86 (avec superplastifiant)	Très plastique

Les valeurs trouvées dans l'essai d'affaissement sont représentées dans la figure IV.1

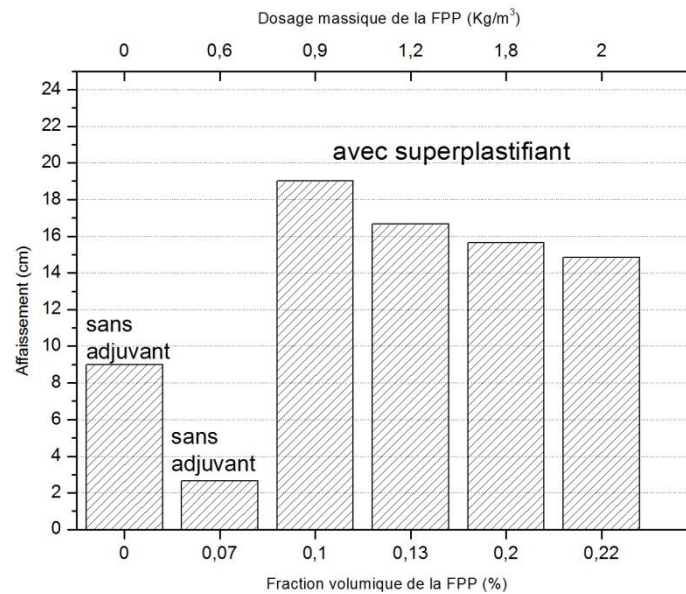


Figure IV.1 : résultats de l'essai d'affaissement.

D'après la figure IV.1 on constate que pour tous les bétons fibrés de dosage de (0,9 ; 1,2 ; 1,8 et 2 kg/m³) et avec l'ajout de superplastifiant, les FPP entraînent une diminution de l'ouvrabilité du béton avec l'augmentation respective du dosage en FPP. Même dans la revue littéraire (Majumdar and Narayan Swamy, 1977) et (Swamy, 1975), les auteurs constatent qu'il y a donc une certaine limite à l'ajout de la FPP dans le mélange, une forte proportion en FPP entraîne une diminution de l'ouvrabilité du béton, ceci est dû à l'agglomération des fibres, c'est-à-dire la formation « d'oursins » provoquant des surfaces plus grandes qui ne peuvent plus être lubrifiées avec l'eau libre disponible (Toutanji, 1999) (Karahan and Atiş, 2011) et (Afroughsabet and Ozbakkaloglu, 2015).

La figure IV.2 présente tous les cas trouvés dans notre essai d'affaissement.



Béton ordinaire



Béton avec 0,6 kg/m³ de FPP



Béton avec 0,9 kg/m³ de FPP

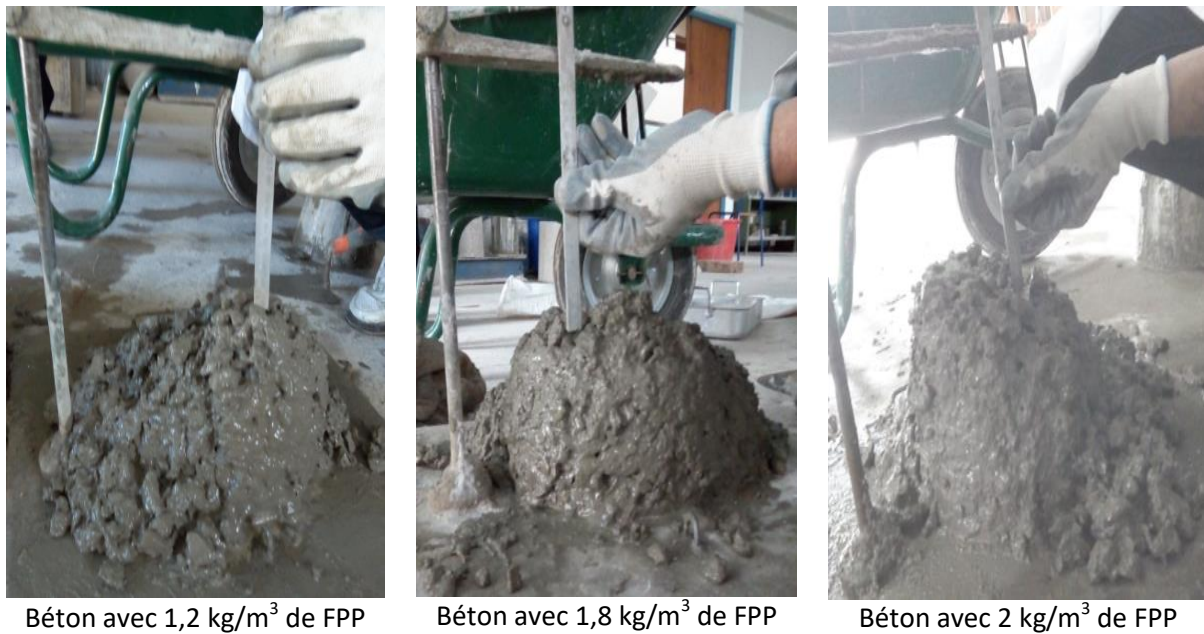


Figure IV.2 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams pour les différents bétons.

IV.3. Essai sur le béton durci :

IV.3.1. Essai de résistance à la compression :

Les résultats d'écrasement des échantillons à la compression à 28 jours pour les différents dosages (0 ; 0,6 ; 0,9 ; 1,2 ; 1,8 et 2kg/m³) sont représentés dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours

Mélange	Essai 1 (MPa)	Essai 2 (MPa)	Essai 3 (MPa)	Moyenne f_c (MPa)
BO	30,8	30,3	29,3	30,13
BF600	32,9	36,4	33,3	34,20
BF900	34,4	38,5	38,4	37,10
BF1200	33,5	32,5	34,8	33,60
BF1800	34,7	32,1	29,4	32,07
BF2000	29,1	27,1	30,6	28,93

Nous avons constaté une dispersion dans les résultats qui peuvent être affectés par les différents paramètres qui sont la préparation des faces des éprouvettes sur lesquelles s'exercent la compression et les procédés de mise en place, c'est-à-dire le centrage de l'éprouvette (cf. Figure IV.4)

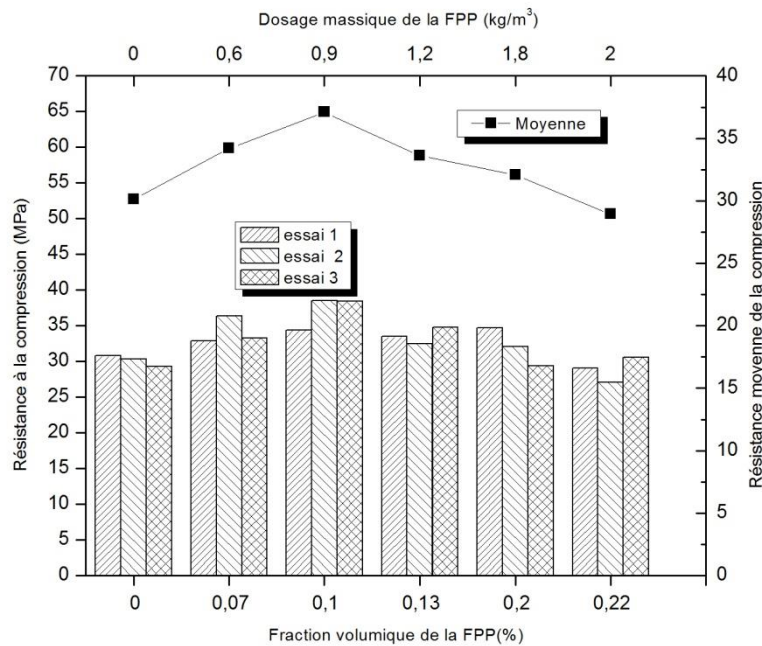


Figure IV.3 : résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de la FPP.

Nous avons appliqué le test des valeurs aberrantes sur l'ensemble des résultats afin de choisir les valeurs appropriées (Boukli Hacène S.M., 2010).

$$v_n = \frac{(x - \bar{x})}{\sigma} \quad (4.1)$$

Avec :

- x : est la valeur de l'essai de résistance,
- \bar{x} : est la valeur moyenne de la résistance
- σ : est l'écart type.

v_n est comparé avec $v_{max}(n, Q)$ ou n est le nombre des éprouvettes et $Q = 200 \alpha$ avec un risque α fixé à 5 %. Après nous lisons v_{max} dans le tableau que l'on trouve dans l'annexe1.

D'après les résultats trouvés dans l'annexe2, nous constatons que toutes les valeurs calculées de v_n sont inférieures à la valeur v_{max} et donc il n'existe aucune valeur aberrante concernant ces résultats.

Alors puisqu'il n'y a pas de valeur aberrante, nous avons pris la valeur moyenne des trois échantillons pour chaque type de béton fibré. Les résultats (cf. Figure IV.3) montrent que la résistance à la compression augmente de 13,5 ; 23,12 ; 11,5 et 6,42% avec l'augmentation respective du dosage en FPP de (0,6 ; 0,9 ; 1,2 et 1,8 kg/m³) suivie d'une diminution de 3,98% pour le dosage de 2 kg/m³ par rapport au béton sans fibre. Cette augmentation est principalement due au contrôle de la fissuration exercée par les FPP pendant la phase de propagation des fissures longitudinales. Les fibres influencent généralement de façon positive la ductilité en compression et augmentent l'énergie nécessaire à l'ouverture et au glissement le long des surfaces de rupture. Les fibres empêchent l'éclatement et la séparation des morceaux en béton fissuré et garantissent une résistance importante (Redaelli, 2009) et (Neves R. D and F. de Almeida, 2005) (cf. Figure IV.4)

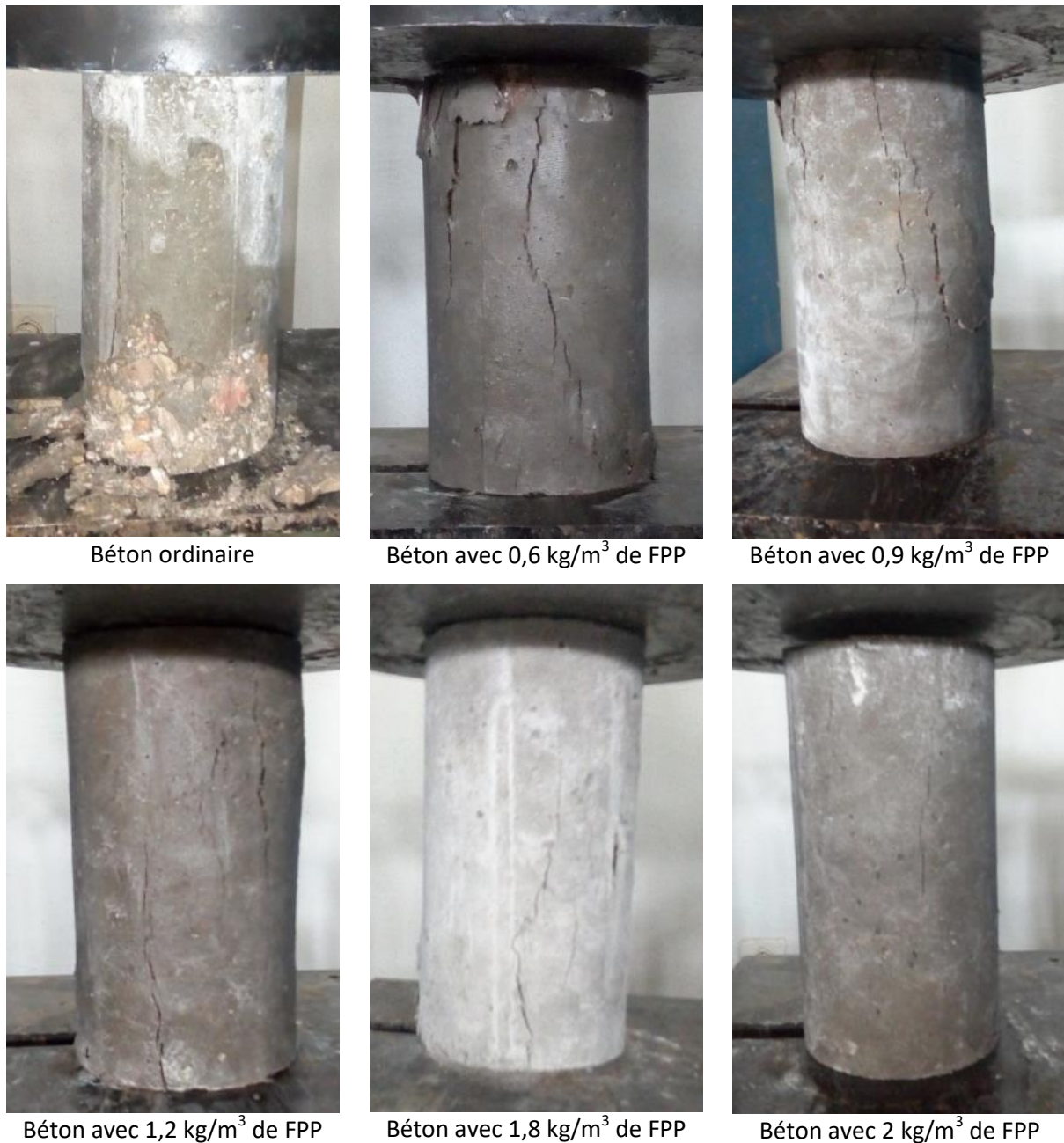


Figure IV.4 : L'influence des FPP sur le contrôle des fissures

Les résultats trouvés concordent avec ceux trouvés dans la littérature ce qui montre que la présence de la FPP a un effet positif sur la résistance à la compression jusqu'à un certain dosage au-delà duquel l'effet inverse est constaté, une diminution de la charge maximale du fait que le pourcentage de la FPP est grand ce qui crée des zones de faiblesse à l'interface fibre –matrice qui peut être la cause de la diminution de la résistance à la compression (Alhozaimy et al., 1996) (Karahana and Atiş, 2011) et (Singh, 2014).

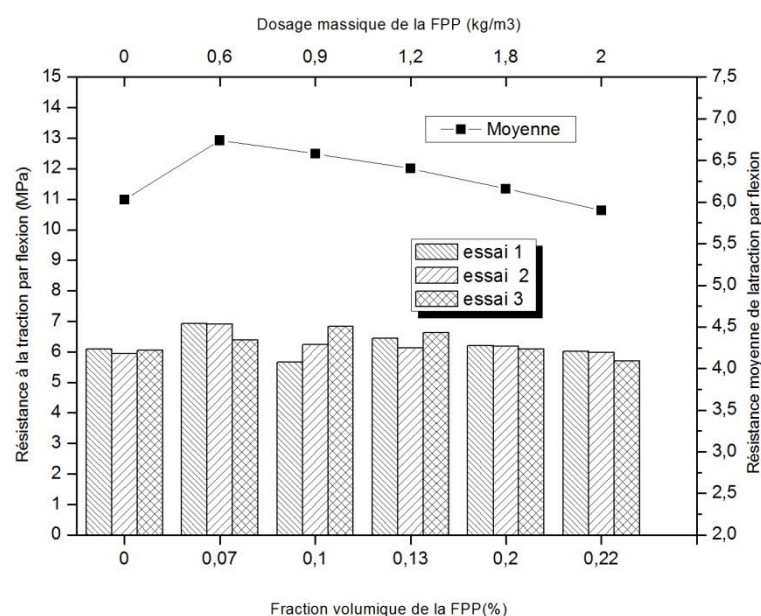
IV.3.2. Essai de résistance à la traction par flexion :

Les résultats de résistance à la traction par flexion à 28 jours pour les différents dosages (0 ; 0,6 ; 0,9 ; 1,2 ; 1,8 et 2kg/m³) sont résumés dans le tableau IV.3

Tableau IV.3 : Résultats des essais de la résistance à la traction par flexion à 28 jours

Mélange		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne f_t (MPa)
BO	MPa	6,1	5,94	6,06	6,03
	KN	20,33	19,8	20,2	
BF600	MPa	6,93	6,9	6,39	6,74
	KN	23,1	23	21,3	
BF900	MPa	6,66	6,24	6,84	6,58
	KN	22,2	20,8	22,8	
BF1200	MPa	6,45	6,12	6,63	6,40
	KN	21,5	20,4	22,1	
BF1800	MPa	6,21	6,18	6,09	6,16
	KN	20,7	20,6	20,3	
BF2000	MPa	6,02	5,98	5,7	5,90
	KN	20,06	19,93	19	

L'application du test de valeur aberrante (cf. Annexe2) a montré qu'aucune des valeurs n'est aberrante alors une valeur moyenne des trois échantillons a été prise pour chaque type de béton.

**Figure IV.5** : résultats de la résistance à la traction par flexion obtenus pour les différents dosages de la FPP.

Selon les résultats (cf. Figure IV.5), on constate qu'il y a une variation des résistances des échantillons. Les résistances à la traction par flexion les plus fortes sont obtenues pour les échantillons dosés de 0,6 ; 0,9 ; 1,2 et 1,8 kg/m³ soit une amélioration respective de 11,71 ; 9,06 ; 6,08 et 2,1% par rapport au béton ordinaire (sans fibre). La résistance chute de 2,21% pour l'échantillon dosé de 2 kg/m³ de FPP. Les FPP ont une tendance à limiter la propagation des fissures ce qui influe positivement sur l'augmentation de la résistance à la traction par flexion comme il est mentionné dans la revue littérature, les différents auteurs ont trouvé que les FPP apportent une amélioration car la présence des FPP peut jouer un rôle de stabilisateur après rupture de la matrice de béton. En effet, les bétons sans fibres se dégradent rapidement après fissuration mais les bétons

de FPP continuent à reprendre des efforts même après que la charge maximale soit atteinte (Bagherzadeh, 2012) et (Singh, 2014).

IV.4. Essais de durabilité :

IV.4.1. Essai de porosité accessible à l'eau:

Après avoir déterminé la masse sèche de l'échantillon, la masse de l'échantillon saturé immergé dans l'eau et la masse saturée dans l'air. Les résultats de l'essai de porosité accessible à l'eau pour les différents échantillons de béton sans et avec la (FPP) sont montrés dans le tableau IV.4. Les valeurs indiquées dans le tableau sont la moyenne de trois éprouvettes.

Tableau IV.4: Résultats des essais de porosité accessible à l'eau pour le béton sans fibre et avec différents dosages en FPP.

Echantillon	M _{air}	M _{eau}	M _{sec}	Porosité (%)
B.O	1115,9	628,2	1052,3	13,04
F600	1144,8	660,66	1083,86	12,58
F900	1114,8	640,4	1053,35	12,95
F1200	1098,3	638,8	1038,9	12,92
F1800	1127,8	648,1	1065,6	12,97
F2000	1084,2	628,4	1024,2	13,16

Le graphe ci-dessous montre le pourcentage de la porosité pour les différents dosages en FPP.

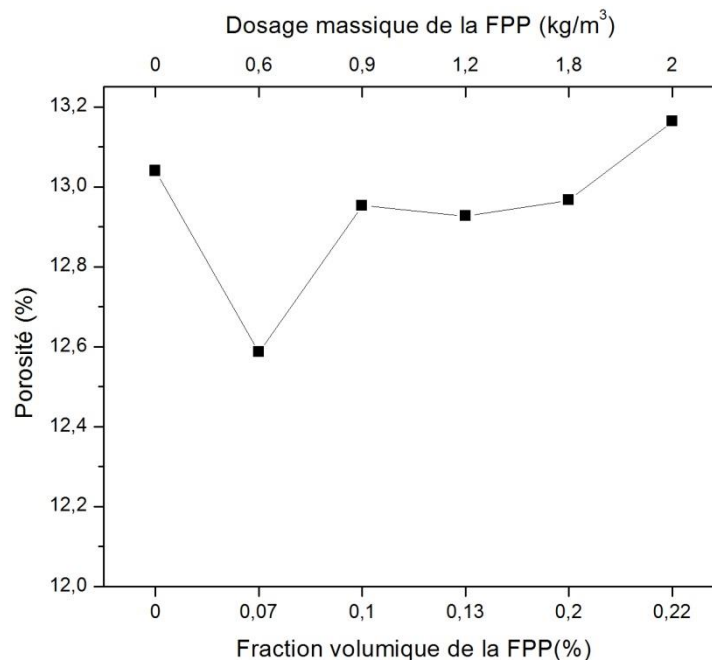


Figure IV.6: Pourcentage de la porosité de béton sans et avec la FPP.

Selon les résultats trouvés, on constate deux phénomènes distincts entre les différents échantillons. Le premier montre une légère diminution de la porosité par rapport au béton sans FPP de 3,53 ;

0,69 ; 0,92 et 0,54 % pour les dosages respectives de 0,6 ; 0,9 ; 1,2 et 1,8 kg/m³, par contre le deuxième désigne une faible augmentation de la porosité de l'ordre 1% pour le dosage de 2 kg/m³.

D'après ces résultats nous constatons que la chute obtenue pour la majorité des dosages est due principalement au remplissage des pores avec la (FPP), ces dernier avec un dosage de 0,6 kg/m³ vont réduire considérablement le transfert des agents agressifs dans le béton, alors une meilleure durabilité sera obtenue. Par contre l'utilisation de fraction volumique 2 kg/m³ en FPP conduit à leurs agglomération (phénomène d'oursins) à l'intérieur de l'échantillon de béton, ce qui fait augmenter la porosité (Fallah and Nematzadeh, 2017).

Ces résultats concordent bien avec les essais de compression et de traction par flexion commentés précédemment.

IV.4.2. Essai de perméabilité à l'eau:

Les résultats de mesure du coefficient de perméabilité à l'eau sous pression pour les différents bétons dans le tableau IV.5. Un exemple pour le calcul de la perméabilité à l'eau est présenté dans l'Annexe 4.

Tableau IV.5 : Résultats des essais de perméabilité à l'eau pour le béton sans fibre et avec différents dosages en FPP.

Echantillon	Q (ml/s)	épaisseur (cm)	A (cm ²)	Coefficient de perméabilité à l'eau (K *10 ⁻¹¹) (m/s)
B.O	0,00025	4,96	78,5	7,79
F600	0,00017	5,03	78,5	5,61
F900	0,00023	4,87	78,5	7,08
F1200	0,00025	4,8	78,5	7,51
F1800	0,00024	5,06	78,5	7,60
F2000	0,00026	4,9	78,5	8,05

Le graphe représenté dans la figure IV.7 correspond à la perméabilité à l'eau pour les différents échantillons.

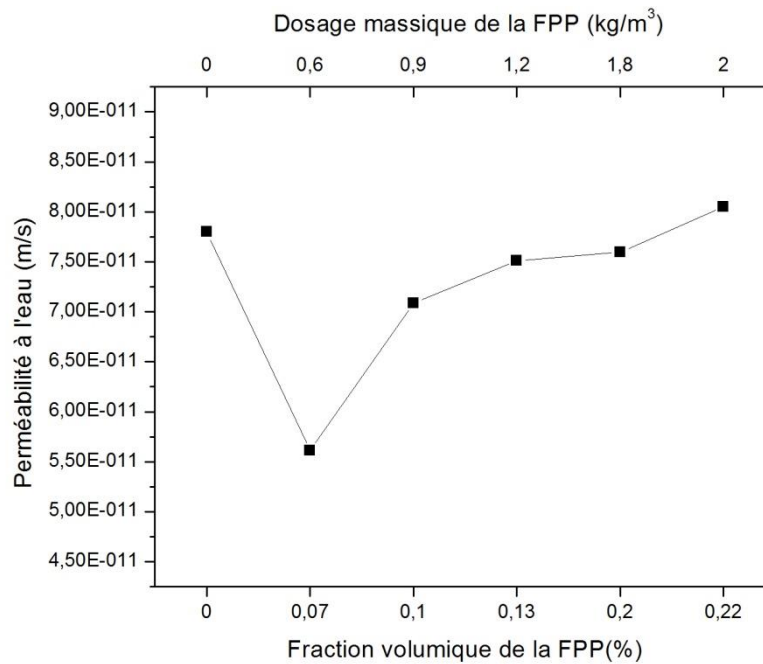


Figure IV.7 : Perméabilité à l'eau pour béton sans et avec la FPP.

A partir du tableau IV.5 et la figure IV.7, nous constatons que la perméabilité à l'eau a une tendance à diminuer par rapport au béton sans fibre de 28,07 ; 9,23 ; 3,71 et 2,56 % respectivement pour les dosages de 0,6 ; 0,9 ; 1,2 et 1,8 kg/m³ de FPP. En revanche, nous observons qu'il y a une légère augmentation par rapport au béton témoin de 3,21 % pour une teneur en fibre de 2 kg/m³. Au regard de ces résultats trouvés nous remarquons que l'addition de la FPP jusqu'à 1,8 kg/m³ réduit la perméabilité à l'eau qui est fortement influencée par les paramètres de porosité, les mêmes dosages en FPP offrent une diminution de la porosité ce qui justifie nos résultats. Les mêmes tendances ont été observées dans la littérature, où la perméabilité à l'eau est liée à l'effet du remplissage des pores par les FPP (Ramezani pour et al., 2013) et (Zhang and Li, 2013).

L'accroissement du coefficient de la perméabilité à l'eau induite par la forte addition de la FPP de 2 kg/m³ augmente avec l'accroissement de la porosité ceci a été remarqué par plusieurs auteurs (Suhaendi and Horiguchi, 2006) et (Sadiqul Islam and Gupta, 2016) qui ont justifié cela en expliquant que la quantité élevée de FPP modifie la zone de transition interfaciale (ITZ) et provoque un transfert plus important de l'eau (Antoni, 2003).

IV.4.3. Essai d'absorption capillaire:

La figure IV.8 montre les coefficients d'absorption capillaire pour les différents bétons étudiés, Les courbes sont modélisées en deux segments linéaires. Pour chaque segment, nous avons déterminé une pente. Cette dernière caractérise le coefficient d'absorption d'eau. La figure permet d'observer que les courbes ont presque la même cinétique d'absorption et les principales différences entre les surfaces préparées se situent pendant la première phase (absorption initiale). L'attention sera donc portée sur les mesures prises pendant cette période.

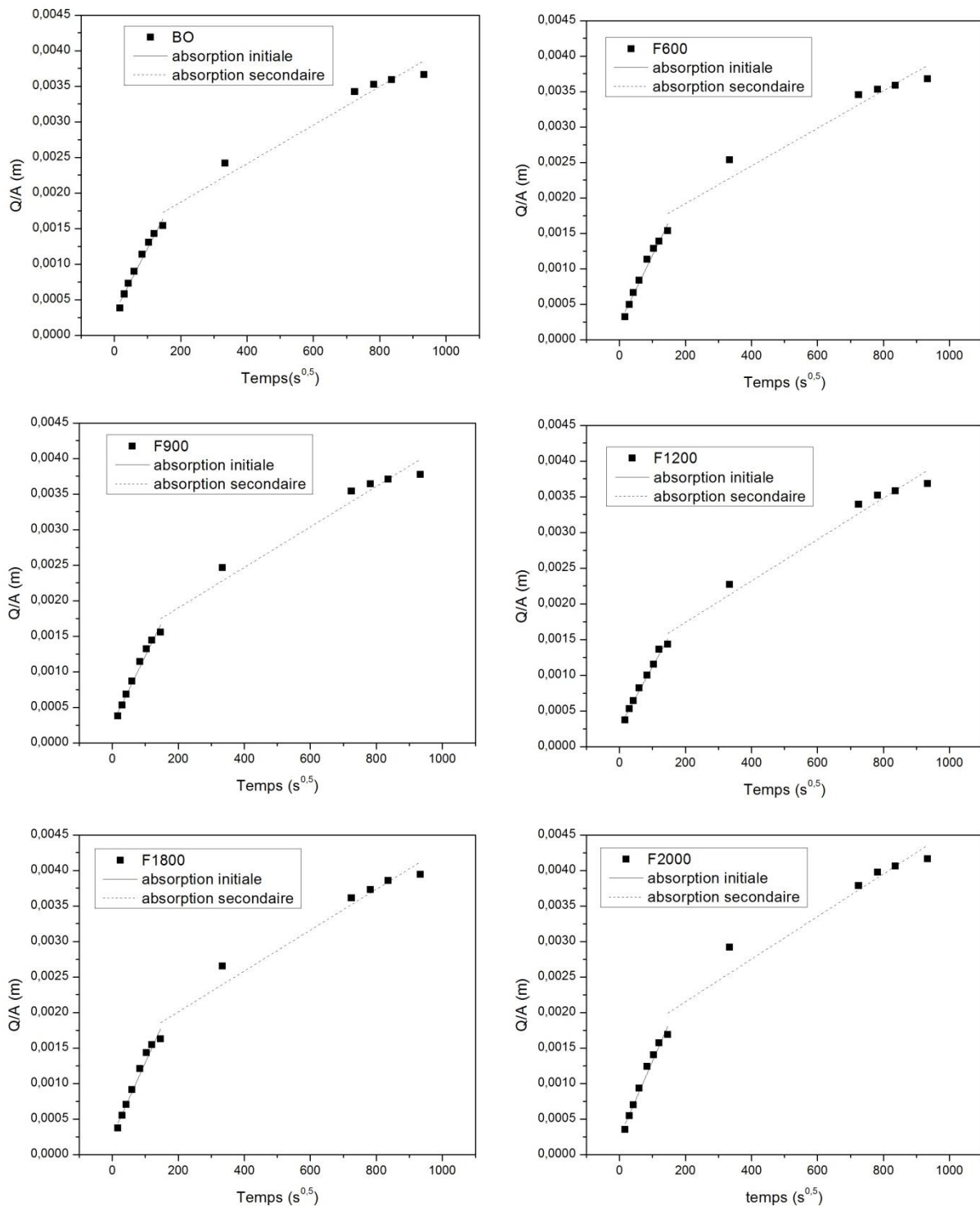


Figure IV.8: Evaluation de l'absorption capillaire initiale et secondaire pour BO, BF600, BF900, BF1200, BF1800 et BF2000.

Comme indiqué dans la figure IV.8 pour l'ensemble des échantillons nous remarquons deux phases distinctes qui caractérisent l'absorption capillaire. La première phase qui représente l'absorption initiale qui se traduit par le remplissage des gros pores capillaires, une grande partie d'eau est absorbée durant les premières heures de l'essai. La seconde partie des courbes d'absorption appelée absorption secondaire qui se caractérise par le remplissage des capillaires de diamètres plus fins.

Ainsi la vitesse d'absorption capillaire obtenue par la deuxième phase est plus petite par rapport à la première, ceci s'illustre bien dans la différence qui existe entre les deux pentes (ASTM C 1585 – 04, 2007).

La détermination du coefficient d'absorption capillaire correspondant à chaque phase est mentionnée dans le tableau IV.6

Tableau IV.6 : Détermination du coefficient d'absorption capillaire pour chaque béton.

		Equation: $y = a * x + b$	
		S ($m/s^{0,5}$)	R ²
BO	Absorption initiale	9,03E-06	0,97426
	Absorption secondaire	2,71E-06	0,95705
BF600	Absorption initiale	9,59E-06	0,97519
	Absorption secondaire	2,66E-06	0,93546
BF900	Absorption initiale	9,49E-06	0,97679
	Absorption secondaire	2,85E-06	0,95565
BF1200	Absorption initiale	8,42E-06	0,9818
	Absorption secondaire	2,91E-06	0,9703
BF1800	Absorption initiale	10,3E-06	0,9666
	Absorption secondaire	2,88E-06	0,95242
BF2000	Absorption initiale	10,7E-06	0,97462
	Absorption secondaire	3,00E-06	0,92687

Les échantillons BF1200 offrent une diminution du coefficient d'absorption initiale de 6,75% par rapport au béton ordinaire. Or les autres échantillons BF600, BF900, BF1800 et BF2000 offrent une augmentation respective de 6,03 ; 5,09 ; 14,06 et 18,49 %. (cf. Figure IV.9)

Pour l'absorption secondaire, les échantillons BF600 offrent une diminution de 1,84% par rapport au béton ordinaire. Par contre les échantillons de BF900, BF1200, BF1800 et BF2000 offrent une augmentation respective de 5,16 ; 7,38 ; 6,27 et 10,7%.(cf. Figure IV.9)

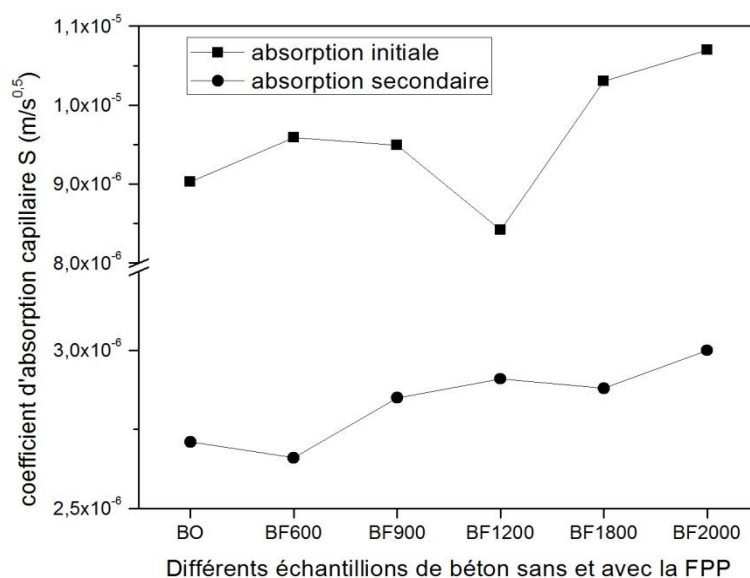


Figure IV.9 : Résultats d'absorption capillaire initiale et secondaire pour les différents bétons.

Concernant le BF1200, les FPP prennent la place dans les pores empêchant ainsi l'eau de les remplir, l'eau pénètre avec une faible quantité. En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles afin d'assurer des degrés d'interconnexions les plus faibles (Ramezani pour et al., 2013). Les échantillons de BF600 offrent la plus petite absorption secondaire, suite à un meilleur remplissage des capillaires de diamètres plus fins.

IV.5. Conclusion :

L'étude expérimentale que nous avons menée, nous a permis de tirer à ce stade les enseignements suivants :

L'ajout de superplastifiant est recommandé pour augmenter l'ouvrabilité du béton avec FPP puisque cette dernière entraîne une diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation respective du dosage en FPP, une forte proportion en FPP entraîne l'agglomération des fibres dans le mélange.

Pour le comportement mécanique, les résultats obtenus présentent une augmentation de la résistance à la compression et à la traction par flexion pour l'ensemble des dosages en FPP par rapport au béton ordinaire puisque ces dernières contrôlent les fissures puis une diminution pour le dosage de 2kg/m^3 , du fait de l'augmentation du nombre de défauts présents dans la zone d'interface fibre-matrice. La résistance à la compression maximale est obtenue pour un dosage de $0,9\text{kg/m}^3$ de FPP par contre pour la sollicitation en traction par flexion, la résistance maximale est obtenue pour le dosage de $0,6\text{kg/m}^3$.

Les FPP s'opposent à l'ouverture des fissures ce qui est important pour la durabilité de béton, l'ajout de $0,6\text{kg/m}^3$ en FPP diminuent considérablement la porosité et la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire secondaire des bétons testés puisqu'ils vont remplir les pores. Par contre pour des dosages plus importants, on constate un phénomène inverse à 2kg/m^3 en FPP dû à l'accroissement de la porosité induit par la forte addition de la FPP qui modifie la zone de transition interfaciale (ITZ) du béton. Pour l'absorption capillaire initiale, le BF 1200 donne la plus faible valeur.

Conclusion générale et recommandations :

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés au renforcement du béton par les fibres de polypropylène. Notre attention a été portée sur les paramètres de durabilité et le comportement mécanique du béton en comparaison avec un béton témoin sans fibres. A l'issue de cette recherche et sur la base de l'analyse des résultats obtenus, nous avons tiré les conclusions suivantes :

L'étude de l'ouvrabilité du béton frais renforcé de fibres polypropylène, faite au préalable, a montré que celle-ci diminue au moment d'incorporation de ces fibres dans le béton, cela attire l'attention sur la quantité d'eau qui a été aspirée par ces fibres. Alors l'ajout de superplastifiant est recommandé pour augmenter l'ouvrabilité du béton, mais une forte proportion en fibre entraîne une diminution rapide de ce dernier du fait que l'incorporation de ces fibres se traduit par une augmentation de la surface c'est à dire l'agglomération de ces fibres dans le mélange.

Le renforcement des bétons par des fibres polypropylènes peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration des performances mécaniques, ces fibres garantissent une amélioration du comportement grâce à un meilleur contrôle des fissures qui se traduit par une bonne ductilité au béton. En revanche, un effet inverse est constaté pour les dosages élevés en fibre comme le cas trouvé pour le dosage de 2kg/m^3 et cela est dû à l'augmentation du nombre de défauts présents dans la zone d'interface fibre-matrice.

Dans le but d'étudier la durabilité du béton et après avoir fait différentes recherches et essais sur la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire sur le béton sans et avec fibre polypropylène, l'ajout de cette dernière a diminué le pourcentage des pores dans le béton qui favorise la réduction du transfert des agents agressifs dans le béton, et alors une meilleure durabilité sera obtenue.

Recommandations :

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle de ces matériaux composites, nous recommandons de compléter cette recherche par les points suivants :

- ✓ L'étude de durabilité de béton de fibres polypropylènes par l'utilisation d'autres procédures à titre d'exemple diffusion des ions chlorure, attaque sulfatique, gel-dégel...
- ✓ L'utilisation des macros fibres pour voir leur effet sur les fissures structurelles et les paramètres de durabilité ainsi que le comportement mécanique.
- ✓ L'étude de la caractérisation chimique des fibres polypropylène afin de voir l'adhérence entre fibres et ciment.
- ✓ L'étude de l'apport de la fibre polypropylène sur le paramètre de fluage, le retrait, la fatigue et les fortes températures (incendies).
- ✓ L'étude de l'apport de la fibre (la nature, la forme géométrique, la longueur, le dosage et la disposition des fibres) sur les différents paramètres à l'état frais, durci et leur durabilité.

Références bibliographiques:

- AFREM-AFGC 1997. Durabilité des bétons : Méthode recommandée pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité Compte-rendu des Journées Techniques, 11-12 décembre, Toulouse, France.
- AFROUGHSAKET, V. & OZBAKKALOGU, T. 2015. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73-82.
- AIRTECH. 2008. *Fibre de verre* [Online]. Available: <http://www.airtech-rc.com/pr161945/fibre-de-verre-coupee-de-4mm-200g> 25 mars 2017].
- ALHOZAIMY, A. M., SOROUSIAN, P. & MIRZA, F. 1996. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*, 18, 85-92.
- ANTONI, T. H., NOBORU S. 2003. Influence of stress on chloride penetration into fiber reinforced concrete. *Concrete Institute, Japan*, 25(1), 779-784., vol. 25, 779-784.
- ARDESHANA, A. & DESAI, A. 2012. Durability of fibre reinforced concrete of marine structures. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol 2, PP 215-219.
- ASTM C 1585 – 04 2007. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
- BAGHERZADEH, R. 2012. An Investigation on Adding Polypropylene Fibers to Reinforce Lightweight Cement Composites (LWC) *Journal of engineered fibers and fabrics* ; 7, 13-21.
- BELAÏDI A. BRIXI A. 2014. Etude de l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés aux états frais et durci des bétons. *mémoire de master*, Tlemcen, Algérie.
- BELARIBI, H. 2007. L'évaluation de la qualité du béton de fibres in situ par les essais non destructifs (méthode combinée ultrason et scléromètre). Mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra.
- BELHADJ, N. 2015. *Modélisation du comportement du béton de fibres par la mécanique de l'endommagement*. Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Algérie.
- BOUKLI HACÈNE S.M. 2010. *Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.
- COMMITTEE, A. C. I. 1973. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. *A.C.I. Committee 544, J. Amer. Conc. Inst.*, Vol. 70, pp. 729-744.
- DJEBALI, S. 2013. Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- ECOHABITATION. 2000. *Image-principale cellulose* [Online]. Available: <http://www.ecohabitation.com/sites/www.ecohabitation.com/files/imagecache/G12-Image-principale/guide/fiches/cellulose-web.jpg> [Accessed 20 mars 2017].
- FALLAH, S. & NEMATZADEH, M. 2017. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 132, 170-187.
- FAVRE J. L. 2004. *Sécurité des ouvrages, Risques. Modélisation de l'incertain, fiabilité, analyse des risques*, Edition Ellipses, Paris.
- FRITIH, Y. 2009 *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé.*, thèse de doctorat, université de Toulouse, France.
- INSR. 2006. *Amiante* [Online]. Available: [http://www.amiante.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-AccesParReference/RubriqueAmiante2/\\$File/fset.html](http://www.amiante.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-AccesParReference/RubriqueAmiante2/$File/fset.html) [Accessed 20 mars 2017].
- KAKOOEI, S., AKIL, H. M., JAMSHIDI, M. & ROUHI, J. 2012. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27, 73-77.
- KAMÈCHE Z. 2015. *Contribution à l'étude de la perméabilité relative au gaz et à l'eau liquide du béton ordinaire partiellement saturé*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.

- KARAHAN, O. & ATIŞ, C. D. 2011. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32, 1044-1049.
- MADHAVI, RAJU., S. & M., D. 2014. Polypropylene Fiber Reinforced Concrete- A Review *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol 4, PP 114-119.
- MAJUMDAR, A. J. & NARAYAN SWAMY, R. 1977. Fibre reinforced concrete materials. Rilem technical committee 19-FRC.
- MAKHLOUF, N. 2010. *Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux*. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- MURAHARI, K. & RAMA MOHAN RAO, P. 2013. Effects of Polypropylene fibres on the strength properties Of fly ash based concrete. *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol 2, PP13-19.
- NAJIMI, M., FARAHANI, F. M. & POURKHORSHIDI, A. R. 2009. Effects of polypropylene fibers on physical and mechanical properties of concretes. *Third International Conference on Concrete and Development, April 2009, Tehran, Iran*.
- NEVES R. D & F. DE ALMEIDA 2005. Compressive behaviour of fibre reinforced concrete. *FIB Structural Concrete*, Vol. 6, pp. 1-8.
- NF EN12390-8 2012. Essai pour béton durci – Partie 8: Profondeur de pénétration d'eau sous pression.
- NF EN 206-1 2004. « Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité
- NF EN 933-1 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.
- NF EN 934-2 2012. Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour bétons - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.
- NF EN 12350-2 2012. Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement.
- NF EN 12390-2 2012. Essais pour béton durci - Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.
- NF EN 12390-3 2012. Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.
- NF EN 12390-5 2012. Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la traction par flexion sur des éprouvettes.
- NF EN 12620 2008. Masse volumique absolue et apparente des granulats.
- NF P 18-598 1991. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : évaluation des fines - Équivalent de sable.
- NF P 18 – 541 1994. Granulats - définitions, conformité, spécifications.
- PLANETOSCOPE. 2012. *matieres-premieres-production-mondiale-de-beton* [Online]. Available: www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html [Accessed 15 mai 2017].
- RAKESH, K., PANKAJ, G. & RENU, M. 2013. Suitability of Concrete Reinforced with Synthetic Fiber for the Construction of Pavements. *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan.
- RAMEZANIANPOUR, A. A., ESMAEILI, M., GHAHARI, S. A. & NAJAFI, M. H. 2013. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411-418.
- REDAEILLI, D. 2009. *Comportement et modélisation des éléments de structures en béton fibré à ultra-haute performances avec armatures passives* Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.
- ROSSI, P. 2010. Fibres métalliques ou fibres synthétiques. *Tunnels et espace souterrain*, pp. 139-146.
- SADIQUL ISLAM, G. M. & GUPTA, S. D. 2016. Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5, 345-354.
- SAIDANI, M., SARAIREH, D. & GERGES, M. 2016. Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture. *Engineering Structures*, 113, 328-334.
- SHUTTLE WORTH, P. 2001. Fire protection of precast concrete tunnel linings on the CTRL. *Concrete*.

- SINGH, V. K. 2014. Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Concrete. *International journal of engineering sciences & research technology gorakhpur, India*.
- SÖYLEV, T. A. & ÖZTURAN, T. 2014. Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. *Construction and Building Materials*, 73, 67-75.
- SUGANDHINI H. K., NAYAK, G., SHETTY K. K. & L., G. K. 2016. Effect of Polypropylene Fibers on Durability Characteristics of No-Aggregate Concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(30).
- 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, 1672-1678.
- SWAMY, R. 1975. Fiber reinforcement of cement and concrete. *RILEM Materials and Structures*.
- TOUTANJI, H. A. 1999. Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Construction and Building Materials*, 13, 171-177.
- VIKRANT, S., VAIRAGADE, KAVITA S. KENE & V., D. N. 2012. Investigation on Compressive and Tensile Behavior of Fibrillated Polypropylene Fibers Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol. 2, pp.1111-1115.
- WANG, C. F. & NIU, D. T. 2011. Research on the Durability of Polypropylene Fiber Concrete. *In Advanced Materials Research. Trans Tech Publications*, Vol.261, pp 93-97.
- YAGOUB, M. 2009. *Evaluation de la qualite du beton de fibres in situ cas de beton autoplaçant avec des fibres mixtes*. Université Mohamed Khider -Biskra, Algerie.
- YUNIUI FIBERGLASSE. 2012. *Carbon fiberglass chopped strands* [Online]. Available: <http://www.fiberglassyn.com/Carbon-fiberglass-chopped-strands-pd6706745.html> [Accessed 25 mars 2017].
- 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, 1587-1594.

Annexes

Annexe 1:

Tableau A.1 : Table d'élimination des valeurs aberrantes pour la loi normale donnée par (FAVRE J. L., 2004) cité par (Boukli Hacène S.M., 2010)

Q	n									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.414	1.728	1.972	2.161	3.310	2.431	2.432	2.616	2.689	2.753
2	1.414	1.723	1.955	2.130	2.265	2.374	2.464	2.510	2.606	2.663
5	1.414	1.710	1.917	2.067	2.182	2.273	2.349	2.414	2.470	2.519
10	1.412	1.689	1.869	1.926	2.003	2.172	2.238	2.294	2.343	2.387
20	1.406	1.615	1.791	1.894	1.994	2.041	2.097	2.146	2.190	2.229

Annexe 2:

Calcul de V_n pour l'élimination des valeurs aberrantes :

$$v_n = \frac{(x - \bar{x})}{\sigma}$$

Avec :

x : est la valeur de l'essai de résistance,

 \bar{x} : est la valeur moyenne de la résistance, σ : est l'écart type. v_n est comparé avec $v_{\max}(n, Q)$ Avec : n : est le nombre des éprouvettes et $Q = 200\alpha$ avec un risque α fixé à 5 %.

Pour un risque $\alpha = 5\%$, nous avons $Q = 200\alpha = 10\%$ et par conséquent, on lit dans le tableau de l'annexe 1, $V_{\max}(n, Q) = 1,412$. On prend à titre d'exemple, le cas de résistance à la compression pour les différents dosages. Les valeurs de v_n calculées, sont récapitulées sur le tableau ci-dessous.

Tableau A.2: Valeur v_n calculée d'après le test des valeurs aberrantes pour la résistance à la compression

Mélange	Valeur individuelle (MPa)			Valeur moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Valeur V_n calculée			V_{\max}
	X_1	X_2	X_3	\bar{x}	Σ	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	
BO	30,8	30,3	29,3	30,13	0,76	0,87	0,22	1,09	1,412
BF600	32,9	36,4	33,3	34,20	1,91	0,68	1,15	0,47	1,412
BF900	34,4	38,5	38,4	37,10	2,34	1,15	0,6	0,55	1,412
BF1200	33,5	32,5	34,8	33,60	1,15	0,08	0,95	1,04	1,412
BF1800	34,7	32,1	29,4	32,07	2,65	0,99	0,01	1,00	1,412
BF2000	29,1	27,1	30,6	28,93	1,75	0,09	1,04	0,95	1,412

Les valeurs de v_n calculées pour le cas de résistance à la traction par flexion, sont récapitulées sur le tableau ci-dessous.

Tableau A.3: Valeur V_n calculée d'après le test des valeurs aberrantes pour la résistance à la traction par flexion

Mélange	Valeur individuelle (MPa)			Valeur moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Valeur V_n calculée			
	X_1	X_2	X_3	\bar{x}	σ	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{max}
BO	6,1	5,94	6,06	6,03	0,083	0,801	1,121	0,320	1,412
BF600	6,93	6,9	6,39	6,74	0,308	0,617	0,520	1,137	1,412
BF900	6,66	6,24	6,84	6,58	0,303	0,264	1,120	0,857	1,412
BF1200	6,45	6,12	6,63	6,40	0,259	0,193	1,083	0,889	1,412
BF1800	6,21	6,18	6,09	6,16	0,062	0,801	0,320	1,121	1,412
BF2000	6,02	5,98	5,7	5,90	0,174	0,688	0,459	1,147	1,412

D'après les résultats trouvés, nous constatons que, toutes les valeurs V_n calculées sont inférieures à la valeur V_{max} et par conséquent, il n'existe aucune valeur aberrant concernant ces résultats.

Annexe 3:

Le coefficient d'absorption capillaire est calculé en fonction de la pente de la droite du volume d'eau absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps. Les résultats trouvés sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau A.4: Résultats de la phase d'absorption primaire en volume d'eau absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps

Temps(s)	300	900	1800	3600	7200	10800	14400	21600
\sqrt{t} ($s^{0,5}$)	17,321	30	42,426	60	84,853	103,923	120	146,96
Mélange	Q/A (m)							
BO	0,000381	0,000577	0,000728	0,000898	0,001134	0,001305	0,001425	0,001541
F600	0,000317	0,000490	0,000659	0,000832	0,001129	0,001283	0,001387	0,001536
F900	0,000373	0,000527	0,000682	0,000866	0,001139	0,001318	0,001443	0,001552
F1200	0,000369	0,000529	0,000639	0,000818	0,000998	0,001153	0,001362	0,001432
F1800	0,000369	0,000550	0,000701	0,000912	0,001208	0,001433	0,001543	0,001627
F2000	0,000349	0,000545	0,000698	0,000931	0,001238	0,001399	0,001569	0,001684

Tableau A.5: Résultats de la phase d'absorption secondaire en volume d'eau absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps

Temps(s)	111600	525600	612000	698400	871200
\sqrt{t} ($s^{0,5}$)	334,065	724,983	782,304	835,703	933,381
Mélange	Q/A (m)				
BO	0,002415	0,003423	0,003523	0,003588	0,003664
F600	0,002536	0,003453	0,003527	0,003586	0,003676
F900	0,002463	0,003539	0,003643	0,003708	0,003773
F1200	0,002266	0,003389	0,003519	0,003579	0,003683
F1800	0,002650	0,003611	0,003729	0,003855	0,003942
F2000	0,002918	0,003785	0,003975	0,004059	0,004162

Annexe 4:**Exemple du calcul de coefficient de perméabilité à l'eau :**

Selon la loi de Darcy : $Q=K. A. i$

Avec : $i = \frac{\Delta H}{\Delta L}$

Alors : $K = \frac{Q \cdot \Delta L}{A \cdot \Delta H}$

Où : Q : est le débit de l'eau qui s'écoule de l'échantillon (m^3/s),

ΔL : est l'épaisseur de l'échantillon du béton (m),

A : est la surface de contact de l'eau avec l'échantillon (m^2),

ΔH : est la charge de pression calculée par la différence entre la pression à l'intérieur et l'extérieur de l'échantillon

Avec : La pression à l'extérieur = la pression atmosphérique.

Elle est prise égale à 101,3 KPa, elle peut être exprimée comme un équivalent d'une colonne d'eau de hauteur de 10,34 m.

La pression à l'intérieur est de 3 bars : $\frac{3 \text{ bars} \cdot 100 \text{ KPa}}{101,3 \text{ KPa}} * 10,34 \text{ m} = 30,62 \text{ m}$

et $A = \frac{3,14 * (10 * 10)}{4} = 78,5 \text{ cm}^2 = 0,00785 \text{ m}^2$

Donc : $K = \frac{Q * L}{0,00785 * (30,62 - 10,34)}$

En prend l'exemple du béton ordinaire :

On a : $Q = 0,00025 \text{ ml/s} = 0,00025 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ et $L = 4,96 \text{ cm} = 0,0496 \text{ m}$

Alors : $K = \frac{0,00025 * 10^{-6} * 0,0496}{0,00785 * (30,62 - 10,34)} = 7,79 * 10^{-11} \text{ m/s}$