

N° d'ordre :.....

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE M'SILA FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
Département de génie civil



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Spécialité : Génie Civil – Option : Matériaux

Présentée par : BENOUADAH Abdelatif

THÈME

Étude du comportement d'un béton compacté au
rouleau armé de fibres.

Soutenue publiquement le : 24/07/2019.

Devant le jury :

BENCHEIKH Mohammed	Prof. Université de M'Sila	Président
BEDDAR Miloud	Prof. Université de M'Sila	Rapporteur
TAALLAH Bachir	MCA. Université de Biskra	Examineur
MERDAS Abdelghani	MCA. Université de Sétif 1	Examineur
BELAGRAA Larbi	MCA. Université de M'Sila	Invité
MEDDAH Abdelazziz	MCA. Université de M'Sila	Invité

Remerciements

Tous d'abord, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant, qui m'a permis de finir ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à Mr. Miloud BEDDAR, Professeur à l'Université de M'sila, pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa totale disponibilité.

J'exprime mes vifs remerciements au Professeur BENCHEIKH Mohammed, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui formuler ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux Dr TAALAH Bachir, Dr MERDAS Abdelghani, Dr BELAGRAA Larbi et Dr MEDDAH Abdelaziz d'avoir accepté de juger ce travail.

Au cours de mes travaux de recherche, j'ai eu l'opportunité de bénéficier d'un grand soutien de Mr Abdelaziz MEDDAH maître de conférences à l'université de M'sila. Je tiens à le remercier vivement pour ses conseils et pour tout le temps qu'il m'a consacré.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur João Castro Gomes (Full Professor, Coordinator of C-MADE) à l'université of Beira Interior Portugal, dans le C-MADE Centre of Materials and Building Technologies, avec qui j'ai travaillé sur l'analyse porale et microstructural.

Je tiens également à remercier mes collègues doctorants Mr Oussama KESSAL, Mr Mohamed Cherif MECHRI, Mr Nabil MAAFI, Mr Anter BELGUENDOUZE, Mr Abdelhakim BENHAMOUDA, Mr Ahmed Abderaouf BELKADI et Mr Ali SIAD qui étaient présents au cours de ces années de thèse.

Je terminerai en remerciant de tout mon cœur mes parents, mes frères et sœur et ma fiancée qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon affection. Je leur dédie ce mémoire.

Liste Des Notations

BCR : Béton compacté au rouleau.

BCRF : Béton compacté au rouleau renforcé par des fibres.

PP : Polypropylène.

BB : Béton bitumineux.

R_c : Résistance à la compression.

R_f : Résistance à la flexion.

R_{cr} : Résistance résiduelle à la compression.

D_{max} : Diamètre maximal des granulats en mm.

MIP : Mercury Intrusion Porosimetry.

DRX : Diffraction par rayon X.

CSH : Silicate de calcium hydraté.

G: Gypse.

P: Portlandite.

E: Ettringite.

Table des matières

Introduction générale.....	4
<u>CHAPITRE I : Bibliographie sur le BCR.</u>	7
I.1 INTRODUCTION	7
I.2 DÉFINITION DU BCR	7
I.3 APERÇU HISTORIQUE SUR LE BCR	10
I.4 LES CONSTITUANTS DU BCR	12
I.4.1 Le liant	12
I.4.2 Les granulats	12
I.4.3 Les additions	14
I.4.4 Les adjuvants	14
I.5 DOMAINE D'UTILISATION DU BCR.....	14
I.5.1 Application du BCR pour les barrages	14
I.5.2 Le BCR en technique routière.....	15
I.6 COMPARAISON ENTRE LES BCR ET LES BETON BITUMINEUX.....	16
I.7 PERFORMANCE DU BÉTON COMPACTE AU ROULEAU	17
I.8 FORMULATION DE BCR	18
I.8.1 Méthodes empiriques	19
I.8.1.1 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	19
I.8.1.2 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique	20
I.8.2 Méthode semi-empirique	22
I.8.3 Méthode théorique	23
I.9 PRODUCTION, MISE EN PLACE ET COMPACTAGE DU BCR.....	23
I.9.1 Production et mis en place	23
I.9.2 Compactage.....	24
I.9.3 Compactage des éprouvettes au laboratoire.....	26
I.9.3.1 Le compactage manuel	26
I.9.3.2 Le compactage à l'aide de marteau vibrant	27
I.9.3.3 Le vibro-compactage	28
I.10 PROPRIÉTÉS DU BCR	29
I.10.1 À l'état frais	29
I.10.2 À l'état durci	30
CONCLUSION.....	32
<u>CHAPITRE II : Notions générales sur le béton de fibre</u>	33
II.1 INTRODUCTION	33

II.2 BÉTON DE FIBRE	33
II.3 DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES POUR LES BÉTONS	33
II.3.1 Fibres polypropylène	34
II.3.2 Fibres métalliques.....	35
II.3.3 Fibres de verre	37
II.4 DOMAINE D'UTILISATION DES BÉTONS DE FIBRE	39
II.5 MÉCANISMES DE FONCTIONNEMENT DES FIBRES DANS LE BÉTON.....	41
II.6 RÔLE DES FIBRES.....	43
II.7 RECHERCHE SUR L'INFLUENCE DES FIBRES SUR LE BÉTON.....	46
II.7.1 À l'état frais	46
II.7.2 À l'état durci.....	46
II.7.2.1 La résistance à la compression	46
II.7.2.2 La résistance à la traction directe	46
II.7.2.3 La résistance a flexion	47
II.7.2.4 Le retrait	47
II.7.2.5 L'absorption d'eau.....	47
II.7.2.6 La perméabilité	47
II.8 RECHERCHE SUR LE BÉTON COMPACTE AU ROULEAU RENFORCE PAR DES FIBRES	48
CONCLUSION	49
<u>CHAPITRE III : Identification des matériaux utilisés et protocoles d'essais</u>	50
III.1 INTRODUCTION.....	50
III.2 MATERIAUX UTILISES.....	50
III.2.1 Gravier.....	50
III.2.2 Sable	51
III.2.3 Liant	52
III.2.4 Eau.....	53
III.2.5 Les fibres polypropylène	53
III.2.5.1 Caractéristiques des fibres.....	54
III.3 FORMULATION DU BCR	54
III.3.1 Paramètre de formulation	55
III.3.1.1 Optimisation du squelette granulaire.....	55
III.3.1.2 Pourcentage des granulats	57
III.3.1.3 Détermination de la teneur en eau du béton.....	57
III.3.1.4 Détermination de la teneur en ciment du mélange.....	58
III.4 TECHNIQUES EXPERIMENTALES	60

III.4.1 Malaxage	60
III.4.2 Compactage	61
III.5 PROTOCOLE D'ESSAIS	61
III.5.1 L'essai de VEBE	61
III.5.2 Mesure du retrait	61
III.5.3 L'absorption capillaire	61
III.5.4 Porosité accessible à l'eau	62
III.5.5 Ultrason	63
III.5.6 La résistance à la compression	64
III.5.7 La résistance à la traction par flexion.....	64
III.5.8 La résistance à la traction par fendage	64
III.5.9 Perméabilité à l'eau	65
III.5.9.1 Procédure :.....	66
III.5.9.2 Coefficient de perméabilité	66
III.5.10 Degré de pénétration	68
III.5.11 Porosité au mercure (MIP)	68
III.5.12 Attaque d'acide	70
III.5.12.1 Variation de masse	71
III.5.13 Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X	72
CONCLUSION	72
<u>CHAPITRE IV : Comportement physique et mécanique d'un BCR renforcé par des fibres</u>	73
IV.1 INTRODUCTION	73
IV.2 À L'ÉTAT FRAIS	73
IV.2.1 La masse volumique.....	73
IV.2.2 La maniabilité	74
IV.3 À L'ÉTAT DURCI	75
IV.3.1 La masse volumique.....	75
IV.3.2 Absorption capillaire.....	76
IV.3.3 Porosité accessible à l'eau.....	77
IV.3.4 Retrait.....	78
IV.3.5 La résistance à la compression.....	79
IV.3.6 La résistance à la traction par flexion	81
IV.3.7 La résistance à la traction par fendage	84
IV.3.8 Vitesse ultrasonique	84
IV.3.9 Observation au microscope optique	85

CONCLUSION	86
<u>CHAPITRE V : Effet des fibres sur l'écoulement hydrique et la durabilité d'un BCR.</u>	87
V.1 INTRODUCTION	87
V.2 DEGRÉ DE PÉNÉTRATION	87
V.3 COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ (K).....	89
V.4 POROSITÉ AU MERCURE.....	92
V.4.1 Distribution des pores par intrusion de mercure (MIP).....	94
V.4.2 Répartition des pores	102
V.5 LA RÉSISTANCE AUX ATTAQUES ACIDES	102
V.5.1 Variation de Masse	102
V.5.2 La résistance à la compression	104
V.5.2.1 Relation entre la perte de résistance à la compression et la perte de masse après attaque H ₂ SO ₄	106
V.5.3 Diffraction au rayon X	107
V.5.4 Aspect visuel	113
CONCLUSION	113
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	114
Perspectives.....	116
RÉFÉRENCES	118

Liste des figures

Figure I. 1 : Comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus en fonction de la teneur en liant(Tremblay 1997).....	8
Figure I. 2 : Mise en place d'un BCR routier (ACI Comimittee 2001).	9
Figure I. 3 : Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).....	9
Figure I. 4 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Forbes 2007).....	10
Figure I. 5 : Barrage du lac Robertson en BCR au Canada (ZDIRI M 2008).....	15
Figure I. 6 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (ZDIRI M 2008).....	16
Figure I. 7 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB (Saucier F. 1995).....	17
Figure I. 8 : Ségrégation d'une éprouvette 16X32 de BCR (ZDIRI M 2008).	18
Figure I. 9 : Paramètres optimums d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).	20
Figure I. 10 : Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).....	21
Figure I. 11 : Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).	21
Figure I. 12 : Dosage, malaxage et transport du BCR (ZDIRI M 2008).....	24
Figure I. 13 : Schéma du compactage typique du BCR (Pittman 1989).....	26
Figure I. 14 : Éprouvettes de BCR préparées selon le procédé Proctor modifié (ZDIRI M 2008).....	27
Figure I. 15 : Marteau vibrant (Harrington 2010).	28
Figure I. 16 : Principes de la méthode vibro-compactage (ZDIRI M 2008).....	29
Figure I. 17 : Résistance à la compression par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).....	31
Figure I. 18 : Résistance à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).....	31
Figure I. 19 : L'effet des fibres polypropylène et de la pouzzolane sur un BCR : a) sans pouzzolane. b) 15 % de pouzzolane. c) 30 % de pouzzolane (Madhkhan, Azizkhani et al. 2012).....	32
Figure II. 1 : Comportement de béton renforcé par des fibres de polypropylène (Pei, Wang et al. 2004) (a) Comportement à la flexion ; (b) Comportement à compression ; (c) Comportement au choc.....	35
Figure II. 2 : Différentes formes des fibres d'acier (BEDDAR 2007).	36

Figure II. 3 : Photos de différentes fibres métalliques pour bétons(CT 2014).....	37
Figure II. 4: Évolution comparative à la flexion d'un ciment renforcé en fibres de verre (FORDYCE, M. W. & WODEHOUSE, 1983).....	39
Figure II. 5: Comportement à la traction d'un mortier renforcé en fibre de verre (FORDYCE, M. W. & WODEHOUSE, 1983).....	39
Figure II. 6 : Comportements en traction directe en fonction du pourcentage en fibres (Taylor 1997).....	42
Figure II. 7: Propagation d'une fissure dans un matériau en état de service (Beddar, 2007). .	43
Figure II. 8: Comportement de charge-déformation de béton avec fibre et béton sans fibre (Beddar, 2007).....	44
Figure II. 9: Béton sans fibre sollicité en traction (Djebali. S, 2013).	45
Figure II. 10: Béton avec fibre sollicité en traction (Djebali. S, 2013).....	45
Figure II. 11: La perméabilité par rapport à la contrainte appliquée au béton (T. Plagué 2017).	48
Figure III. 1 : Courbe granulométrique des graviers utilisés.....	51
Figure III. 2 : Courbe granulométrique des sables utilisés.....	52
Figure III. 3 : Fibres polypropylènes utilisés pour cette étude.....	54
Figure III. 4 : Courbe combinée des agrégats utilisés par rapport au fuseau proposé par Piggot d'après (J. Marchand 1997).....	57
Figure III. 5 : Relation entre la densité et la teneur en eau.	58
Figure III. 6 : Résistance en compression en fonction de la teneur en ciment à 7 jours d'âge.	59
Figure III. 7 : Dispositif de mesure de l'absorption capillaire.	62
Figure III. 8 : Bain bouillon et pesée hydrostatique pour la porosité accessible à l'eau.....	63
Figure III. 9 : Mesure de la vitesse du son.	64
Figure III. 10 : Perméamétrie à l'eau pour béton.	67
Figure III. 11 : Cellule d'éprouvette et cellules d'eau de perméamètre à l'eau pour béton.	68
Figure III. 12 : Prosimètre au mercure.	70
Figure III. 13 : Les échantillons de BCR immergés dans des solutions de H ₂ SO ₄ (3.5 % et 5 %).	71
Figure III. 14: Vue d'ensemble du diffractomètre.	72
Figure IV. 1 : Masse volumique à l'état frais des différents mélanges de BCR.	73
Figure IV. 2 : Maniabilité des mélanges de BCR représenté par le VEBE (s).	74

Figure IV. 3 : Masse volumique à l'état durci des différents mélanges de BCR.	76
Figure IV. 4 : Absorption capillaire des différents mélanges de BCR.	77
Figure IV. 5 : Porosité accessible à l'eau des différents mélanges de BCR.	78
Figure IV. 6 : Variation du retrait des différents mélanges de BCR.	79
Figure IV. 7 : Résistance à la compression des différents mélanges de BCR à 7, 14 et 28 jours.	80
Figure IV. 8 : Variation de la résistance à la compression des différents mélanges de BCR. .	81
Figure IV. 9 : Résistance à la traction par flexion des différents mélanges de BCR.	82
Figure IV. 10 : Variation de la résistance à la flexion des différents mélanges de BCR.	82
Figure IV. 11 : Aspect des éprouvettes à la rupture.	83
Figure IV. 12 : Résistance à la traction par fendage des différents mélanges de BCR.	84
Figure IV. 13 : Variation de la vitesse ultrasonique des différents bétons.	85
Figure IV. 14 : Photographie de microscope optique des BCR0 et BCR2.5.	86
Figure V. 1 : Degré de pénétration des différents mélanges de BCR.	88
Figure V. 2 : Degré de pénétration du BCR 0 kg/m ³	88
Figure V. 3 : Degré de pénétration du BCR 1 kg/m ³	89
Figure V. 4 : Degré de pénétration du BCR 2.5 kg/m ³	89
Figure V. 5 : Coefficient de perméabilité (k) des différents mélanges de BCR.	90
Figure V. 6 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps.	91
Figure V. 7 : Relation entre la perméabilité à l'eau et la tortuosité.	91
Figure V. 8 : Porosité par intrusion de mercure (MIP) des différents mélanges de BCR.	93
Figure V. 9 : Diamètre des pores médians (volume) des différents mélanges de BCR.	93
Figure V. 10 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 0.	95
Figure V. 11 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 0.	95
Figure V. 12 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 0,5.	96
Figure V. 13 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 0,5.	96
Figure V. 14 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 1.	97

Figure V. 15 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 1.....	97
Figure V. 16 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 1,5.....	98
Figure V. 17 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 1,5.....	98
Figure V. 18 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 2.....	99
Figure V. 19 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 2.....	99
Figure V. 20 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 2,5.....	100
Figure V. 21 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 2,5.....	100
Figure V. 22 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores des BCR cumulé.....	101
Figure V. 23 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores des BCR cumulé.....	101
Figure V. 24 : Pourcentage des pores des différents mélanges.....	102
Figure V. 25 : Variation de la masse des BCR après 30 jours de conservation sous acide sulfurique.....	103
Figure V. 26 : Variation de la masse des BCR après 60 jours de conservation sous acide sulfurique.....	104
Figure V. 27 : Résistance à la compression résiduelle des BCR après 30 jours de conservation sous acide sulfurique.....	105
Figure V. 28 : Résistance à la compression résiduelle des BCR après 60 jours de conservation sous acide sulfurique.....	106
Figure V. 29 : Variation de la perte de résistance à la compression en fonction de la perte de masse.....	106
Figure V. 30 : Diagramme de diffraction X du BCR avec 1 kg/m ³ de fibres PP.....	109
Figure V. 31 : Diagramme de diffraction X du BCR avec 1 kg/m ³ de fibres PP immergé dans l'acide sulfurique 3.5 %.....	110
Figure V. 32 : Diagramme de diffraction X du BCR avec 1 kg/m ³ de fibres PP immergé dans l'acide sulfurique 5 %.....	111

Figure V. 33 : Diagramme cumulé de diffraction X des BCR avec 1 kg/m³ de fibres PP..... 112
Figure V. 34 : Les observations visuelles des dégradations..... 113

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage (J. Marchand 1997).	9
Tableau I. 2 : Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après (USACE 2000).....	13
Tableau I. 3 : Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après (USACE 2000).	13
Tableau I. 4 : Surcharges utilisées pour le compactage d'après (BaCaRa 1996).....	29
Tableau I. 5 : Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN- ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).....	30
Tableau II. 1 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres polypropylène(BEDDAR 2007).	34
Tableau II. 2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier (BEDDAR 2007).....	36
Tableau II. 3 : Compositions des fibres de verre (BEDDAR 2007).	38
Tableau II. 4. : Quelques domaines d'utilisations du béton de fibres (Beddar, 2007).....	40
Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers utilisés.....	51
Tableau III. 2 : Caractéristiques physiques des deux sables utilisés.	52
Tableau III. 3 : Analyse chimique élémentaire du ciment Portland composé (% massique)...	53
Tableau III. 4 : Compositions minéralogiques du ciment Portland composé (% massique). ..	53
Tableau III. 5: Les différentes caractéristiques de fibres utilisées (annexe 1 fig.1).....	54
Tableau III. 6: Tamisât des différentes fractions d'agrégats.	56
Tableau III. 7: Pourcentage des granulats.	57
Tableau III. 8: Les différentes proportions de mélange.	59
Tableau III. 9: Les différentes proportions de mélange avec les quantités de fibres.	60
Tableau III. 10: Procédure de malaxage.....	61
Tableau III. 11: Classe de consistance VEBE.....	61

RÉSUMÉ

Le présent travail vise à étudier le comportement d'un béton compacté au rouleau renforcé par des fibres polypropylènes. Le béton compacté au rouleau (BCR) est un matériau utilisé habituellement pour la construction des barrages et des pavages.

Notre étude est centrée sur le béton compacté au rouleau destiné à la construction des pavages (routes, aire d'entreposage et aérodrome). La formulation et la confection des BCR sont donc effectuées suivant les recommandations routières. Afin de voir le comportement des fibres polypropylènes sur les BCR, six mélanges avec différentes quantités de fibres ont été préparés (0, 0.5, 1, 1.5, 2 et 2.5 kg/m³). Des séries de différents essais ont été entreprises pour comprendre le comportement des BCR vis-à-vis à l'addition des fibres. Les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité ont été évaluées.

Le programme expérimental nous a permis de tirer plusieurs conclusions sur le comportement des bétons renforcées par des fibres. La première série d'essais est consacrée aux propriétés physiques où on a remarqué que les BCR sont devenus plus légers au fur et à mesure que le dosage en fibres augmente, la maniabilité c'est vu affecté négativement par le renforcement des fibres. Pour le retrait, les résultats montrent clairement que les fibres améliorent nettement le comportement des BCR vis-à-vis au retrait. La deuxième série d'essais est consacrée aux performances mécaniques où on a conclu que les tractions par flexion et par fendage se sont améliorées par l'ajout de fibres, alors que la résistance à la compression a d'abord connu un palier favorable, mais à des quantités importantes de fibre, elle a clairement diminué.

Finalement, les résultats des essais relatifs à la durabilité ont montré que le degré de pénétration et le coefficient de perméabilité ont baissé à des dosages de (0.5, 1 et 1.5 kg/m³) par rapport au mélange témoin (sans fibre), en revanche ces valeurs ont augmenté pour les mélanges avec 2 et 2.5 kg/m³ de fibres.

Pour la durabilité des BCR exposés au milieu acide, le béton renforcé par des fibres polypropylènes a montré un comportement positif par rapport au BCR témoin.

Mots clés : Béton compacté au rouleau, énergie de compactage, fibre, durabilité, résistance à la flexion, perméabilité, porosité.

Abstract

The present work aims to study the behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fibers, Roller compacted concrete (RCC) is a material usually used for the construction of dams and pavements.

Our study focuses on roller compacted concrete used in pavement construction (roads, storage areas and aerodrome). The formulation and construction of the RCC's are therefore carried out according to the road recommendations. In order to see the behaviour of the polypropylene fibers on the RCC's, six mixtures with different amounts of fibers were prepared (0, 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5 Kg / m³). Series of different tests were undertaken to understand the behaviour of RCC's with different amount of fiber. The physical, mechanical and durability properties were evaluated.

The experimental program has allowed us to draw several conclusions about the behaviour of RCC reinforced with fibers. The first test series is devoted to physical properties, it has been noticed that the RCC's have become lighter as the fiber dosage increases, but the workability presents a negative effect with increasing of fibers amount. For the shrinkage, results show clearly that the fibers improve significantly the behaviour of RCC. The second series of tests is devoted to the mechanical performance, bending and splitting tensile have been improved by the addition of fibers, while compressive strength gives us a favourable behaviour initially, but with significant amounts of fiber, it has shown a decrease.

Finally, the results of the durability tests showed that the degree of penetration and the coefficient of permeability decreased at amounts of (0.5, 1 and 1.5 Kg / m³) compared to the control mixture (without fiber). These values increased for mixtures with 2 and 2.5 Kg / m³ of fiber dosages. For the durability of RCC's exposed to the acid solution, the concrete reinforced with polypropylene fiber showed positive behaviour compared to the control RCC.

Keywords: Roller compacted concrete, compacting energy, fiber, durability, flexural strength, permeability, porosity.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك الخرسانة المرصوفة والمدعمة بألياف البولي بروبيلين، وهي عبارة عن مادة تستخدم عادة لبناء السدود والطرق. وتركز دراستنا على الخرسانة المرصوفة للإنشاء الأرصفة (الطرق، مناطق التخزين والمطارات). وبناء على ذلك، فإن اعداد هذه الخرسانة تتم وفقا للتوصيات المستخدمة لإنشاء الطرق. من أجل رؤية سلوك ألياف البولي بروبيلين على الخرسانة، تم إعداد ست خلطات مع كميات مختلفة من الألياف (0، 0.5، 1، 1.5، 2 و 2.5 كغ / م³). وقد أجريت سلسلة من الاختبارات المختلفة لفهم سلوك الخرسانة بعد إضافة الألياف على مختلف الخواص الفيزيائية، الميكانيكية والديمومة.

وقد سمح لنا البرنامج التجريبي باستخلاص عدة استنتاجات حول سلوك الخرسانة المدعمة بالألياف. وقد خصصت أول سلسلة اختبارات للخصائص الفيزيائية، إذ لوحظ أن الخرسانة أصبحت أخف وزنا مع زيادة كمية الألياف. بالنسبة للدونة فقد اثرت إضافة الألياف سلبا على هذه الخاصية. فيما يخص الانكماش فالنتائج تظهر بوضوح أن الألياف تحسن بشكل كبير من سلوك الخرسانة. تم تكريس السلسلة الثانية من الاختبارات للأداء الميكانيكي، وقد لوحظ تحسن في الشد بالانحناء والصدع بعد إضافة الألياف، في حين شهدت قوة الانضغاط في البداية مستوا مواتيا، ولكن بإضافة كميات كبيرة من الألياف، لوحظ ان قوة الضغط تتناقص.

أخيرا، أظهرت نتائج اختبارات الديمومة أن درجة الاختراق ومعامل النفاذية انخفضت بالنسبة للخرسانة المدعمة بكميات (0.5، 1 و 1.5 كغ / م³) مقارنة بالخليط الخالي من ألياف. زادت هذه القيم عند إضافة 2 و 2.5 كغ / م³ من الألياف. وبالنسبة لديمومة الخرسانة المعرضة للوسط الحامضي، أظهرت الخرسانة المدعمة بألياف البولي بروبيلين سلوكا إيجابيا بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية.

كلمات البحث: الخرسانة المرصوفة، طاقة الضغط، الألياف، الديمومة، المتانة، الانحناء، نفاذية،

المسامية.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Malgré l'existence de plusieurs moyens de transport tels que le transport maritime, ferroviaire et aérien, le transport routier demeure le mode de transport le plus utilisé. De ce fait, la construction des routes et des pavages subit une grande croissance de nos jours. Les récentes recherches sont menées sur le développement des techniques et des méthodes afin d'obtenir des routes plus résistantes et surtout plus durables.

Le domaine des routes possède deux axes principaux : le premier étant la chaussée souple qui est la plus répandue dans le monde. Les couches de roulement en béton bitumineux (BB) présentent l'inconvénient de leur souplesse sous l'effet d'un fort trafic. D'un point de vue environnemental, leur dépendance à l'hydrocarbure pose des problèmes écologiques. Le second axe est la chaussée rigide, qui s'appuie sur des routes en béton. La principale différence structurelle entre ces deux techniques est la façon dont les charges de trafic sont transférées vers la plate-forme.

Le béton compacté au rouleau (BCR), pour pavage, est une technique de construction des routes. Ce type de béton permet d'avoir une bonne répartition des charges vers la couche de fondation. La composition des BCR est la même que celle des bétons conventionnels (ciment, granulats, eau et éventuellement des adjuvants). Il se distingue par sa faible quantité d'eau, de liant et d'un affaissement proche de 0 cm. Ces caractéristiques sont similaires à un sol à l'état frais. La réalisation de ce type de chaussée nécessite des engins de travaux publics comme ceux utilisés pour un béton bitumineux. En termes d'économie, ces bétons présentent un faible coût et une bonne durabilité. Ce béton peut aussi être utilisé pour la construction des aires d'entreposage, des aérodromes et des barrages.

L'utilisation de BCR est très répandue dans le monde (États-Unis, Canada, Japon et Allemagne), néanmoins, les chercheurs poursuivent leurs travaux afin d'améliorer les caractéristiques de ces bétons. Pour cela, plusieurs études sont menées pour améliorer la durabilité, les performances mécaniques et physiques des BCR.

En général, l'introduction des fibres, qu'elles soient métalliques ou synthétiques dans les matériaux cimentaires améliore leurs performances : limitation des propagations des fissures, amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction, à la flexion) et

amélioration de la ténacité du béton durci. Cependant, les travaux sur le renforcement du béton compacté au rouleau par des fibres restent très limités dans la littérature.

Problématique

Malgré les nombreux avantages des BCR, la réalisation de ces bétons dans les routes en Algérie est très limitée. Le présent travail s'inscrit dans le cadre du développement d'un BCR confectionné à base de matériaux locaux renforcé par des fibres synthétiques (Polypropylène). Cette initiative vise, d'une part, à encourager l'utilisation de ce béton comme revêtement routier, et d'autre part, à investiguer sur la possibilité de l'utilisation des fibres synthétiques pour le renforcement des bétons compactés aux rouleaux. Le programme expérimental entrepris lors de cette étude consiste à étudier le comportement physique, mécanique et hydrique des BCR renforcés par des fibres.

En effet, le positionnement de ce béton (route) à proximité des réseaux d'assainissement peut engendrer des problèmes de transfert hydrique et de durabilité vis-à-vis aux différents acides. De ce fait, une étude de la perméabilité et du comportement des BCR sous attaque d'acide sulfurique a été effectuée.

Présentation de la thèse

Ainsi, le mémoire de thèse se compose en deux grandes parties.

La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en deux chapitres :

- Le premier est consacré à des généralités sur les bétons compactés au rouleau (l'historique, le domaine d'utilisation, la production, la mise en place et la formulation).
- Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur la fibre de polypropylène utilisée et son influence sur les bétons à l'état frais, durcissant et la durabilité.

La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit :

- Une description détaillée de tous les matériaux utilisés et de la caractérisation classique des mélanges retenus et les différents essais effectués ont été présentés. Ceci constitue le troisième chapitre.

- Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude du comportement physico-mécanique des BCR renforcés par des fibres.
- Le dernier chapitre présente l'étude des performances hydrique et la durabilité des BCRF telle que : le degré de pénétration, la perméabilité à l'eau, la porosité au mercure et l'attaque chimique (H_2SO_4). Une caractérisation microstructurale des différents mélanges confectionnés a été effectuée. Une analyse minéralogique a été faite pour avoir une description approfondie des BCRF soumis à une agression chimique.

La thèse est finalisée par une conclusion qui regroupe l'extrait des résultats obtenus et les recommandations pour les futures recherches.

CHAPITRE I : Bibliographie sur le BCR.

I.1 INTRODUCTION

Un intérêt croissant pour les routes en béton compacté au rouleau se développe dans le monde entier, tant pour la réalisation des grands axes routiers et autoroutes que pour les voiries urbaines ou pour des applications plus modestes. Les principales raisons qui ont poussé à ce développement sont dues à la satisfaction qu'elles apportent aux usagers comme aux responsables des réseaux. La chaussée en BCR apporte à l'utilisateur un niveau de service élevé : adhérence par tous temps, absence d'orniérage, visibilité due à une réflexion de la lumière. Le bilan économique à long terme est très favorable du fait de la longévité des chaussées en béton et de leurs entretiens réduits.

I.2 DÉFINITION DU BCR

Le béton compacté au rouleau est un béton spécial qui se distingue par sa faible quantité de ciment par rapport au béton conventionnel (varie entre 60 à 300 kg/m³) et son affaissement quasi nul. Il est composé d'un mélange de ciment, d'eau, d'agrégats inertes et parfois d'adjuvants. La seconde caractéristique qui distingue le BCR des autres béton est sa mise en œuvre qui nécessite un matériel spécifique comme les finisseurs et les engins de travaux publics à haut pouvoir de compactage comme les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les plaques vibrantes, les bulldozers... etc.

La figure I. 1 présente une comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus en fonction de la teneur en liant, le BCR contient une quantité de liant inférieure par rapport à un béton ordinaire et une quantité plus grande que celle utilisée dans la technique du gravier traité, qui nécessite généralement une quantité de ciment de l'ordre de 4-5 % de la masse totale des granulats (Choi 2005). La composition de BCR génère généralement un mélange ferme, ce qui rend l'opération de serrage du squelette granulaire par vibration insuffisante. Cette phase est souvent réalisée par l'apport d'une énergie de compactage à l'aide des rouleaux compacteurs.

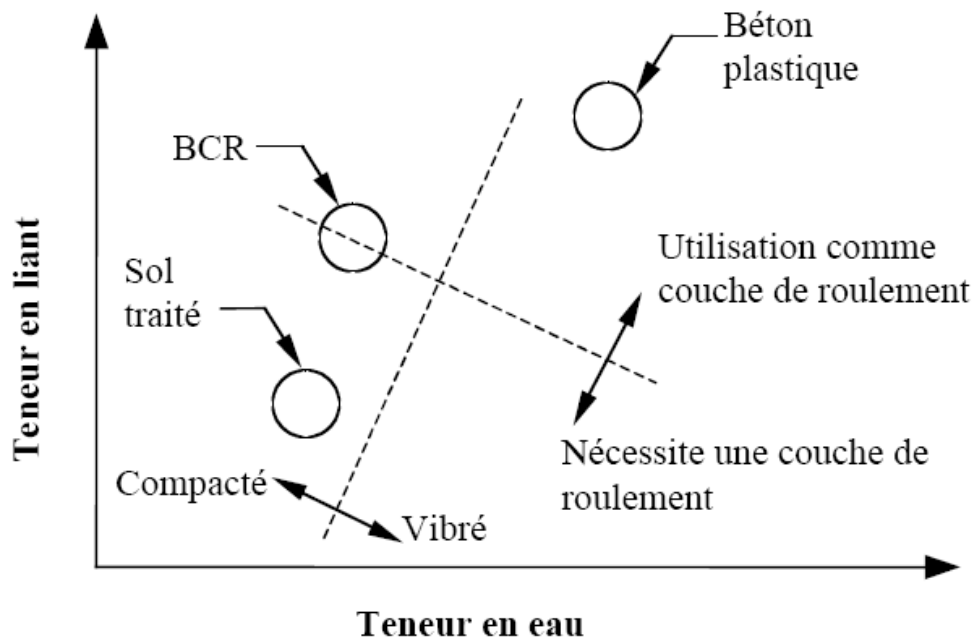


Figure I. 1 : Comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus en fonction de la teneur en liant (Tremblay 1997).

L'utilisation des additions minérales est une solution très courante pour les bétons compactés au rouleau afin d'améliorer des caractéristiques à l'état frais ou durci. Ces ajouts minéraux peuvent être ; naturels ou artificiels, pré-mélangé au ciment ou non, tels que la fumée de silice, le laitier et la cendre volante. Les adjuvants peuvent aussi être utilisés pour les BCR afin d'améliorer des caractéristiques visées.

Le BCR s'est développé selon deux axes majeurs :

- BCR pour barrages (ouvrages massifs).
- BCR pour routes (pavages).

Le BCR est utilisé principalement pour la construction des chaussées et des barrages (Figure I.2 et I.3), sa formulation dépend de la destination du projet. Le tableau I.1 présente une comparaison entre deux mélanges de BCR, dont le premier est destiné pour la construction d'un barrage et le second pour un projet routier. Puisque le BCR routier est plus sollicité en service (solllicitations mécaniques et climatiques), il nécessite une résistance mécanique plus élevée ce qui requiert l'utilisation d'une quantité plus grande de liant. En plus, le diamètre maximal de granulats est limité à 20 mm en corps routier, pour éviter le problème de ségrégation.

CHAPITRE I

Tableau I. 1 : Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage (J. Marchand 1997).

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
Teneur en liant (kg/m^3)	60-250	200-350
Rapport : eau/liant	0,4-0,8	0,3-0,4
Diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
Résistance à la compression 28 (MPa)	15	45
Temps VEBE (s)	10-25	30-60



Figure I. 2 : Mise en place d'un BCR routier (ACI Comitee 2001).



Figure I. 3 : Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).



Figure I. 4 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Forbes 2007).

I.3 APERÇU HISTORIQUE SUR LE BCR

Le BCR, en anglais RCC (Roller Compacted Concrete) et sa variante japonaise RCD (Roller Concrete in Dam), est un béton utilisé pour la construction des barrages et le revêtement des routes (béton routier).

Des chercheurs tels que Jeuffroy et Sauterey (Jeuffroy G 1989) ont considéré que l'emploi des liants hydrauliques ou pouzzolaniques dans les structures de chaussées a commencé dès le 1^{er} siècle av. J.-C. par les Romains, puisqu'une proportion de liant (2 parties de pouzzolane naturelle + 1 partie de chaux) a été destinée et utilisée pour lier les pierres des chaussées romaines. Ces routes, assurant le roulage des chars, sont composées par des dalles et sont considérées comme les ancêtres des chaussées rigides en béton.

En France, les chaussées en béton ont été réalisées au début du 20^{ème} siècle sur quelques tronçons de route d'approvisionnement dans la zone de Grenoble entre les cimenteries et les carrières. C'est en 1924 que la direction des Ponts et chaussées du Pas-de-Calais a lancé un programme de transformation d'empierrements et d'anciens pavages en béton, notamment sur la route Nationale N° 43 entre Lillers et Chocques (Jeuffroy G 1989).

Après ce succès, plusieurs autres projets ont été réalisés dans le département du nord pour la construction des routes nationales et de voies départementales de longueur totale dépassant 100 km. Le procédé consiste à la récupération des pavés pour construire des bordures et des caniveaux afin de caler la chaussée en béton. Ils ont utilisé aussi le sable de pavage de l'ancienne chaussée comme une couche de base. Cette couche a été d'abord étalée puis compactée, sur laquelle un béton relativement sec était mis en place et cylindré. Ce procédé peut être considéré comme l'ancêtre du Béton compacté. La chaussée, ainsi construite, est composée de deux couches, une couche inférieure réalisée avec des matériaux roulés et un faible dosage en ciment (250 kg/m^3), alors que la couche supérieure est plus mince et plus fortement dosée (400 kg/m^3) et elle est à base de granulats durs concassés. Les deux couches sont exécutées l'une après l'autre sans interruption afin d'assurer une forte adhérence (Jeuffroy G 1989). Plusieurs autres applications ont été réalisées en Europe et dans d'autres pays en Asie et au Canada. Jeuffroy et Sauterey (Jeuffroy G 1989) ont indiqué que la Belgique avait réalisé, à partir de 1912, des routes et des aires bétonnées sur les accès des mines. L'Allemagne a réalisé aussi, à partir de 1933, les premiers grands chantiers de construction d'autoroutes avec chaussées rigides. La France a réalisé également en 1938, le tronçon de l'autoroute de l'Ouest de Saint-Cloud à Orgeval en béton. Le procédé consiste à l'utilisation de bétons relativement secs et un serrage particulièrement énergique. La finition de ces bétons serrés était assurée par une finisseuse transversale.

Dans le continent américain, Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930 (Anderson 1986). D'après Huang (Huang 2004), la première chaussée rigide aux USA a été construite en 1893 à Bellefontaine (Ohio) et la deuxième en 1908 au Michigan. Les premières utilisations du BCR sous forme de Bétons très maigres et compactés au Rouleau pour la construction de barrages reviennent à 1960 (ASTM-C496 2011). Les statistiques de 2001 (Huang 2004) montrent que près de 95 000 km aux USA ont été construits en béton hydraulique. Selon Gauthier et al. (Gauthier P 2004), la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord date depuis 1942 par le corps des ingénieurs de l'armée américain (US Army Corps of Engineers) qui ont construit une voie à Yakima.

Récemment, plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Australie et d'autres pays. On remarque aussi, d'après Gauthier et al. (Gauthier P. 2000), que la majorité des revêtements en BCR construits dans le monde (USA, Canada, Espagne...) ont été fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale compris entre 12 et 16 % de la masse totale des constituants secs. On constate aussi une grande utilisation

des ciments ternaires composés de ciment, de laitiers et de fumée de silice ou composés de ciment, de cendres volantes et de fumée de silice.

En Afrique, le BCR reste, jusqu'à maintenant, une nouvelle technique et il ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages de Rmil en Tunisie, Koudiat Asserdoune en Algérie et Ain Al Koreima au Maroc, alors que l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée. Dernièrement, la construction d'une route en BCR a été réalisée en Algérie à la fin de l'année 2017. Ce projet réalisé par une société française consiste à relier la cimenterie de Lafarge Holcim M'sila, à la route Nationale RN60.

I.4 LES CONSTITUANTS DU BCR

I.4.1 Le liant

Pour chaque béton, le ciment est un élément très important, car il procure la résistance mécanique qui est un facteur très important, donc plus la teneur en ciment est grande, plus la résistance mécanique augmente. Mais des recherches ont été -faites sur la quantité de la teneur en liant dans le béton et elles ont conclues qu'une quantité excessive de ciment peut nuire sérieusement à la durabilité du béton. En effet, la présence du ciment à une forte quantité peut entrainer un surdosage en C_3A . Ce composant réagit avec le gypse ce qui crée une ettringite expansive néfaste pour notre béton.

L'un des nombreux objectifs de cette étude est de détermine le dosage optimal du ciment qui doit se tenir dans un intervalle précis pour des raisons économiques et de durabilité. Pour cela, le liant utilisé doit avoir des caractéristiques particulières telles que :

- Une faible chaleur d'hydratation.
- Une bonne résistance aux agents agressifs.
- Une quantité d'aluminate tricalcique C_3A faible pour éviter les réactions nocives pour le béton.

I.4.2 Les granulats

Les granulats sont considérés comme le maillon qui procure au béton sa résistance mécanique. Ils sont définis par les termes fines, sables, graviers et cailloux. Leurs dimensions varient entre 0 et 125 mm. Le béton compacté au rouleau contient une quantité de granulats très importante comprise entre 75 % et 85 % qui peuvent représenter les 4/5 du mélange. Le squelette granulaire doit donc être bien défini pour obtenir une bonne compacité afin d'attendre

CHAPITRE I

un compactage optimal. La mauvaise compacité du squelette granulaire entraîne des désagréments qui peuvent nuire à la qualité du béton comme l'apparition de ségrégation, augmentation de la porosité et la propagation des microfissures provoquée par le retrait.

La grosseur des grains pour un béton compacté au rouleau destiné pour les routes est de 20 mm afin d'éviter leur ségrégation lors de la fabrication et leur mise en place, pour rendre le malaxage plus facile et améliorer l'homogénéité. Selon USACE (USACE 2000), l'emploi de plusieurs fractions de différentes tailles permet d'optimiser le squelette granulaire. En effet, il est préférable de situer les fractions des granulats grossiers et fins selon les tableaux (I.2 et I.3) (USACE 2000).

Tableau I. 2 : Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après (USACE 2000).

Diamètre (mm)	Tamisât cumuler (%)		
	4,75 à 75 mm	4,75 à 50 mm	4,75 à 19 mm
75	100	/	/
63	88	/	/
50	76	100	/
37,5	61	81	/
25	44	58	/
19	33	44	100
12,5	21	28	63
9,5	14	18	41
4,75	-	-	-

Tableau I. 3 : Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après (USACE 2000).

Diamètre (mm)	Tamisât cumuler (%)
9,5	100
4,75	95-100
2,36	75-95
1,18	55-80
0,6	35-60
0,3	24-40
0,15	12-28
0,075	6-18
Module de finesse	2,1-2,75

I.4.3 Les additions

Les additions sont considérées dans le monde de la construction comme étant des matériaux minéraux finement broyés qui ont le pouvoir de procurer au béton des propriétés particulières. Ils peuvent apporter au BCR une bonne maniabilité à l'état frais, une durabilité à l'état durci ainsi qu'une bonne compacité. Ces additions peuvent aussi être utilisées comme élément fin en cas d'insuffisances de fines. D'après Gagné (Gagné 2004), les études ont montré aussi que la majorité des revêtements en BCR construits ces dernières années ont été fabriqués avec des ciments hydrauliques composés avec des additions soit de fumées de silice, de laitiers ou de cendres volantes.

I.4.4 Les adjuvants

Le béton est un matériau idéal pour la construction par sa bonne résistance mécanique et sa durabilité, mais il peut être amélioré par l'ajout d'un constituant appelé « adjuvant » qui peut procurer des caractéristiques intéressantes. Les adjuvants sont des produits chimiques qui sont introduits dans le béton afin d'améliorer ou de modifier des caractéristiques précises. Leurs incorporations au béton se font au cours du malaxage et ils peuvent être organiques ou inorganiques selon leurs compositions chimiques. Parmi ces adjuvants utilisés pour le BCR, on cite : les réducteurs de prise, les entraîneurs d'airs, les accélérateurs de durcissement et les hydrofuges.

Gauthier et Marchand ont indiqué que la plupart des adjuvants utilisés pour la confection des bétons conventionnels peuvent être utilisés pour les BCR. Le dosage des adjuvants pour les BCR diffère des dosages habituellement utilisés pour les bétons courants (Gagné 2004).

I.5 DOMAINE D'UTILISATION DU BCR

Le béton compacté au rouleau est utilisé dans deux grands axes de construction, la construction des barrages et le revêtement des chaussées. Les nombreux avantages de ce béton l'ont rendu très populaire dans la construction des barrages et des routes. Cependant, une différence non négligeable entre ces deux applications existe. En effet, la nature des matériaux, leurs proportions et la mise en place du béton sont très différentes entre ces deux applications.

I.5.1 Application du BCR pour les barrages

Le béton compacté au rouleau est un béton très rapide à mettre en place et à mettre en service, pour cela, son utilisation pour les barrages parés bien utiles, de plus il permet de réaliser des pentes plus fortes par rapport à l'utilisation de terre et de digues de retenue. Le BCR en

corps de barrages à une quantité de liant relativement faible par rapport au béton conventionnel. La dimension maximale des granulats des BCR destinés pour les barrages varie entre 60 à 150 mm. Les Résistances requises pour les projets en BCR en corps de barrages varient entre 7 à 20 MPa.

Au Canada, par contre, la construction de barrages en BCR est relativement plus développée dont on peut citer le barrage de Manouane. En outre, en Amérique du Nord, le plus grand barrage en BCR se trouve à Olivenhain, Californie (USA). Le plus haut barrage en BCR est le barrage Miel en Colombie de 617 m de hauteur, suivi par le barrage de Biobio au Chili de 503 mètres de hauteur. Tha Dan Canal Dam est le plus grand Barrage en BCR au monde d'une longueur de 2720 mètres et un volume de BCR de 5.470.000 m³. Le barrage de Beni Haroun en Algérie est considéré comme le plus grand barrage en Afrique avec 710 mètres de longueur et 120 mètres de hauteur (ZDIRI M 2008).

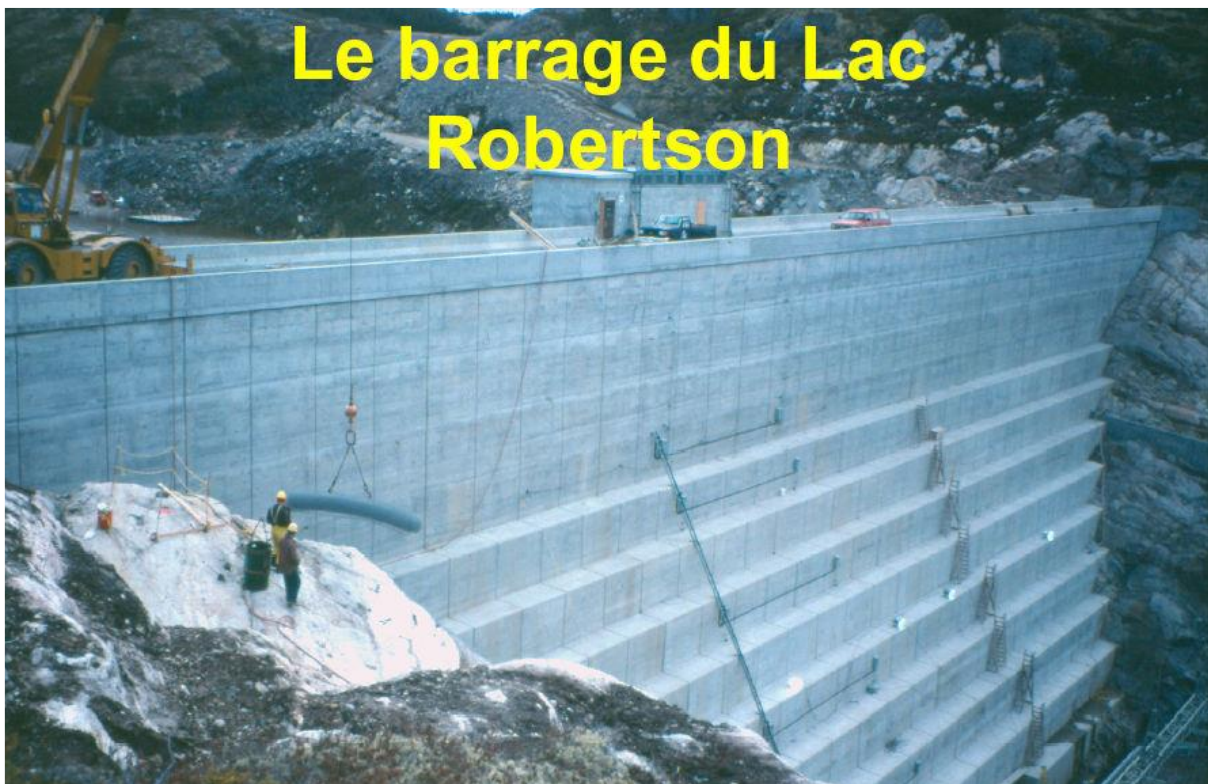


Figure I. 5 : Barrage du lac Robertson en BCR au Canada (ZDIRI M 2008).

I.5.2 Le BCR en technique routière

Le BCR peut également être utilisé comme matériaux routiers. Ce type d'application nécessite une plus grande quantité de ciment et un rapport E/C plus faible que pour un barrage, car les sollicitations tant mécaniques (passage des véhicules) que thermiques (cycles de gel-dégel, présences de sels fondants) y sont plus importantes (J. Marchand 1997). De plus, la

teneur en particules fines de diamètre inférieur à 80 μm doit être assez élevée afin de faciliter la finition de la surface du béton.

Du point de vue de durabilité, le revêtement en BCR a montré de bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telles que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes (ERES 1998).



Figure I. 6 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (ZDIRI M 2008).

I.6 COMPARAISON ENTRE LES BCR ET LES BÉTONS BITUMINEUX

Les chaussées sont divisées en deux grandes familles : les chaussées rigides (en béton) et les chaussées souples (en bitume). Ces deux grandes catégories ont leurs caractéristiques distinctes. La différence entre ces chaussées souple et rigide est la façon de répartir les charges sur les couches de formes. Les BCR ont une grande capacité à répartir les charges grâce à leur rigidité et leur raideur. Par contre, les chaussées en bitume n'ont pas cette capacité à cause de leurs matériaux souples.

Selon Saucier et.al (Saucier F. 1995), et d'après une étude du coût du cycle de vie faite en 1998 par ÈRES consultantes (ERES 1998), la durée utile prévue de la chaussée souple en béton bitumineux est de 17 ans, alors que celle de la chaussée rigide en BCR est de 34 ans.

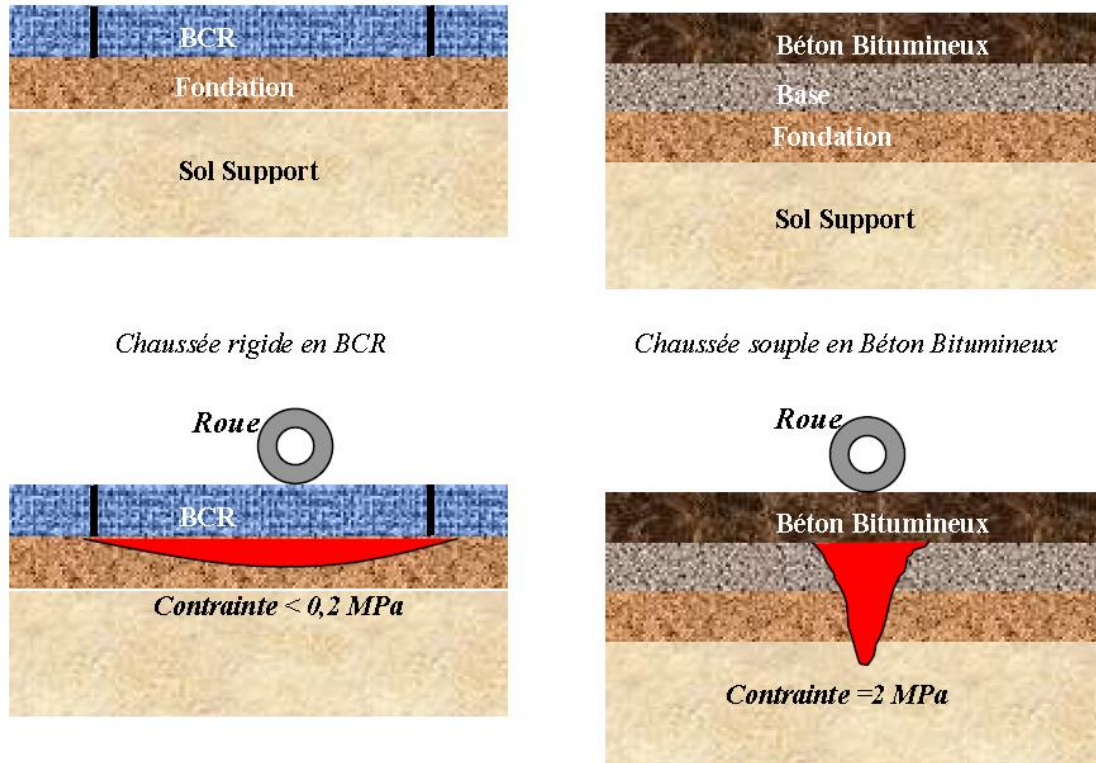


Figure I. 7 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB (Saucier F. 1995).

I.7 PERFORMANCE DU BÉTON COMPACTE AU ROULEAU

Comme tous les bétons, le BCR a des avantages et des inconvénients qui le rendent spécial, parmi ces avantages on peut citer :

- Bonne résistance à la compression et à la flexion.
- Très peu de matière cimentaire utilisée par rapport aux autres bétons ($< 175 \text{ kg/m}^3$) pour les barrages et ($< 300 \text{ kg/m}^3$) pour les routes).
- Faible quantité d'eau donc une résistance mécanique élevée et un retrait réduit (réduction du risque de fissures).
- Très bonne compacité ; ce qui en résulte une bonne imperméabilité et une bonne durabilité.
- Ce béton ne nécessite ni coffrage ni travaux de finition et permet d'accélérer la mise en œuvre et de réduire le coût et la main-d'œuvre.
- Bonne résistance au cycle de gel et de dégel.
- Bonne résistance au cisaillement : pour résoudre le problème d'orniérage.

- Les procédés de confection et de transport avec des usines en continu ou des convoyeurs et les techniques de mise en place permettent d'enregistrer des économies sur le coût global de la construction.
- Confort des ouvriers.
- Moins de dégagement thermique que l'asphalte.
- Une bonne adhérence : Les études ont démontré que le BCR permet en général une bonne adhérence qui réduit la distance d'arrêt pour être plus courte comparée à celle du béton bitumineux, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.
- Surface rigide qui permet la résistance à l'abrasion.

Parmi les inconvénients du BCR, on peut citer les insuffisances suivantes :

- La faible teneur en eau et en liant du BCR peut causer une ségrégation.
- Texture rugueuse qui peut être un inconvénient majeur pour le roulement des voitures.
- Augmentation du coût de transport des matières cimentaires pour les régions éloignées.



Figure I. 8 : Ségrégation d'une éprouvette 16X32 de BCR (ZDIRI M 2008).

I.8 FORMULATION DE BCR

La formulation de béton est une science qui définit les différents constituants d'un béton en se basant sur des propriétés souhaitées. La méthode de formulation d'un béton diffère quand ces propriétés se changent. Dans notre étude, on va confectionner un BCR à partir des matériaux locaux avec une formulation qui diffère de celle de béton ordinaire. Des méthodes de formulation de mélanges de BCR sont présentées dans le document American Concrete Institute (ACI) Committee 325.10R-95 (ACI-325.10R-95 1995). Elles ont été développées en utilisant

différentes approches et ont été employées avec succès. Elles sont, pour la plupart, basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques qui requièrent la réalisation d'un grand nombre de gâchées d'essais afin d'obtenir le mélange aux proportions optimales. Par ailleurs, ces dernières années, une méthode de formulation a été développée au Laboratoire Central des Ponts et chaussées en France (LCPC) pour être par la suite adaptée par le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval à la formulation de mélanges de BCR. Cette méthode repose sur une meilleure compréhension des paramètres affectant les propriétés à l'état frais et durci du BCR. Dans la grande majorité des cas, une seule gâchée d'essai est requise pour déterminer les caractéristiques du mélange optimum.

I.8.1 Méthodes empiriques

Au début de la conception du BCR, des méthodes de formulation empiriques ont été mises en place. Ces méthodes reposent sur la réalisation de plusieurs gâchées en laboratoires afin d'obtenir le mélange adéquat pour un tel projet. Ces techniques prennent beaucoup de temps et d'énergie, car dans certains cas plus de 25 mélanges sont nécessaires pour atteindre les caractéristiques voulues du BCR. En plus, des gâchés de réajustement sur chantier sont nécessaires pour obtenir un béton de bonne qualité (J. Marchand 1997).

Les deux méthodes les plus utilisées et les plus efficaces ont été décrites par le comité 325.10R-95 de l'American Concrete Institute (ACI) (ACI-325.10R-95 1995) :

- Formulation respectant certaines limites de maniabilité ;
- Formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

I.8.1.1 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité

De son nom, cette méthode de formulation a pour principe d'atteindre une limite de maniabilité en effectuant plusieurs mélanges de BCR. Elle est basée sur trois étapes où les proportions du BCR sont déterminées (J. Marchand 1997).

La première étape comporte la réalisation de plusieurs gâchées d'essais de mélanges de mortier avec différent rapport eau/ciment et différents rapport sable/ciment pour déterminer le volume de pâte minimum. La masse volumique est mesurée pour chaque mélange. La figure I.9 montre le rapport eau/ciment donné correspondant au rapport sable/ciment qui mène à une masse volumique optimale. La seconde étape consiste à choisir un rapport eau/liant adéquat aux exigences des propriétés mécaniques voulues. Finalement, une phase d'ajustement des

proportions de granulats fins et grossiers est effectuée pour obtenir la maniabilité désirée une fois les rapports eau/liant et sable/liant fixé (J. Marchand 1997).

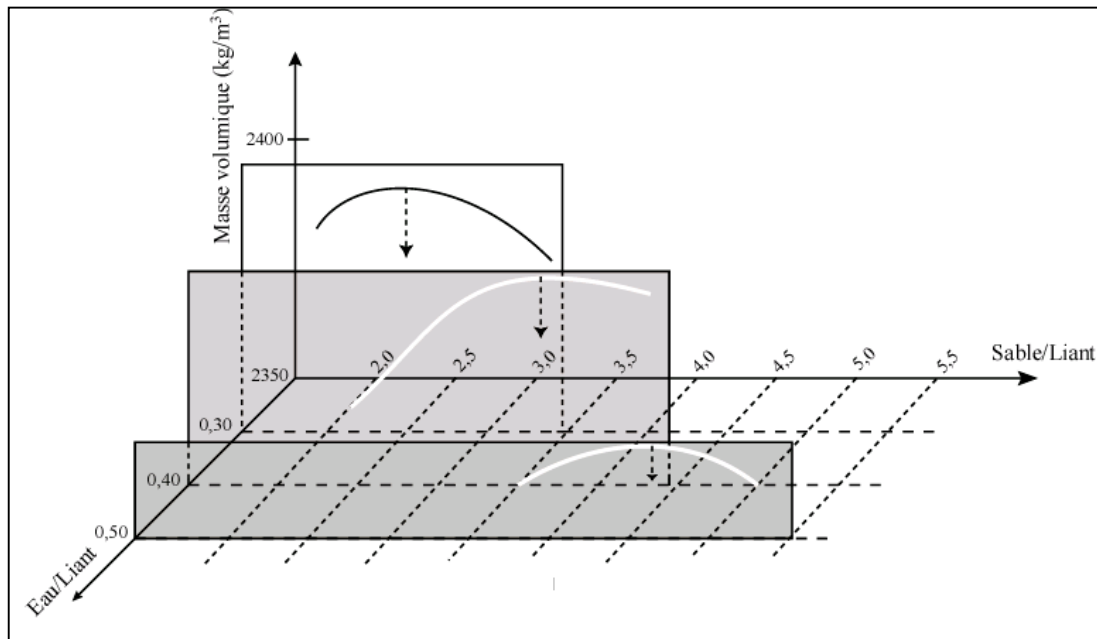


Figure I. 9 : Paramètres optimaux d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).

1.8.1.2 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique

Le Comité 325.10R-95 de l'American Concrete Institute (ACI) a aussi proposé cette méthode de formulation qui se base sur les principes de la géotechnique (compactage des sols). Cette méthode suit la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau du BCR. L'utilisation de cette méthode est plus adéquate dans les cas des granulats de petites dimensions et d'une grande quantité de liant (J. Marchand 1997).

La première étape consiste à déterminer la proportion de granulat fin par rapport au granulat grossier à l'aide d'un fuseau granulaire présenté dans la figure I.10. En deuxième lieu, plusieurs gâchés de béton avec différents teneurs en liant sont réalisés. La teneur en liant pour ces gâchés varie entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. L'étape suivante consiste à réaliser, pour chaque teneur en liant, des mélanges avec différentes teneurs en eau. Par la suite et à l'aide de la méthode citée par la norme ASTM C1557 – Method D. (ASTM-D1557-07 2007), on peut déterminer la teneur en eau optimale.

Les éprouvettes de BCR sont mises puis compactées dans des moules cylindriques avec une énergie de compactage spécifique. Après la fin du compactage, l'éprouvette est rasée, nettoyée puis mesurée et la masse volumique sèche est calculée. Ainsi, un graphe comportant la masse volumique sèche d'un côté et la teneur en eau de l'autre peut être dressé.

D'après la figure I.11, on peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau qui permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale. La masse volumique sèche varie considérablement dans l'intervalle de la teneur en eau optimale. Par contre, la masse volumique humide reste insensible dans cette partie de la courbe. La phase finale de cette méthode consiste à déterminer la quantité de liant nécessaire pour avoir un béton avec des performances données. Cela s'effectue en réalisant différents mélanges avec différente teneur en liant et avec une teneur en eau fixée (teneur en eau optimale). Le mélange disposant de la teneur en liant la plus faible et les performances mécaniques requises est choisi (J. Marchand 1997).

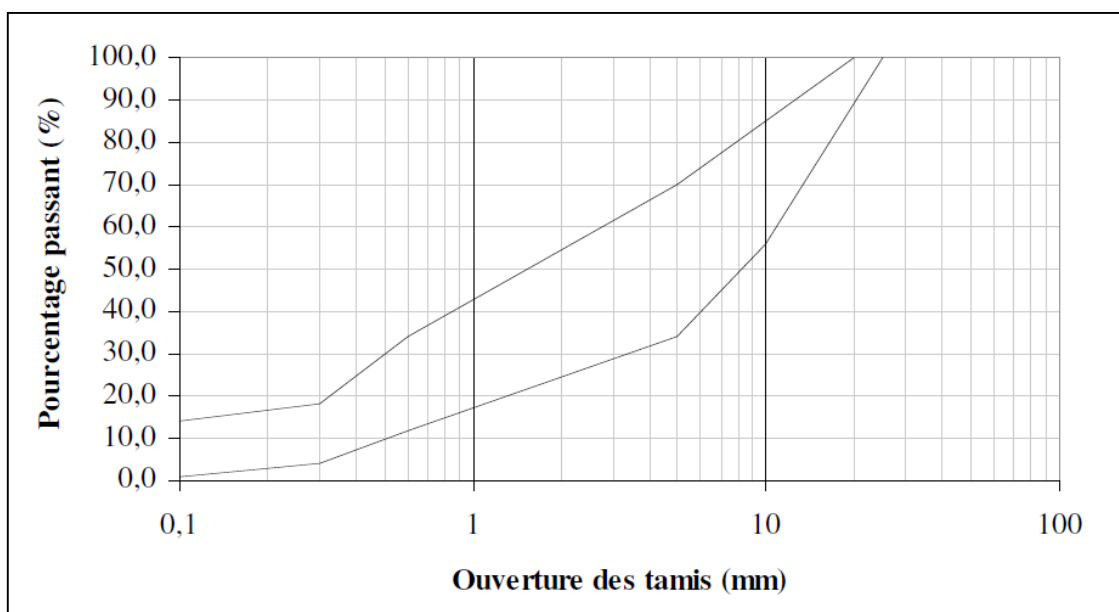


Figure I. 10 : Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).

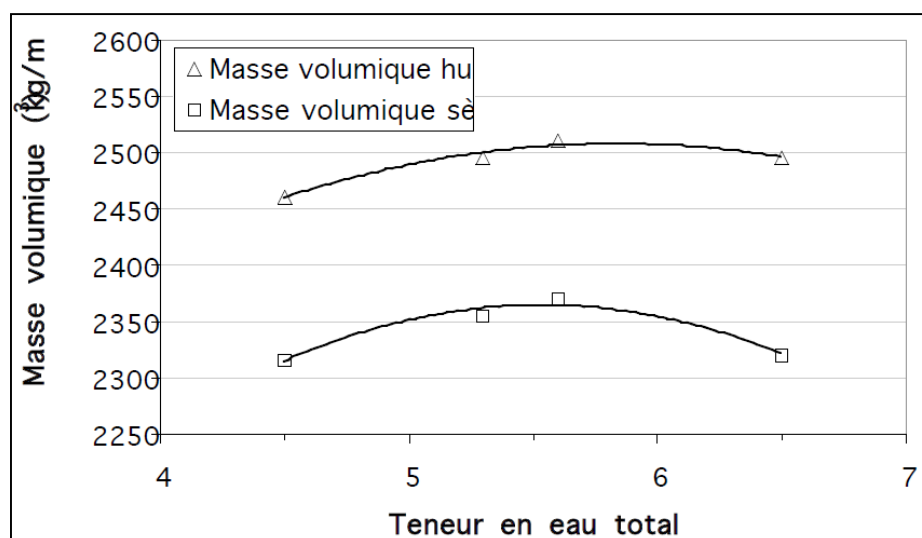


Figure I. 11 : Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).

I.8.2 Méthode semi-empirique

Cette méthode de formulation exige une approche expérimentale d'une part, et quelques formules empiriques d'autre part. La formulation par volume de pâte optimal est l'une des méthodes semi-empiriques utilisées pour la confection du BCR. Le principe de cette méthode consiste à calculer le volume de pâte par rapport à un volume de vides. Comme il a été mentionné en haut, cette méthode nécessite des mélanges d'essais en laboratoires (J. Marchand 1997).

La principale hypothèse sur laquelle se base cette méthode est que le BCR nécessiterait d'avoir un volume de pâte pour combler les espaces inter-granulaires restant après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale.

Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des performances mécaniques.

Suivant cette hypothèse, une faible dépense de pâte causera la présence de vides inter-granulaires qui vont par la suite réduire les performances mécaniques et augmenter sensiblement la perméabilité. D'autre part, une dépense excessive de pâte amplifiera la chaleur d'hydratation et le coût, sans accroître significativement les propriétés physiques ou la diminution de la perméabilité (GAGNÉ 2000).

La formulation du BCR par cette méthode exige de suivre trois étapes. Premièrement, les proportions des granulats sont déterminées d'une façon à obtenir un mélange granulaire le plus compacte possible. Après le compactage, le volume de vides des granulats est calculé en mètre cube. Deuxièmement, le dosage de la pâte doit être ajusté de manière à avoir une maniabilité donnée. Finalement, le rapport entre l'eau et le liant doit être fixé afin d'obtenir une pâte qui puisse satisfaire les exigences mécaniques. Cette méthode de formulation permet d'obtenir des mélanges de BCR sans une énorme débauche d'énergie par rapport aux méthodes empiriques. Cependant, l'utilisation de cette méthode est impossible dans le cas d'utilisation d'un entraîneur d'air. En effet, la présence de cet adjuvant rend très complexe la prédiction des vides dans le béton (GAGNÉ 2000).

I.8.3 Méthode théorique

La méthode théorique est très différente des précédentes méthodes de formulation. En effet, elle se distingue par l'absence de gâchés d'essais en laboratoires (expérimentale). Le principe de cette méthode est de minimiser la porosité inter-granulaire du béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) a développé une méthode théorique appelée le modèle d'empilement compressible pour la confection de différents mélanges tels que le béton ordinaire et le béton à haute performance. Par la suite, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval a développé cette méthode de façon à confectionner le BCR.

Plusieurs travaux ont été effectués à l'aide de cette méthode, les résultats obtenus montrent que cette technique donne amplement satisfaction (J. Marchand 1997).

I.9 PRODUCTION, MISE EN PLACE ET COMPACTAGE DU BCR

I.9.1 Production et mise en place

La production du béton compacté au rouleau se fait suivant plusieurs recommandations. En effet, ce type de béton est très sensible vu sa quantité faible en eau. Le malaxage, le transport, la mise en place et le compactage doivent être effectués au plus vite pour éviter l'évaporation d'eau. Gauthier et Marchand (Gauthier P 2004) ont recommandé une période de 60 minutes après le début du malaxage pour transporter, mettre en place et compacter le BCR. Cette période est en fonction de la température et l'hygrométrie ambiantes de la zone de malaxage et mise en place. Ce laps de temps peut alors s'écourter ou s'élargir suivant les conditions climatiques du chantier. Deux procédés de transport du BCR de la centrale au chantier existent :

- Transport à l'aide de camions à benne basculante.
- Transport à l'aide d'un camion-toupie.



Figure I. 12 : Dosage, malaxage et transport du BCR (ZDIRI M 2008).

Le malaxage d'un BCR n'est pas semblable à un béton conventionnel. En effet, la période de malaxage est plus longue que celle du béton ordinaire pour assurer une bonne homogénéité du mélange. Les facteurs influant sur le temps de malaxage sont généralement la nature des matériaux utilisés et leurs proportions, afin de déterminer le temps de malaxage, des essais préliminaires au laboratoire sont nécessaires pour connaître la durée adéquate pour obtenir le mélange le plus homogène possible avec la dépense en énergie la plus faible (coût). Lors du malaxage, la température du mélange ne doit pas dépasser les 30 °, en effet la réaction d'hydratation dégage de la chaleur et cela peut affecter négativement le béton (ZDIRI M 2008).

I.9.2 Compactage

Le compactage du BCR est une étape des plus importantes si ce n'est la plus importante de sa fabrication, en effet un bon compactage procure au BCR des caractéristiques élevées au niveau des performances mécaniques, physiques et de durabilité, par contre un compactage insuffisant cause des chutes de résistances considérables, une mauvaise homogénéité et une durabilité vis-à-vis aux milieux extérieurs très faibles.

Comme il a été précisé précédemment, le BCR est un béton très sensible à l'évaporation d'eau, sa faible teneur d'eau le rend extrêmement vulnérable au climat chaud. Des précautions doivent d'être prises pour éviter ce cas. Dans certains cas, la température est trop élevée, des initiatives doivent être prises comme couvrir la surface du BCR par un produit de cure qui

empêche l'évaporation d'eau. Dans d'autres cas, des averses peuvent perturber le déroulement du projet, dans ce cas le BCR doit être recouvert par des membranes en plastique étanche.

Selon Pittman (Pittman 1989), le compactage du BCR nécessite de suivre des étapes pour assurer une bonne compacité du béton. Le rouleau compacteur doit tout d'abord faire deux passages à partir d'un pied (30 cm) du bord libre, ensuite deux autres passages sont effectués le long du joint frais et pour finir deux passages sont exécutés au milieu de la voie. Ce plan de compactage doit être répété au nombre de six fois par le même type de compacteur. Finalement, quatre à huit passages de rouleaux pneumatiques sont nécessaires pour assurer une surface de chaussé bien resserré.

Selon USACE (USACE 2000), la qualité de compactage du BCR influe grandement sur plusieurs caractéristiques telles que la densité et la résistance à la compression. Un mélange bien formulé est dit bien compact quand le pourcentage des vides est inférieur à 1.5 %. USACE a aussi noté qu'un compactage insuffisant avec 5 % de vides conduit à une possible chute de résistance de 30 %, alors que 20 % de vides peuvent conduire à une chute de 80 % de résistance.

BERGA et al (Berga 2003) ont remarqué qu'une mauvaise application de l'énergie de compactage peut conduire à des désordres au sein de la partie basse des couches de BCR telles que la création de zones de faible densité. Des problèmes de stabilité peuvent résulter de ses zones, surtout en cas de développement des contraintes de traction sous l'effet d'un éventuel séisme (MEDDAH 2015). La qualité du compactage du mélange de BCR peut être affectée par plusieurs facteurs : la composition, la distribution granulométrique des granulats, la quantité de l'eau libre dans le mélange et le niveau d'énergie de compactage appliqué (Kokubu 2004) (Shihata 2000) (Meddah, Beddar et al. 2014).

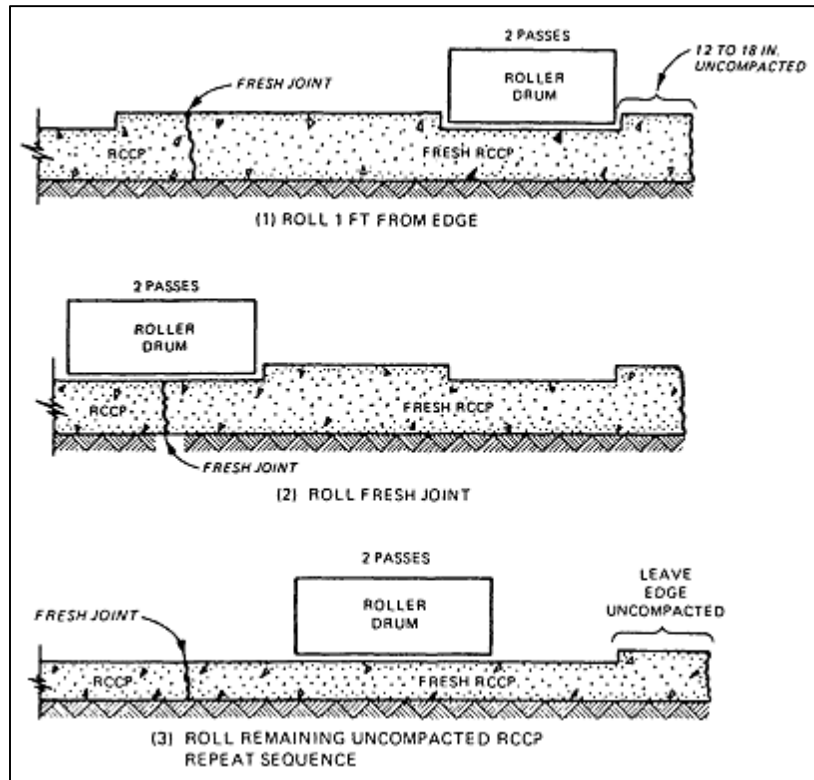


Figure I. 13 : Schéma du compactage typique du BCR (Pittman 1989).

I.9.3 Compactage des éprouvettes de BCR au laboratoire

Comme il a été précisé précédemment, le compactage du BCR est une étape très importante dans le processus d'obtention d'une bonne qualité de béton. En effet, le compactage doit se faire uniformément sur toute la surface du béton pour assurer que certaine partie soit suffisamment serré et éviter une ségrégation sur d'autres parties causées par une très grande vibration. Comme il a été précisé au paravent, le BCR est mis en place et compacté à l'aide de finisseurs et de rouleau compacteur utilisé habituellement dans les travaux publics, cependant au laboratoire cette méthode est impossible. D'après les travaux de ZDIRI (ZDIRI M 2008), ils existent trois méthodes de compactage du BCR. Ces méthodes sont résumées ci-dessous.

I.9.3.1 Le compactage manuel

Le compactage manuel s'effectue habituellement avec l'essai du Proctor normal et l'essai du Proctor modifier. La différence entre ces deux méthodes couramment utilisées est l'énergie de compactage attribué au sol ou au béton dans notre cas. L'essai Proctor modifier est habituellement choisis pour son énergie de compactage qui est similaire à celle d'un rouleau compacteur, le moule CBR (California Bearing Ratio Test) est aussi choisi parce qu'il convient parfaitement au BCR routier qui contient un diamètre maximal de 20 mm, en effet ce moule a un diamètre intérieur de 15.2 cm et une hauteur de 15,2 cm qui est adéquat pour éviter le

problème de ségrégation. Le but de cet essai est de compacter le béton dans un moule normalisé avec une dame de masse et de hauteur de chute définie. Le BCR est compacté avec une teneur en eau donnée puis l'essai est refait avec la même énergie de compactage jusqu'à l'obtention de l'optimum Proctor.



Figure I. 14 : Éprouvettes de BCR préparées selon le procédé Proctor modifié (ZDIRI M 2008).

1.9.3.2 Le compactage à l'aide de marteau vibrant

La deuxième technique consiste à utiliser un marteau vibrant électrique muni d'un arbre et d'une plaque circulaire pour compacter le BCR. Le béton frais est mis en place et compacté en quatre couches égales à l'aide du marteau, le serrage atteint son optimum lorsqu'on remarque la formation d'une couche de mortier autour de la plaque circulaire. La procédure est détaillée dans la norme ASTM C1435 (ASTM-C-1435-99 1999). Cette technique est utilisée tant en chantier qu'en laboratoire, le principal avantage de cette technique par rapport à la technique manuelle réside dans sa simplicité et sa rapidité d'exécution. On peut aussi noter que cette méthode n'altère pas les agrégats comparativement à la méthode manuelle qui certes offre un excellent compactage, mais qui peut altérer les agrégats à cause de la masse et de la hauteur de chute de la dame.



Figure I. 15 : Marteau vibrant (Harrington 2010).

1.9.3.3 Le vibro-compactage

Le compactage du BCR sur chantier est assuré par les rouleaux compacteurs qui lui procurent un compactage par vibration et par surcharge, la technique de vibro-compactage est une méthode qui se rapproche le plus des rouleaux compacteurs. On utilise dans cette méthode une table vibrante avec une fréquence normalisée et une surcharge sur le béton pour assurer un compactage par vibration et par surcharge. Cette technique consiste selon la norme ASTM C1176-2008 (ASTM-C1176/C1176M-08 2008) à placer un moule de 150X300 mm sur une table vibrante et d'utiliser une surcharge de 9 kg placés sur le béton et de fixer le tous. Cependant, la norme ne prend en compte que les éprouvettes cylindriques.

Plusieurs travaux de recherches expliquent pourtant la possibilité d'utiliser cette méthode sur n'importe quelles formes et tailles d'éprouvettes. Un ajustement de la surcharge appliquée sur le béton frais est calculé pour arriver à la pression de référence standardisée de l'ordre de 4.9 kPa.

Le projet BaCaRa (BaCaRa 1996) a mis un mode opératoire regroupant différentes surcharges qui peuvent être utilisées en fonction des éprouvettes employées. Le tableau I.4 présente les surcharges utilisées pour le compactage de différentes éprouvettes.

Tableau I. 4 : Surcharges utilisées pour le compactage d'après (BaCaRa 1996).

Dimensions du moule (cm)	16X32	25X50
Squelette (mm)	0/40	0/63
Surcharge (kg)	13	43
Nombres de couches	2	4
Piquage (coups/couche)	25	25

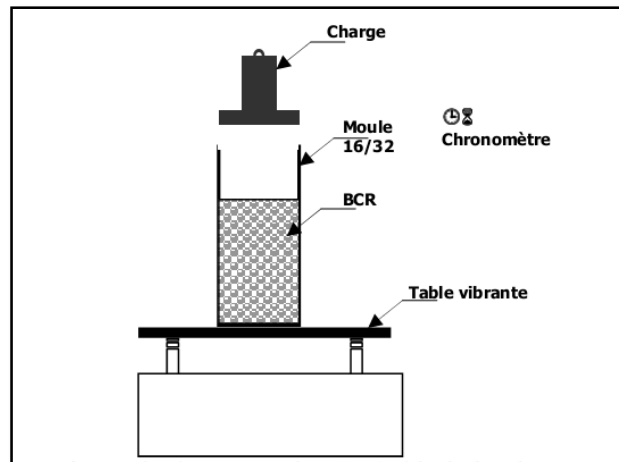


Figure I. 16 : Principes de la méthode vibro-compactage (ZDIRI M 2008).

I.10 PROPRIÉTÉS DU BCR

I.10.1 À l'état frais

La maniabilité du béton est un paramètre très important dans la fabrication de ce dernier. En effet, la valeur de la maniabilité peut éclairer sur la méthode de mise en place du béton. Le BCR, comme il a été mentionné plus haut, est un béton sec avec un affaissement quasi nul. Cette valeur paraît plus importante dans le cas d'un BCR, car elle a un effet direct sur la mise en place et le compactage du béton.

La maniabilité du BCR est mesurée à l'aide de l'essai VEBE (ASTM-C1170/C1170M-08 2008). Le principe de cet essai est de mesurer le temps nécessaire au béton pour se consolider sous l'effet d'une charge et d'une vibration spécifique. Le temps VEBE est calculé du début de la vibration jusqu'à l'apparition d'une couche de mortier sur le bord de la plaque contenant la surcharge.

La seconde caractéristique qu'on doit tenir en compte à l'état frais est la masse volumique. En effet, cette valeur est très significative sur la compacité et les performances mécaniques du béton. Plusieurs recherches (Meddah, Beddar et al. 2014) ont conclu que la densité a un rapport direct sur la résistance à la compression. La mesure de la masse volumique

humide s'effectue suivant trois procédés : Proctor (ASTM-D1557-07 2007), vibro-compactage (ASTM-C1176/C1176M-08 2008) et marteau vibrant (ASTM-C-1435-99 1999).

Selon Pittman(Pittman 1989), la masse volumique humide est affectée par plusieurs facteurs tels que le type de la paveuse employée, le nombre de passages effectué par le rouleau compacteur, le temps mis jusqu'au premier compactage et l'épaisseur de la couche.

La masse volumique humide peut aussi servir pour valider la compacité sur chantier. En effet, la mesurer de cette valeur par le nucléodensimètre sur chantier peut nous permettre de la comparer avec la valeur obtenue en laboratoire.

Karimpour (Karimpour 2010) a étudié l'effet de l'intervalle de temps entre le malaxage et le compactage de deux types de béton, un béton conventionnel et un BCR contenant du laitier à haut fourneau granulé et broyé. Les résultats montrent que plus le laps de temps augmente, plus une chute des performances mécaniques et de perméabilité est remarquée pour les deux bétons. Par contre, en présence du laitier à haut fourneau, l'effet du temps est moins remarqué sur les performances mécaniques et de perméabilité.

I.10.2 À l'état durci

À l'état durci, les performances mécaniques représentent le facteur le plus important pour estimer un béton. Un rapport servant à comparer un BCR avec un béton conventionnel a été entrepris par le service d'expertise en matériaux canadien (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005), les résultats obtenus ont montré que le BCR est plus performant que le béton conventionnel en termes de résistance mécanique et de perméabilité. Le tableau I.5 représente les différentes caractéristiques étudiées par les auteurs(CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).

Tableau I. 5 : Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).

Essais	BCR	Béton conventionnel
Résistance à la compression (MPa)	66	44.8
Résistance à la flexion (MPa)	8.3	5.5
Absorption (%)	2.4	5.1
Porosité (%)	6.0	11.2
Perméabilité à l'eau (m/s)		
Essai 1	5×10^{-13}	14×10^{-13}
Essai 2	0.1×10^{-13}	9×10^{-13}

Delatte (Norbert Delatte 2003) à étudier l'effet du compactage par giration sur les performances mécaniques du BCR. Différents compactages ont été effectués sur plusieurs éprouvettes de BCR avec la même composition, les résistances à la compression et à la flexion ont été évaluées en fonction du nombre de girations. Les résultats montrent clairement que plus le compactage est dense, plus la résistance à la compression et à la flexion augmente. Les figures I.17 et I.18 montrent respectivement la relation entre la résistance à la compression et à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).

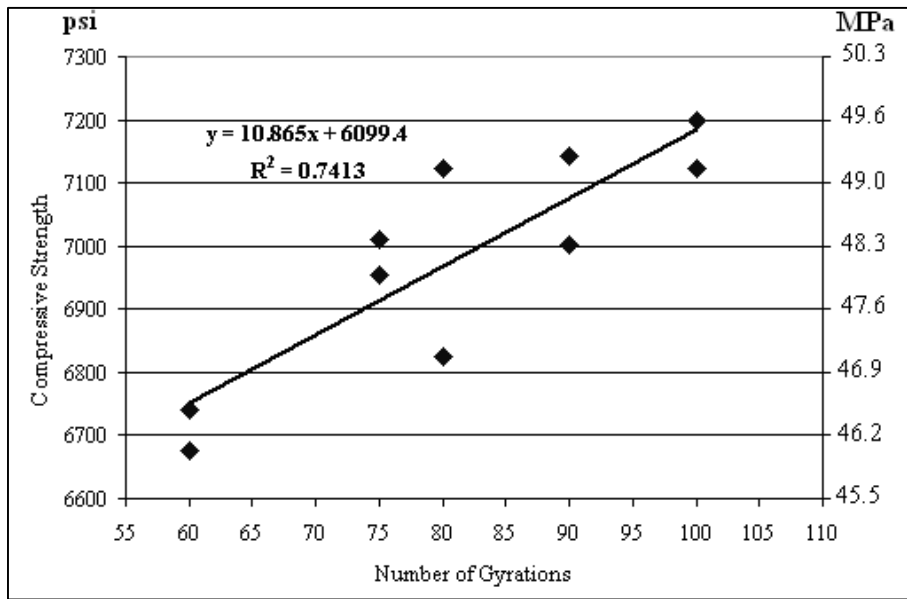


Figure I. 17 : Résistance à la compression par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).

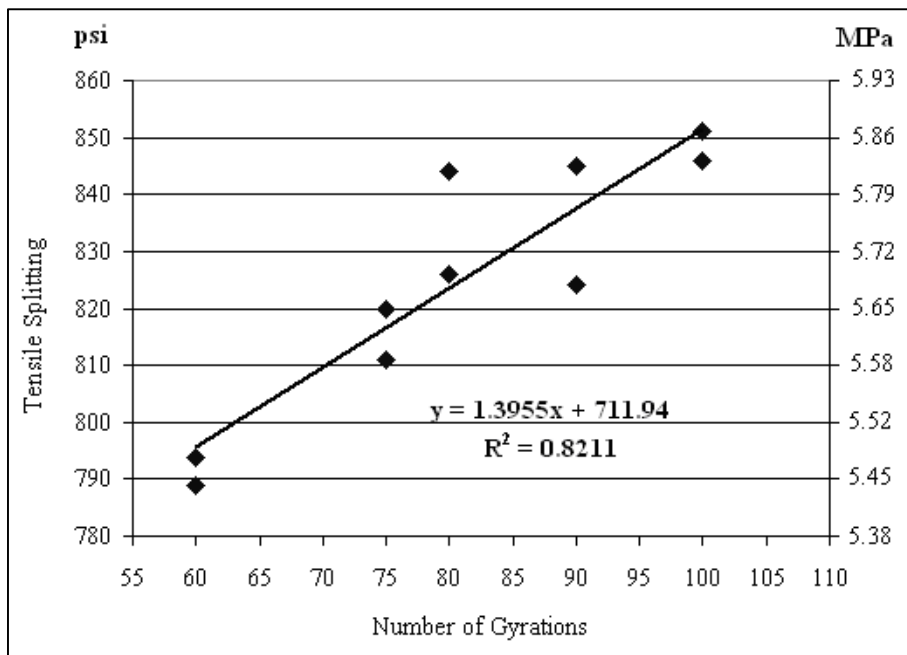


Figure I. 18 : Résistance à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).

Madhkhan et al (Madhkhan, Azizkhani et al. 2012) ont étudié l'effet des fibres et de la pouzzolane sur les performances mécaniques des BCR, leurs résultats démontrent clairement que les fibres ont contribué positivement sur l'augmentation de la résistance à la compression.

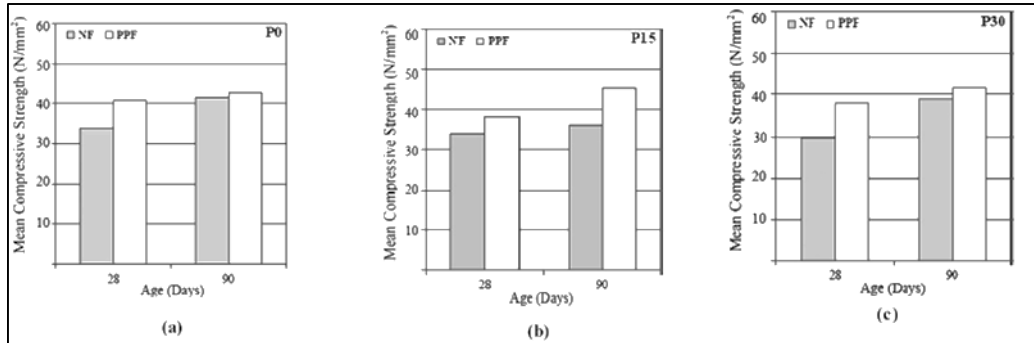


Figure I. 19 : L'effet des fibres polypropylène et de la pouzzolane sur un BCR : a) sans pouzzolane. b) 15 % de pouzzolane. c) 30 % de pouzzolane (Madhkhan, Azizkhani et al. 2012).

Les travaux de Nanni et Johari (Nanni A 1989) ont également porté sur l'étude des performances mécaniques des BCR pour pavage renforcé par un ou plusieurs types de fibres. Ils ont conclu que la résistance à la compression et le module d'élasticité avaient augmenté sensiblement par rapport au BCR sans fibres. D'autres auteurs comme Meddah et al (MEDDAH 2015, Meddah, Bensaci et al. 2017) ont étudié le comportement d'un BCR contenant des agrégats en caoutchouc comme remplacement des agrégats naturels. Ils ont conclu que la résistance à la compression du BCR a diminué avec l'ajout des agrégats en caoutchouc.

I.11 CONCLUSION

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement. La synthèse de cette partie a mis en évidence que le BCR est un matériau performant, économique et durable. Le compactage dans la confection des BCR présente un élément clé de son comportement. De ce fait, la performance et la durabilité du BCR sont fortement liées à la qualité du compactage réalisé.

Les méthodes de formulations des BCR se différencient de celles utilisées pour les bétons conventionnels. La littérature propose plusieurs procédures de formulation expérimentales des BCR (la méthode basée sur les paramètres de Géotechnique, la méthode basée sur limites de maniabilité, la méthode du volume optimal, etc.), ainsi que des formulations théoriques.

CHAPITRE II : Notions générales sur le béton de fibre

II.1 INTRODUCTION

Le domaine de la construction est un domaine d'innovation et de technologie qui converge vers la recherche pour avoir de nouveaux matériaux et de nouvelle technologie de construction. Les chercheurs sont tous le temps en concurrence pour trouver des matériaux performant, écologique et a un coût économique abordable pour des projets conséquents. L'utilisation des fibres remonte à plusieurs décennies, ce matériau procure des caractéristiques très intéressantes avec une incorporation et une mise en place très faciles. Ce chapitre illustre certaines fibres et leurs caractéristiques ainsi que leurs domaines d'utilisation qui existent dans le domaine de la construction.

II.2 BÉTON DE FIBRE

Le béton de fibre de son nom est un béton dans lequel on incorpore une armature par inclusion directe de fibres isolée au moment du gâchage ou de la projection. Les fibres peuvent être comparées à un granulats spécial de forme allongée et avec une bonne résistance à la traction, capable d'augmenter la résistance à la traction d'un matériau et de freiner la propagation des fissures.

Le comportement post-fissuration des matériaux est amélioré par les fibres qui réalisent des pontages au niveau des fissures, en effet, les fibres maintiennent une forte portance au cours des déformations (ABSI 1994). Les caractéristiques des fibres et la qualité de la matrice cimentaire influent grandement sur les propriétés du béton de fibre.

L'incorporation des fibres au sein du béton ne nécessite pas une matrice spécifique. En effet, la matrice d'un béton courant convient parfaitement à l'intégration des fibres. D'autre part, la forme et la nature de certaines fibres nécessitent un ajustement du rapport eau/liant.

Chaque type de fibres est utilisé pour le renforcement d'un béton pour des fins précis. En effet, suivant la forme ou la teneur de fibre incorporée, des propriétés spécifiques sont assimilées au béton de fibre par la suite.

II.3 DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES POUR LES BÉTONS

Le domaine de la construction et plus précisément les bétons, les recherches sont intensifiées pour améliorer ce matériau et lui conférer des caractéristiques avantageuses pour

son utilisation. L'ajout de fibres est une option pour conférer au béton des caractéristiques élevées à plusieurs niveaux (mécaniques, physiques et durabilité). Plusieurs types de fibres existent pour le renforcement des bétons, quelques types sont présentés ci-dessous.

II.3.1 Fibres polypropylènes

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés. Il est fabriqué depuis 1954 (MIMOUNE 1994) pour l'industrie du textile. Il a connu une extension croissante dans le domaine de la construction où il apporte les avantages suivants : une résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, une déformabilité élevée et une imputrescibilité. Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960, mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande-Bretagne. Elles sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs de 33 cm d'épaisseur, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel) et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux (DAVE 1979). Il a été constaté que le polypropylène est sensible aux ultra-violets. Son exposition prolongée au rayonnement solaire provoque une oxydation, mais, noyé dans la matrice, les fibres de polypropylène sont protégées de l'oxydation. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité est plus faible que la pâte durcie. Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit aux chocs mécaniques, soit dans les cas où l'acier risque une corrosion sévère. Les caractéristiques principales de ces fibres sont illustrées dans le tableau II.1.

Tableau II. 1 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres polypropylène(BEDDAR 2007).

Fibre polypropylène	Polypropylène
Diamètre moyen (en μm)	> 4
Longueur (mm)	6-12-18
Masse volumique (en g/cm^3)	0,9
Résistance à la traction (en N/mm^2)	500 - 750
Module d'élasticité (en GPa)	5 – 10
Allongement à la rupture (en %)	10 – 20

L'ajout des fibres de polypropylène varie de 0.2 à 0.7 en volume de béton, soit 0.08 à 0.27 % en poids du béton, c'est-à-dire 0.9 à 6.3 kg/m³. Les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé par ces fibres sont dues à la présence des fibres de polypropylène qui sont très élastiques et à celle de l'air occlus.

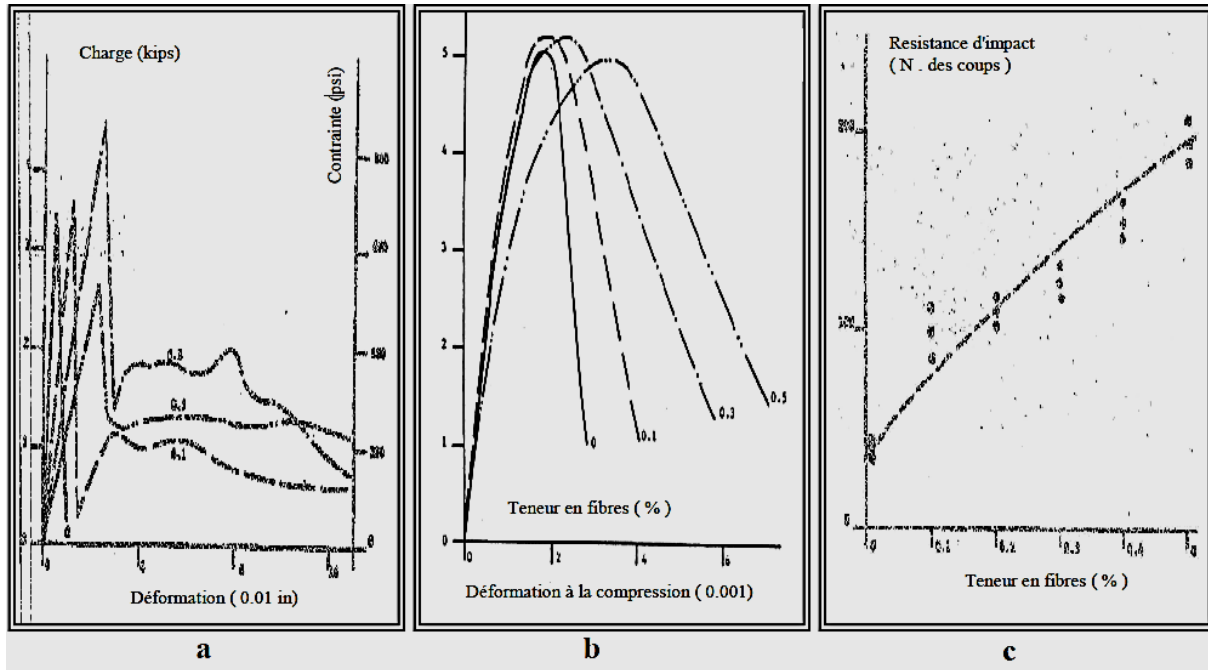


Figure II. 1 : Comportement de béton renforcé par des fibres de polypropylène (Pei, Wang et al. 2004) (a) Comportement à la flexion ; (b) Comportement à compression ; (c) Comportement au choc.

Les études menées avec ces types de fibres (KENCHEL 1985) ont montré que ce matériau présentait des propriétés mécaniques comparables à celles d'un béton renforcé par des fibres de verre. De plus, les fibres de polypropylène contribuent à limiter le retrait du béton quand il passe de l'état plastique à une masse hydratée (LANDAU 1986). D'autres chercheurs (KENCHEL 1985) (ZIAD 1993), se basant sur des travaux expérimentaux, sont arrivés à caractériser ce matériau et à établir des recommandations pour l'utilisation quotidienne dans le domaine de la construction. Les résultats des essais qui caractérisent la contrainte/déformation du béton renforcé par des fibres polypropylène sont représentés dans la figure II.1 (a, b, c).

II.3.2 Fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont, sans doute, les plus utilisées dans le domaine du génie civil. La résistance d'adhésion entre les fibres métalliques et la matrice cimentaire influe positivement sur les propriétés

mécaniques du béton renforcé par ce type de fibres. Les chercheurs ont essayé d'augmenter l'adhérence fibre-matrice par la modification de certaines caractéristiques telles que l'irrégularité de la surface, variation du diamètre, de la longueur, forme de la section et mécanisme de fonctionnement. La figure II.2 représente les différentes formes des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm. On note ici que les fibres de diamètre 0.5 mm ont été utilisées dans les lieux où il y a risque de corrosion, mais leur rigidité peut causer une rupture locale de la matrice due aux contraintes de traction latérale imposées sur le béton lorsque les fibres s'arrachent à un angle aléatoire.

La résistance de ces fibres varie généralement entre 700 et 2000 MPa, mais cette résistance est rarement utilisée dans le composite dû au phénomène de pull out des fibres. Les principales propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier sont regroupées dans le tableau II.2 :

Tableau II. 2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier (BEDDAR 2007).

Fibre	Acier
Diamètre moyen (en μm)	50 - 1000
Longueur (mm)	20 à 50
Masse volumique (en g/cm^3)	7,85
Résistance à la traction (en N/mm^2)	1000 - 2500
Module d'élasticité (en GPa)	150 - 200
Allongement à la rupture (en %)	3 - 4

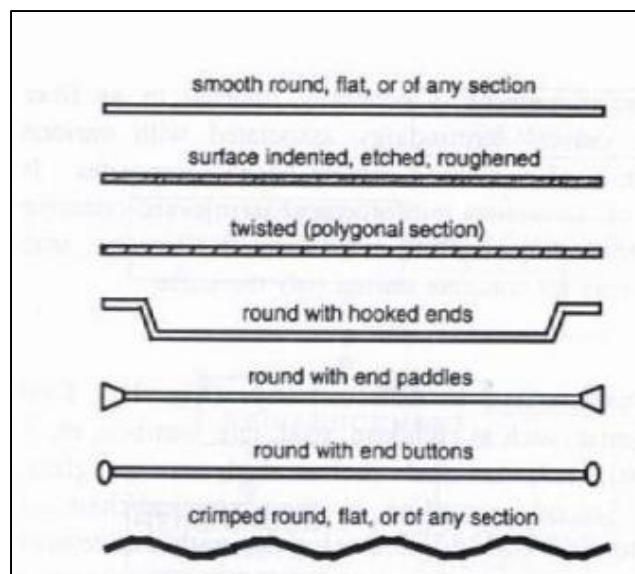


Figure II. 2 : Différentes formes des fibres d'acier (BEDDAR 2007).



Figure II. 3 : Photos de différentes fibres métalliques pour bétons(CT 2014).

II.3.3 Fibres de verre

Le verre est un matériau solide qui s'est formé par refroidissement d'un liquide visqueux. Il est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, par contre élaborée sous forme de fibre de faible diamètre, le verre perd cette fragilité.

Ces fibres sont alors fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm . Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : la fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et les fibres de verre au borosilicate. Les compositions moyennes de ces trois types de fibres sont données dans le tableau II.3.

Tableau II. 3 : Compositions des fibres de verre (BEDDAR 2007).

COMPOSITION	SiO ₂	AL ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
Verre en alumino Borosilicate (type E)	53 - 54	14 - 15.5	6.5 - 9	20 - 24	20 - 24	1
Verre cem-fil	70	0.2	8	00	00	12
Verre sodo calcique (Verre à vitre)	70 - 72	1	--	10	--	14

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues...)
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion
- Conductivité thermique relativement faible

L'utilisation de ces types de fibres comme renfort dans les matériaux à base de liant hydraulique semble être la plus développée. Ce développement a nécessité un travail important au niveau de la compatibilité de ces fibres avec les liants hydrauliques pour éviter la réaction du ciment sur le verre, imputable en grande partie aux alcalis contenus dans ce ciment. Ce problème de l'incompatibilité a été rapporté par BIJEN (BIJEN 1983), alors que d'autres travaux effectués ont démontré le contraire (FORDYCE 1983).

La fabrication des fibres de verre E revêtées par imprégnation d'une résine thermoplastique (FORDYCE, M. W.& WODEHOUSE, 1983) pour empêcher l'attaque chimique du verre est devenue actuellement une solution pour ce problème. Mais cette couche de résine protectrice influe évidemment sur les conditions d'adhérences. D'autres chercheurs, en Angleterre, sont arrivés à fabriquer un verre résistant aux alcalins (FORDYCE, M. W.& WODEHOUSE, 1983), riche en Zirconium et peut être utilisé parfaitement pour renforcer le béton. Ce procédé est actuellement développé et commercialisé par la société anglaise PILKINGTON qui commercialise également un ciment renforcé de fibre appelé GRC-Cemfil. D'autres fibres comme les fibres MINELON similaires aux fibres Cem-Fil ont été introduites sur le marché par les Japonais.

La figure II.4 représente une évolution comparative de la résistance à la flexion d'un ciment renforcé de fibres de verre (verre ordinaire et verre spécial à haute teneur en zirconium), alors que la figure II.5 présente le comportement en traction d'un mortier renforcé en fibre de verre et qui a été conservé pendant 5 jours dans différentes conditions. D'une façon générale,

les applications des bétons renforcés de fibres de verre correspondant à l'exploitation des diverses propriétés avantageuses de ces matériaux.

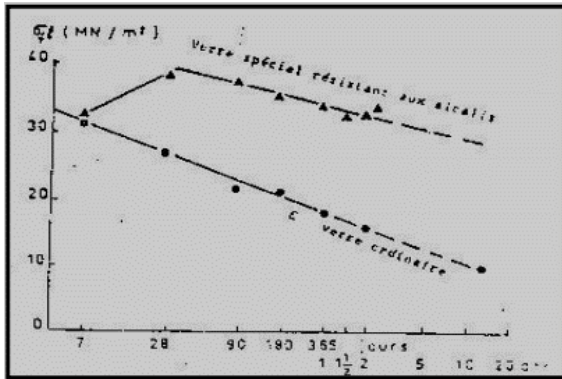


Figure II. 4: Évolution comparative à la flexion d'un ciment renforcé en fibres de verre (FORDYCE, M. W. & WODEHOUSE, 1983).

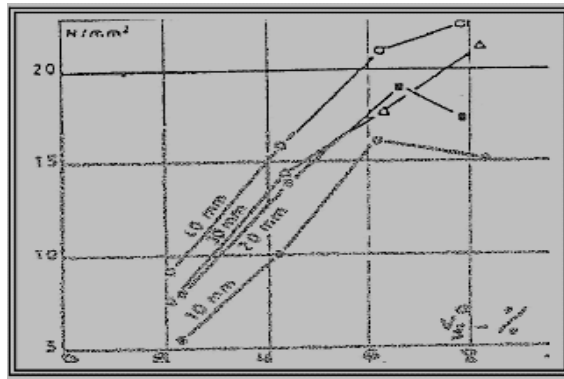


Figure II. 5: Comportement à la traction d'un mortier renforcé en fibre de verre (FORDYCE, M. W. & WODEHOUSE, 1983).

II.4 DOMAINE D'UTILISATION DES BÉTONS DE FIBRE

Le béton de fibre est un matériau très compétitif par sa facilité de fabrication et de mise en œuvre ainsi que ces nombreux avantages qui permettent d'améliorer plusieurs caractéristiques. L'incorporation de fibres dans le béton attribue à ce dernier plusieurs caractéristiques qui lui font défaut ou qui sont insuffisantes pour remplir son rôle. Le renforcement des bétons par des fibres peut conférer des caractéristiques très précieuses dans certains cas, le tableau II.4 montre quelques applications et l'intérêt apporté par l'ajout des fibres.

CHAPITRE II

Tableau II. 4. : Quelques domaines d'utilisations du béton de fibres (Beddar, 2007).

Application	Intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton.
Canalisation et coque minces faiblement sollicitées.	-Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge. -Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration.
Dallage, chaussé en béton, dallage manufacturé et tous les éléments structuraux soumis à la flexion.	-Diminution de 40 % de l'ouverture des fissures. -Augmentation de la rigidité après fissuration. -Augmentation de la résistance au cisaillement. -Augmentation de la résistance à l'usure.
Éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...etc.)	-Amélioration de la charge ultime, -Pas de rupture catastrophique.
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles exemple : pistes d'aéroports.	-L'énergie absorbée est plus importante, -La durée de choc est augmentée, -La loi de comportement du matériau est fortement modifiée.
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts.	-Amélioration de la résistance aux chocs, -Amélioration de la déformation.
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux hautes températures.	-Remplacement avec succès du revêtement réfractaire, -Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires.
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, les tunnels et les galeries souterraines.	-Évite le travail de fixation des grillages ordinairement employés, -Diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Fabrications des pieux, revêtement ignifuge isolant (constructions navales). Panneaux de revêtement de façades... etc.	-Augmentation de la résistance aux chocs, -Augmentation de la résistance à l'usure, -Augmentation de la durabilité des revêtements.

II.5 MÉCANISMES DE FONCTIONNEMENT DES FIBRES DANS LE BÉTON

Rossi a étudié le comportement des fissures des bétons renforcés par des fibres en fonction de la sollicitation appliquée (ROSSI 1998). Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macro-fissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent avoir un effet de couture sur les microfissures, et retarder la formation des macro-fissures conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure.

De plus, l'action des fibres est grandement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Les efforts de traction peuvent créer des fissures qui s'ouvrent suivant la direction de leurs lèvres, les fibres travaillent en traction pour limiter ces fissures. Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pour cette raison que l'effet d'un renfort de fibres est peu visible en compression pour les bétons courants. Plusieurs facteurs tels que ; la distribution et l'orientation des fibres, la zone d'adhérence fibre matrice et les propriétés de la matrice cimentaire influent sur les propriétés du béton renforcé par des fibres.

D'après Bentur et Mindess (BENTUR 1985), il existe deux stades de comportement lors du chargement d'un béton renforcé de fibres. Au départ, les fibres et la matrice possèdent les mêmes déformations. Le mécanisme de renforcement mécanique se produit par le transfert des efforts de la pâte vers les fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après ce cas de figure, si l'effort de cisaillement sollicité est plus grand que la résistance de la fibre – matrice au cisaillement, le mécanisme de résistance principal devient le frottement, au cours du déchaussement de la fibre.

Durant un essai sur du béton renforcé de fibres, lors du chargement jusqu'au pic, les fibres n'interviennent pas. Durant cette phase, les fibres se déforment comme le béton. À l'approche du pic de résistance, des microfissures se développent jusqu'à la localisation d'une macro-fissure. Les fibres entrent en jeu une fois que l'ouverture de cette macro-fissure est suffisante.

À ce moment, les fibres transmettent les efforts au béton dans lequel elles sont ancrées. Les efforts endossés par les fibres diminuent au fur et à mesure que les fibres se déchaussent ou se cassent en fonction de leurs natures et de la matrice qui les entourent.

Il est donc nécessaire d'avoir une ouverture de fissure suffisante afin que les fibres soient sollicitées. C'est pour cela que les fibres interviennent peu durant la phase de chargement et de

développement des microfissures. De plus, les fibres doivent avoir des dimensions compatibles avec le type de fissures, le niveau de résistance du béton et la taille des granulats.

Pour les microfissures, il est conseillé d'utiliser des fibres courtes et en grande quantité, et pour les macro-fissures, des fibres longues en moins grande quantité afin d'assurer une bonne ouvrabilité. Selon Johnston (JOHNSTON 1996), il est recommandé d'utiliser une longueur de fibres correspondante à 2 à 3 fois le diamètre des granulats pour assurer un bon ancrage des fibres dans la matrice cimentaire dans le cas où la rupture proviendrait au niveau de l'interface matrice-granulats.

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renforts, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises, comme le montre la courbe de comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0 % sur la figure II.6 (Taylor 1997). Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton.

La couture des fissures par les fibres confère au béton un comportement plus ductile et une continuité structurale en lui offrant une capacité portante post-fissuration.

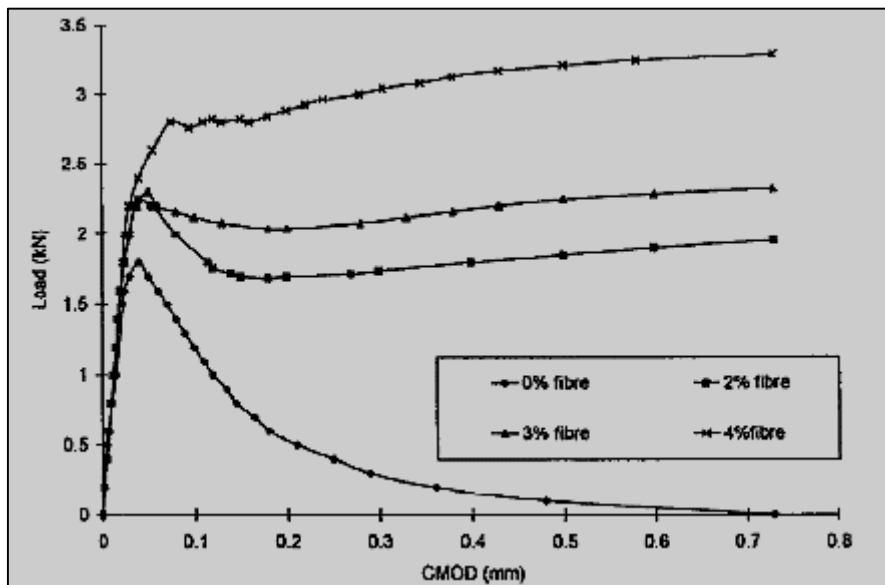


Figure II. 6 : Comportements en traction directe en fonction du pourcentage en fibres (Taylor 1997).

L'étude du comportement en traction par flexion permet de mieux mettre en évidence l'effet d'un renfort de fibres via le gradient de déformation. L'addition de fibres entraîne une augmentation de résistances et une augmentation de la ductilité (figure II.6). Le comportement post-fissuration est significativement amélioré. L'augmentation de la résistance résiduelle est due aux ponts et liaisons créés par les fibres, placées stratégiquement et qui cousent les fissures. Lorsque les résistances résiduelles sont supérieures à la résistance au pic, on dit que le béton a

un comportement ductile durcissant. Le processus de rupture se développe lors de la perte de ces liaisons et du déchaussement des fibres ou de la rupture de ces dernières. Ce phénomène est fonction de la forme, de la taille des fibres et de leur adhérence à la matrice cimentaire.

Le comportement en compression n'est que peu influencé par la présence des fibres. Les fissures créées ne permettent pas aux fibres d'être sollicitées suffisamment pour améliorer significativement le comportement du béton. Cependant, le type de fibre choisie, leur distribution, leur orientation et leur géométrie influent beaucoup sur le comportement des bétons renforcés de fibres.

II.6 RÔLE DES FIBRES

Au début, les chercheurs ont pensé à ajouter des fibres dans le béton afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la compression et à la traction. Cependant, l'avancement technologique a permis de trouver de nouvelles techniques permettant d'offrir des résistances très élevées à un coût abordable. Après plusieurs années d'étude, les chercheurs ont conclu que l'addition de fibre peut contribuer à deux principaux rôles :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.
- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui augmente la sécurité lors des états de chargement ultimes.

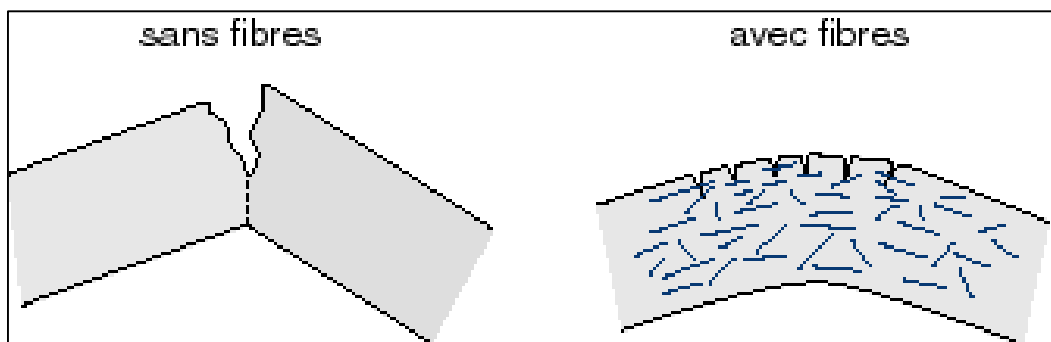


Figure II. 7: Propagation d'une fissure dans un matériau en état de service (Beddar, 2007).

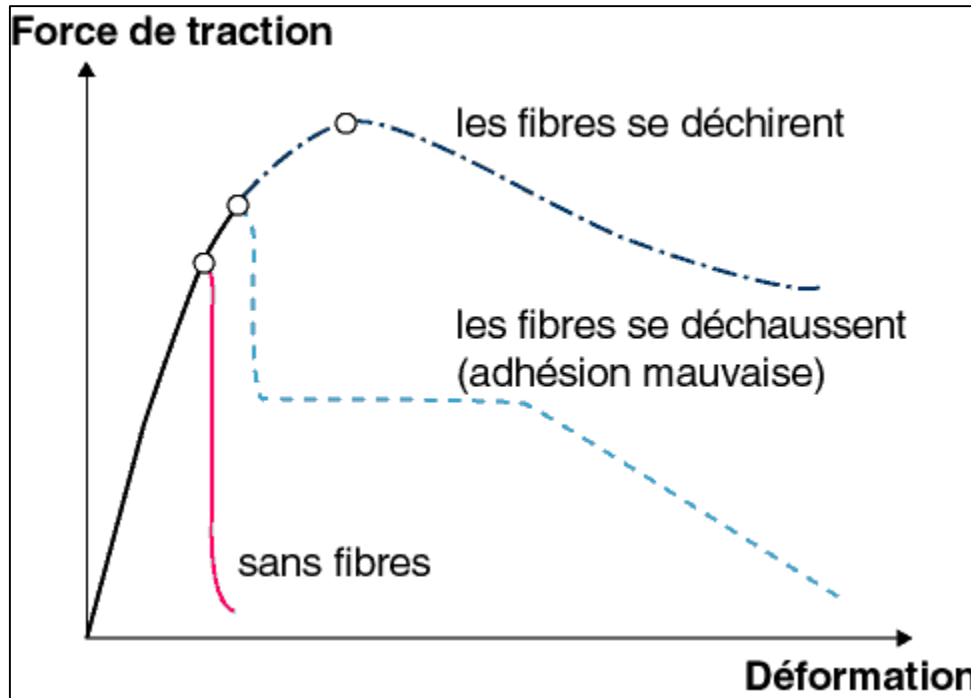


Figure II. 8: Comportement de charge-déformation de béton avec fibre et béton sans fibre (Beddar, 2007).

Le rôle principal des fibres est de mieux contrôler la fissuration du béton en état de service en limitant l'ouverture des fissures et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile. Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes telles que le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge ...etc. Lorsqu'un béton fissuré est soumis à une traction, les lignes de tension s'infléchissent (Figure II.8) et les tensions aux extrémités de la fissure augmentent. Cette inflexion est due au fait que la charge ne peut pas être transmise par la fissure. Pour un béton sans fibres sollicité en traction, sa faible résistance à la traction est vite atteinte, voire dépassée. Des fissures apparaissent rapidement et se répand librement ce qui conduit à une rupture fragile de la structure. Par contre, un béton renforcé par des fibres, sollicité en traction, les fibres pontant les fissures endossent une partie de l'effort appliqué ; cela empêche la rupture fragile du matériau, car la propagation des fissures nécessiterait une plus grande énergie. Selon (ROSSI 1998), la longueur maximale d'une microfissure est de l'ordre de la dimension du plus gros granulat et la longueur moyenne d'une fibre est plus grande que la dimension du granulat, donc chaque microfissure se répandant dans la matrice peut être cousu par une ou plusieurs fibres. Ainsi, les microfissures ne peuvent s'agrandir que par l'allongement élastique ou plastique des fibres, l'effritement de la matrice au voisinage de la fibre, le glissement des fibres ou la rupture des fibres. Ces fibres sollicitées à la traction et au cisaillement absorbent une partie de l'énergie nécessaire à la propagation des fissures et évitent une propagation incontrôlée de la fissuration

du béton. Il faudrait alors davantage d'énergie donc d'effort pour propager cette fissuration. L'efficacité des fibres est d'autant plus grande que la quantité de fibre est importante et leur longueur d'ancrage est grande.

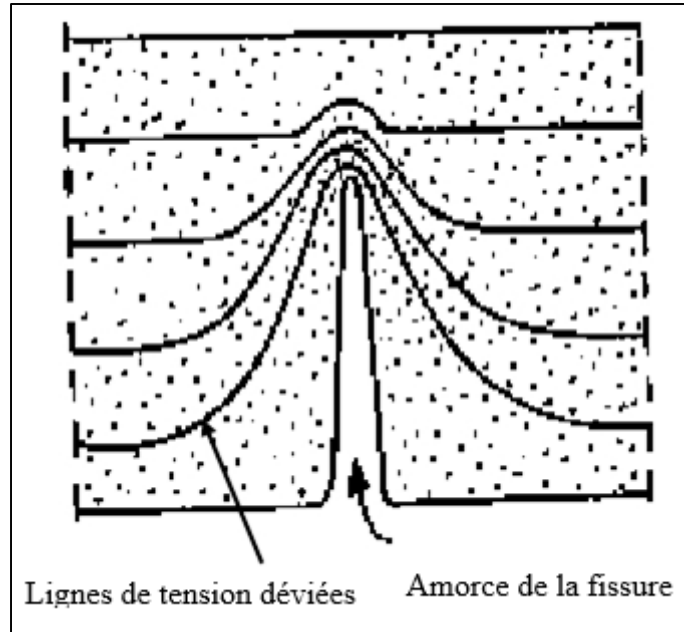


Figure II. 9: Béton sans fibre sollicité en traction (Djebali. S, 2013).

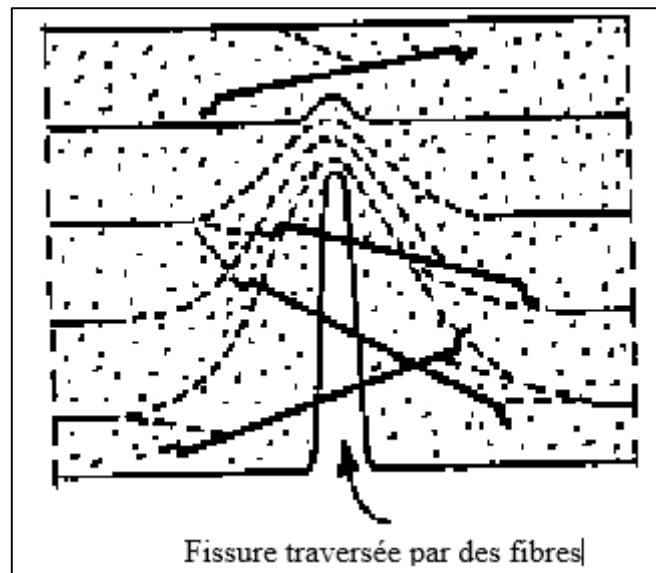


Figure II. 10: Béton avec fibre sollicité en traction (Djebali. S, 2013).

Une multitude de constructions a été réalisée avec ce matériau cimentaire modifié. La fabrication d'une large quantité de dallages industriels a été réalisée avec des dosages en fibres de 20 à 60 kg/m³. Contrairement au béton conventionnel, les fibres permettent le transfert de forces à travers de larges ouvertures de fissures et impliquent ainsi un comportement ductile. Du fait des capacités portantes non négligeables, l'idée d'un remplacement quasi complet de

l'armature traditionnelle a été lancée. Alors que des chercheurs (Simmonds 1992) (M.H.HarajliD.MaaloufH.Khatib 1995) ont principalement visé un béton conventionnel armé conjointement avec des fibres métalliques, d'autres (Gossia 2006) et (Jianzhuang 2007) ont présenté des recherches basées uniquement sur un renforcement à l'aide de fibres métalliques. Pour les essais avec un renforcement mixte (barres en acier et fibres), un accroissement de la résistance au poinçonnement a été noté. Néanmoins les essais avec des fibres comme seul renforcement, certains résultats ont été jugés positifs et une telle armature est devenue envisageable.

II.7 RECHERCHE SUR L'INFLUENCE DES FIBRES SUR LE BÉTON

II.7.1 À l'état frais

Il est confirmé que l'addition de fibres polypropylène à un béton pose très vite des problèmes d'élaboration, dus à la réduction de la maniabilité. D'après certains chercheurs (DEBICKI 1990),(SWAMY 1982), les propriétés rhéologiques de béton frais renforcé de fibres sont affectées par plusieurs facteurs ; la géométrie des fibres, le volume incorporé ainsi que la taille.

II.7.2 À l'état durci

II.7.2.1 La résistance à la compression

Des études antérieures (BALAGURU 1994) (Banthia and Gupta 2006) et (ROSSI 1996) ont montré que l'utilisation des fibres polypropylènes dans les bétons ordinaires ou les BCR n'apporte pas d'amélioration appréciable en compression.

D'autres recherches (JOHSTON 1974) ont cité que l'emploi de ces fibres peut augmenter la résistance à la compression de 15 à 20 %.

II.7.2.2 La résistance à la traction directe

Depuis toujours la résistance à la traction des bétons a été négligée par rapport à celle en compression, en revanche l'utilisation des fibres polypropylène dans les bétons ont donné une augmentation de résistance vis-à-vis la traction de 5 à 30 % (JOHSTON 1974), cette augmentation dépend de plusieurs paramètres, on cite :

- La longueur et le dosage des fibres polypropylènes.
- L'orientation des fibres par rapport aux efforts appliqués (MAJUMDAR 1979) (BALAGURU 1987).

II.7.2.3 La résistance a flexion

L'incorporation des fibres polypropylènes dans les bétons conventionnels ou BCR avec un dosage de 1,5 % à montrer un accroissement de la résistance à la traction par flexion d'environ de 15 % par rapport à un béton sans fibre (SWAMY 1975).

II.7.2.4 Le retrait

La présence des fibres permet de freiner les mouvements du squelette dus à l'évaporation de l'eau ou à l'évolution de la microporosité. Le retrait du béton de fibres est alors moins important que celui même du béton sans fibres. Les essais de retrait réalisés par SWAMY (SWAMY 1975) sur un béton renforcé par des fibres montrent que la présence de ces dernières entraîne la diminution du retrait. De plus, la réduction du retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres.

II.7.2.5 L'absorption d'eau

Les BCR sont des bétons très compacts grâce à leur mode de mise en œuvre (compactage). L'ajout des fibres de polypropylènes augmente le contrôle de la fissure. Cela nous donne une absorption d'eau de ces bétons réduite.

II.7.2.6 La perméabilité

Les bétons compactés au rouleau (BCR) ont un mode de compactage qui leur confère une compacité élevée par rapport au béton conventionnel, cela à une relation directe avec le coefficient de perméabilité. Desmettre et Charron (T. Plagué 2017) ont montré que l'ajout des fibres polypropylène diminue considérablement la perméabilité. Ils ont aussi montré l'effet de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques et la perméabilité des bétons. La figure II. 11 représente le coefficient de perméabilité par rapport au stress exercé des différents mélanges.

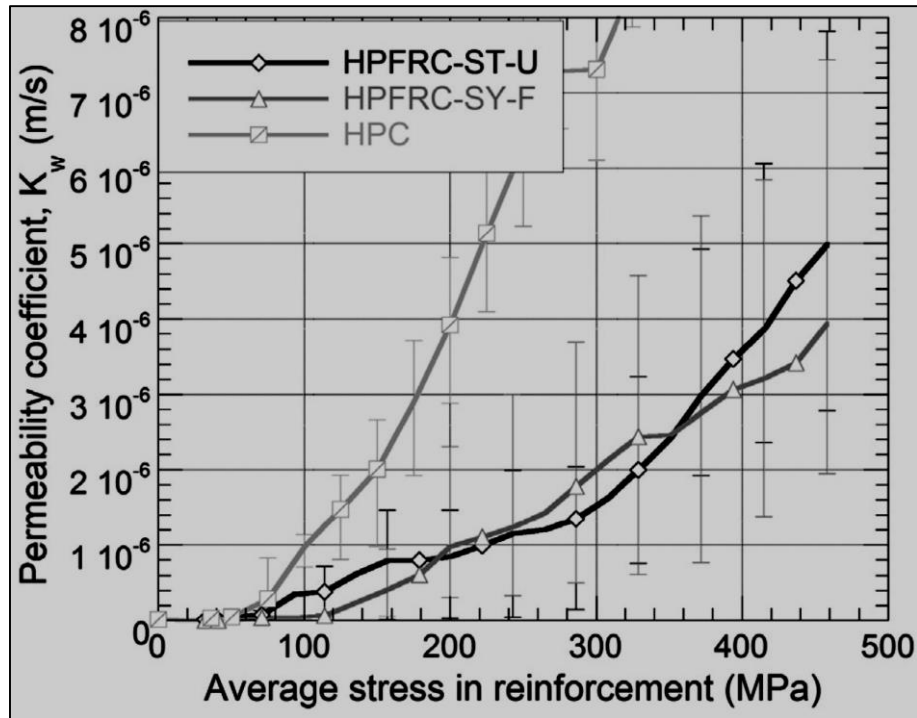


Figure II. 11: La perméabilité par rapport à la contrainte appliquée au béton (T. Plagué 2017).

II.8 RECHERCHE SUR LE BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU RENFORCÉ PAR DES FIBRES

L'utilisation des fibres dans le béton compacté au rouleau a connu quelques travaux de recherche au cours de ces dernières années. Des études sur le comportement de différents types de fibres sur les différentes propriétés du béton compacté au rouleau ont été effectuées.

Kyriacos Neocleous et al (Neocleous, Angelakopoulos et al. 2011) ont travaillé sur la possibilité de la construction d'un béton compacté au rouleau à faible consommation d'énergie par l'ajout de ciment à faible énergie, des agrégats recyclés et des fibres métalliques recyclées. D'après les résultats de Kyriacos Neocleous et al (Neocleous, Angelakopoulos et al. 2011), la résistance à la compression a légèrement diminué pour les BCR renforcés par des fibres métalliques recyclées par rapport au BCR sans fibre ; l'auteur a expliqué cette diminution par des vides d'air créés par l'ajout de fibres ; il a aussi remarqué que les agrégats recyclés ont aussi donné des résistances à la compression inférieure par rapport aux agrégats naturels.

À l'état frais, Kyriacos Neocleous et al (Neocleous, Angelakopoulos et al. 2011) à remarquer que les BCR renforcés par des fibres métalliques ont besoin de plus d'eau pour atteindre la densité sèche maximale, cette demande en eau a été expliquée par l'effet qu'on les fibres a retenu une partie de celle-ci.

Selon les travaux de Kyriacos Neocleous et al (Neocleous, Angelakopoulos et al. 2011), l'utilisation des fibres métalliques contribue à améliorer la résistance à la flexion des BCR, ils ont aussi remarqué que les fibres métalliques primaires ont atteint une résistance à la flexion légèrement plus grande que les fibres métalliques recyclées, cependant, et à des taux plus importants de fibres métalliques recyclées, la résistance à la flexion atteint le niveau des BCR renforcé par des fibres métalliques primaires.

II.9 CONCLUSION

Les bétons renforcés par des fibres sont utilisés depuis très longtemps, leurs performances et leurs avantages ne sont plus à prouver. Les fibres sont utilisées dans le renforcement de ce matériau suivant les performances recherchées, la destination du béton et le coût engendré par ces fibres. La littérature nous permet aujourd'hui de bien comprendre le comportement de ces fibres sous plusieurs sollicitations, de ce fait on peut choisir adéquatement le type, la longueur et la géométrie qui convient parfaitement au projet de construction.

Dans ce chapitre, on a illustré les bétons de fibres par leurs domaines d'utilisation, les types et le rôle de ces fibres. Quelques recherches ont été présentées telles que le comportement du béton de fibre à l'état frais et à l'état durci, les performances physiques, mécaniques et de durabilité ont aussi été rapportés.

CHAPITRE III : Identification des matériaux utilisés et protocoles d'essais

III.1 INTRODUCTION

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton compacté au rouleau joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du BCR sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un BCR, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes et les modes opératoires en vigueur.

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux, nous avons effectué des essais expérimentaux qui concernent leurs caractéristiques au laboratoire de génie civil à l'université EL BACHIR EL IBRAHIMI Bordj Bou Arreridj, et d'autres essais ont été réalisés dans le laboratoire de génie civil à l'université de M'SILA. Une partie de la caractérisation macrostructurale a été effectuée au sein de laboratoire du C-MADE à l'université Beira Interior au Portugal.

III.2 Matériaux utilisés

Le BCR est un béton certes différent des bétons conventionnels, mais ces constituants restent les mêmes, il est constitué de ciment, gravier, sable et eau. Le présent chapitre illustre les différentes caractéristiques des constituants.

III.2.1 Gravier

Le gravier est un élément très essentiel pour la confection des bétons, cependant pour les BCR, ce constituant doit être sans reproche afin d'obtenir un béton performant sur tous les niveaux. Pour la confection des BCR dans cette étude, trois fractions de gravier (3/8, 8/15 et 15/20) ont été utilisées. Le diamètre maximal a été fixé à 20 mm vu que le BCR confectionné est destiné à un corps de chaussée (MEDDAH 2015). Les graviers proviennent de la carrière

d'EL EUCH, leurs caractéristiques et leurs fuseaux granulaires sont présentés dans le tableau III.1 et la figure III.1.

Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers utilisés.

Propriétés	Symboles	3/8	8/15	15/20
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.48	1.47	1.45
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.60	2.66	2.53
Absorption d'eau	\dot{A} (%)	2.50	1.17	0.80
Compacité	C (%)	60.2	55.2	57.31
L'indice de vide	e	0.66	0.81	0.74
Porosité	P(%)	40	44.8	42.69
Los Angeles	LA	21	21	21

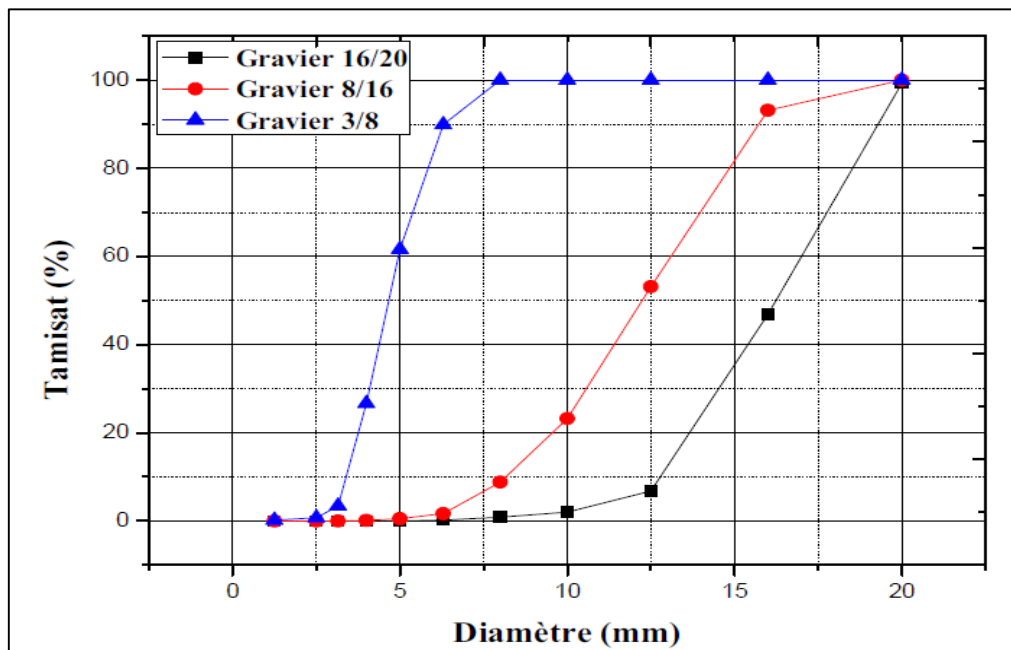


Figure III. 1 : Courbe granulométrique des graviers utilisés.

III.2.2 Sable

Le BCR est un béton très sensible au fuseau granulaire de ces agrégats. Il tient sa performance et sa durabilité de sa compacité qui est certes procurée par le compactage, mais aussi par la continuité de son squelette granulaire. L'utilisation de deux types de sables, comme dans le cas de cette étude, procure au squelette granulaire du béton une compacité maximale.

En effet, le premier sable (sable de dune) possède un faible module de finesse (2.06) par rapport au second sable (sable concassé=3.24), le cumulé des deux modules de finesse donne un mélange adéquat pour la confection du BCR. Le sable de dune provient de la région d'OUED SOUF alors que le sable concassé provient de la carrière d'EL EUCH. Les caractéristiques des deux sables sont présentées dans le tableau III.2 et la figure III.2 :

Tableau III. 2 : Caractéristiques physiques des deux sables utilisés.

Propriétés	Symboles	Sable de dune	Sable concassé
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.70	1.53
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.67	2.53
Équivalent de sable	$E_{S,P}$ moy (%)	80.36	94.08
Modules de finesse	MF	2.06	3.24
Compacité	C (%)	63.67	60.47
L'indice de vide	e	0.41	0.65
Porosité	P(%)	26.33	39.53

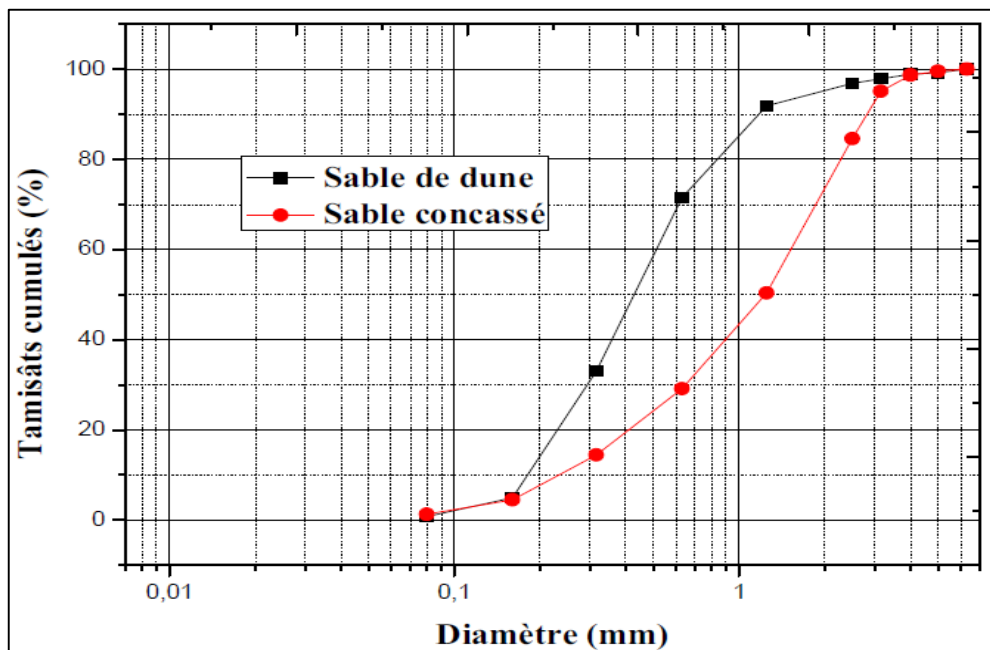


Figure III. 2 : Courbe granulométrique des sables utilisés.

III.2.3 Liant

Le type de ciment utilisé pour la préparation du BCR a un effet significatif sur la vitesse d'hydratation et le taux de développement de la résistance, et par conséquent affecte de manière

significative la résistance aux jeunes âges. Un mélange de BCR peut être confectionné par n'importe quel type de ciment. Toutefois, le choix du type de ciment dépend essentiellement des performances requises liées aux critères de résistance et de durabilité, autrement dit, il est en fonction de la destination et de l'importance du projet.

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment ordinaire de classe CEMII/B 42.5 N de densité 3,15 et provenant de la cimenterie de LAFARGE (Algérie). La composition chimique et minéralogique du ciment est présentée dans les tableaux III.3 et III.4 respectivement.

Tableau III. 3 : Analyse chimique élémentaire du ciment Portland composé (% massique).

Composition élémentaire	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
Teneur (%)	23,07	4,94	4,88	58,95	/	1,92	0,35	0,13	0,002

Tableau III. 4 : Compositions minéralogiques du ciment Portland composé (% massique).

Composition élémentaire	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	Gypse
Teneur (%)	54,08	22,33	4,44	15	0,73	5

III.2.4 Eau

L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente les laboratoires : de génie civil de l'université de M'SILA et l'université de Bordj Bou Arreridj.

III.2.5 Les fibres polypropylène

La gamme de fibre polypropylène propose différents types de fibres, leurs différences résident dans la forme (longueur et diamètre) et la structure (monofilament et fibrillé). Les fibres polypropylènes utilisées dans cette étude proviennent du groupe TEKNA-CHEM situé à SÉTIF en ALGÉRIE. Le nom commercial de ces fibres est FIBERTEK PP. L'aspect de ces fibres est montré dans la figure III.3.



Figure III. 3 : Fibres polypropylènes utilisés pour cette étude.

III.2.5.1 Caractéristiques des fibres

Les différentes caractéristiques des fibres de polypropylène (annexe 1 fig.1) sont montrées dans le tableau III.5 :

Tableau III. 5: Les différentes caractéristiques de fibres utilisées (annexe 1 fig.1).

Caractéristiques géométriques	
Longueur	12 mm
Diamètre	28 microns
Caractéristiques physiques	
Densité (20 °C)	0.8 à 1.00 g/cm ³
Caractéristiques mécaniques	
Module d'élasticité	3500 à 3900 MPa
Résistance à la traction	320 à 400 MPa
Caractéristiques thermiques	
Degré de fusion	160 à 170 C°

Selon la fiche technique fournie avec les fibres polypropylènes (voir annexe 1 fig.1), la quantité adéquate de fibre PP est comprise entre 900 et 1000 g par mètre cube. Cependant, plusieurs chercheurs (Behnood and Ghandehari 2009, Ramezani pour, Esmaili et al. 2013) ont trouvé que le dosage adéquat varie selon le type de béton et le type de sollicitation exercé. Dans le présent travail, le béton étudié n'a pas fait l'objet de l'incorporation de fibre en polypropylène afin d'améliorer ces caractéristiques. En se basant sur plusieurs recherches antérieures, on a choisi d'incorporer les fibres PP à six différents dosages (0, 0.5, 1, 1.5, 2 et 2.5 kg/m³).

III.3 FORMULATION DU BCR

Dans cette partie, la formulation a été étudiée afin de déterminer les quantités adéquates pour notre BCR, la méthode suivie est celle basée sur la mécanique des sols (relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau).

La première étape consiste à déterminer la proportion de granulats fin par rapport au granulats grossier à l'aide d'un fuseau granulaire proposé par le Comité 325.10R-95 de (ACI-325.10R-95 1995)). En deuxième lieu, plusieurs gâchés de béton avec différentes teneurs en liant sont réalisés. La teneur en liant pour ces gâchés varie entre 11 et 14 % de la masse totale des matériaux secs (Meddah, Beddar et al. 2014, MEDDAH 2015). L'étape suivante consiste à réaliser, pour chaque teneur en liant, des mélanges avec différentes teneurs en eau. Par la suite, et à l'aide de la méthode décrite dans la norme ASTM C1557 (ASTM-D1557-07 2007), on peut déterminer la teneur en eau optimale.

Les éprouvettes de BCR sont mises puis compactées dans des moules cylindriques avec une énergie de compactage spécifique. Après la fin du compactage, l'éprouvette est rasée, nettoyée puis mesurée et la masse volumique sèche est calculée. Ainsi, un graphique comportant la masse volumique sèche d'un côté et la teneur en eau de l'autre peut être dressé. D'après le graphique obtenu, on peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau, cette dernière permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale et par la suite la quantité d'eau adéquate de notre béton. Pour le ciment, le mélange contenant la teneur en ciment la plus faible et les caractéristiques mécaniques voulues est choisi (coût).

L'étude de la composition du BCR consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau. Cette optimisation a pour but de réaliser un BCR dont les qualités doivent être celles recherchées pour la construction routière.

III.3.1 Paramètre de formulation

Selon la méthode basée sur la géotechnique, on doit suivre les étapes suivantes :

III.3.1.1 Optimisation du squelette granulaire

Pour choisir les pourcentages des différentes fractions d'agrégats, il faut que la courbe combinée soit à l'intérieur du fuseau proposé par Marchand et al. (J. Marchand 1997), les résultats sont représentés dans le tableau III.6 et la figure III.4.

CHAPITRE III

Tableau III. 6: Tamisât des différentes fractions d'agrégats.

Diamètre	Gravier 15/20	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable	Concassé	Combinée
20	99,27	100	100	100	100	99,8905
16	46,86	93,18	100	100	100	90,665
12,5	6,76	53,15	100	100	100	76,644
10	2,01	23,21	100	100	100	69,9435
8	0,87	8,8	100	100	100	66,8905
6,3	0,16	1,66	89,91	100	100	63,338
5	0	0,52	61,6	99,25	99,55	57,1315
4	0	0,12	26,63	98,85	98,7	49,81
3,15	0	0	3,41	97,9	95,14	44,323
2,5	0	0	0,73	96,84	84,57	41,8835
1,25	0	0	0,15	91,87	50,4	35,151
0,63	0	0	0	71,5	29,15	25,8225
0,315	0	0	0	33,04	14,45	12,0795
0,16	0	0	0	4,95	4,49	2,1585
0,08	0	0	0	0,8	1,34	0,441
Fond	0	0	0	0,35	0,45	0,1725

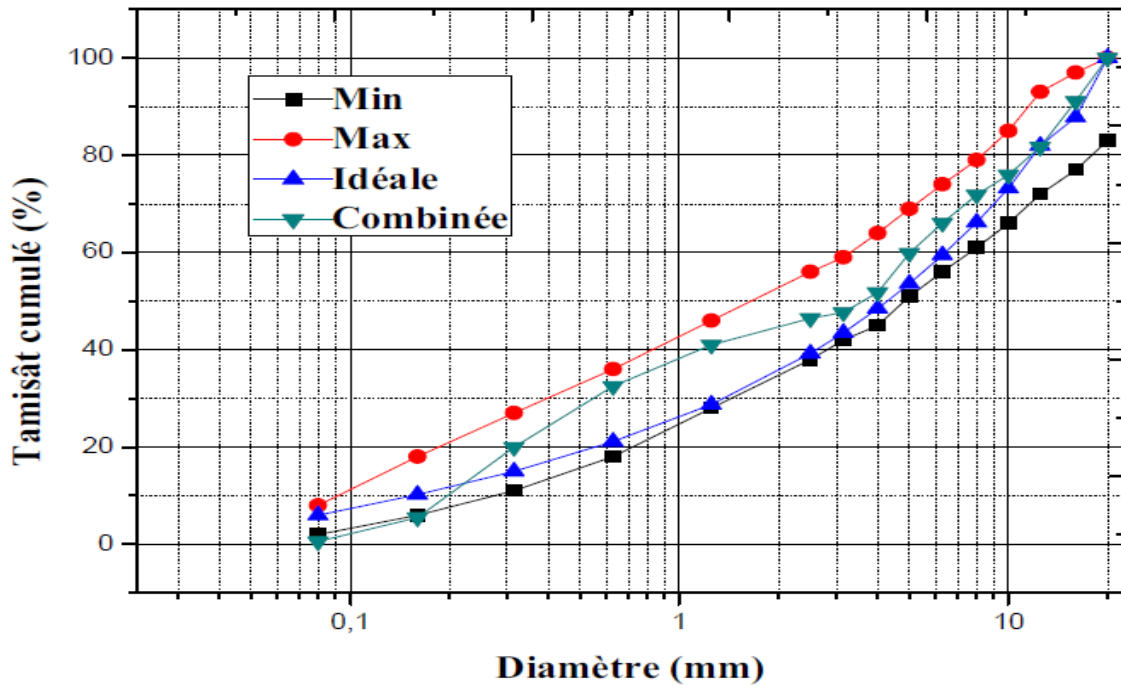


Figure III. 4 : Courbe combinée des agrégats utilisés par rapport au fuseau proposé par Piggot d'après (J. Marchand 1997).

III.3.1.2 Pourcentage des granulats

D'après le fuseau granulaire dans la figure III.4, les pourcentages des différentes fractions des granulats seront comme montrés dans le tableau III.7 :

Tableau III. 7: Pourcentage des granulats.

Granulat	Pourcentage
Sable de dune	30 %
Sable concassé	15 %
Gravier 3/8	20 %
Gravier 8/16	20 %
Gravier 16/20	15 %

III.3.1.3 Détermination de la teneur en eau du béton

Le dosage en eau a une importance cruciale dans le béton compacté au rouleau. La détermination de cette valeur est basée sur le principe de la géotechnique, en effet, la relation entre la densité sèche et la teneur en eau suivant le mode opératoire de l'essai Proctor modifier est nécessaire pour connaître la quantité d'eau adéquate pour avoir un béton qui présente des

propriétés voulues ; c'est-à-dire une densité maximale avec une quantité d'eau minimale et une maniabilité convenable pour un BCR routier.

Les éprouvettes ont été préparées suivant le mode opératoire de la norme (ASTM-D1557-07 2007). Pour chacun des dosages en ciment (11, 12, 13 et 14 %), la densité du BCR est mesurée à différentes teneurs en eau (4, 5, 6 et 7 %), puis la courbe de variation des densités en fonction de la teneur en eau est tracée (Figure III.5).

La densité sèche du BCR (γ_d/γ_ω) est calculée par la formule suivante :

$$(\gamma_d/\gamma_\omega) = \frac{(\gamma_h/\gamma_\omega)}{1 + \omega}$$

Avec :

(γ_h/γ_ω) : la densité humide ;

ω : la teneur en eau.

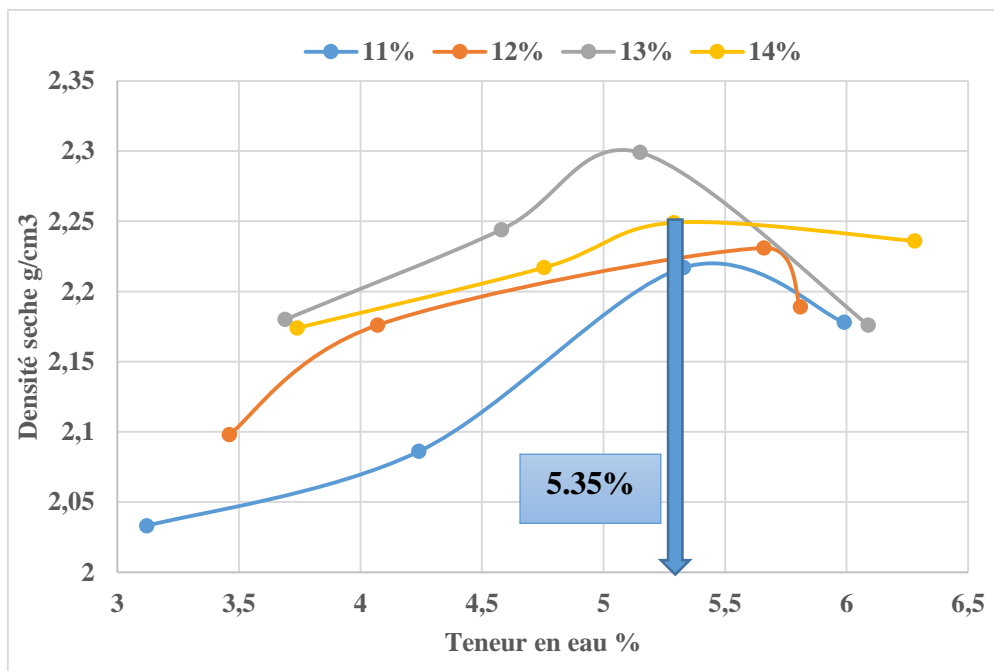


Figure III. 5 : Relation entre la densité et la teneur en eau.

III.3.1.4 Détermination de la teneur en ciment du mélange

Cette partie va nous permettre de choisir la quantité de ciment pour notre étude. Habituellement, cette étape prend en compte plusieurs facteurs pour confectionner un BCR sur chantier ; en effet, le côté économique doit être pris en considération sans influencer les propriétés mécaniques. Selon le rapport ACI325 (ACI Comimittee 2001), une résistance finale à la compression de 27 MPa est nécessaire pour une route en BCR. Cependant, cette valeur

n'est qu'à titre indicatif, car la détermination de l'épaisseur d'une route en BCR est basée sur les caractéristiques de chargement (intensité du trafic), les caractéristiques du sol (portance) et les propriétés mécaniques du BCR (Gauthier P. 2000). Dans notre étude, la résistance voulue doit être comprise entre 27 et 30 MPa à 7 jours. La figure III.6 montre qu'avec 14 % de ciment, la résistance obtenue est de l'ordre de 29 MPa à 7 jours.

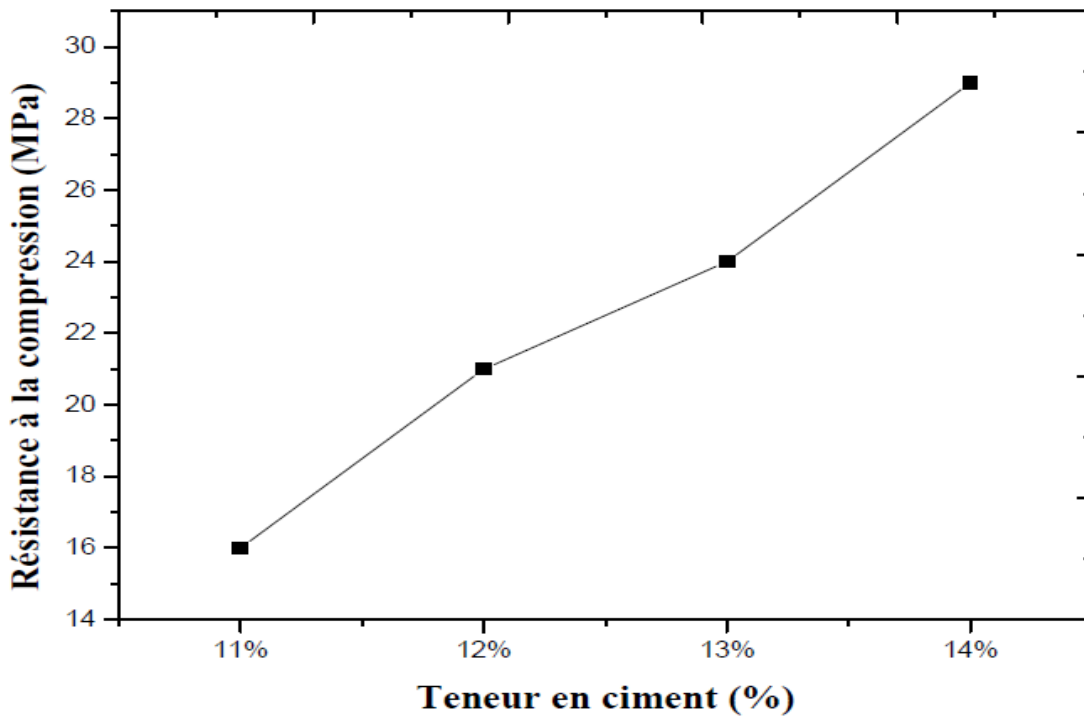


Figure III. 6 : Résistance en compression en fonction de la teneur en ciment à 7 jours d'âge.

Après avoir déterminé la quantité de ciment adéquate pour les mélanges, on peut dresser un tableau complet, résumant tous les composants du BCR. Le tableau III.8 représente la dépense en matériaux pour 1 mètre cube de béton. Le tableau III.9 résume les différentes proportions de mélange avec les quantités de fibres.

Tableau III. 8: Les différentes proportions de mélange.

Constituants (kg/m ³)						
Gravier			Sable		Ciment	Eau
3/8	8/16	16/20	Sable de dune	Sable concassé		
426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405

Tableau III. 9: Les différentes proportions de mélange avec les quantités de fibres.

Mélanges	Graviers (kg/m ³)			Sable (kg/m ³)		Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Fibre (kg/m ³)
	3/8	8/16	16/20	Dune	Concassé			
BCR0	426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405	0
BCR0.5	426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405	0.5
BCR1	426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405	1.0
BCR1.5	426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405	1.5
BCR2	426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405	2.0
BCR2.5	426.61	433.48	311.60	655.11	311.61	299.38	114.405	2.5

Après avoir obtenue les différentes proportions des matériaux pour nos bétons, 3 éprouvettes sont confection chaque mélange et chaque essai. Le mode de conservation et de durcissement des éprouvettes est effectué comme suit :

- Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance à 20°C ±2. Le degré d'humide du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton (Dreux G.).
- Après démoulage, elles sont conservées dans un bac d'eau (température 20°C et une humidité de 100%) jusqu'au moment de l'essai. Ces derniers sont réalisés à 7, 14 et 28 jours.

III.4 Techniques expérimentales

III.4.1 Malaxage

Le malaxage d'un béton doit suivre certaines étapes pour assurer une homogénéité du mélange. Le BCR n'échappe pas à cette règle, le tableau III.10 présente le travail réalisé par Debieb et al. (Debieb, Courard et al. 2009) et qui résume les étapes de malaxage du béton. Le temps de mise en place du béton dans les moules et le compactage nous importe aussi, car comme on l'a décrit dans le premier chapitre, le BCR est un béton sec qui contient une quantité d'eau très faible ; le temps entre la fin du malaxage et la mise en place et le compactage du BCR ne doit pas excéder 60 minutes pour éviter l'assèchement de ce dernier (Gauthier P 2004).

Tableau III. 10: Procédure de malaxage.

Temps	t0 - 4'	t0 - 2'	t0 - 1'	t0 + 1'	t0 + 2'
Addition	Granulats	-	Ciment	Eau	-
Tâche	Malaxage	Repos	Malaxage	Malaxage	Fin

III.4.2 Compactage

Le compactage du BCR est une étape très importante de sa confection, en effet c'est un facteur très influent sur les performances mécaniques et physiques du béton. Dans notre présent travail, le compactage des éprouvettes a été effectué suivant le procédé de la table vibrante et de la surcharge pondérale (vibro-compactage). À la fin du malaxage, le béton frais est mis dans les éprouvettes en plusieurs couches puis compacté à l'aide d'une surcharge et d'une table vibrante pendant un temps. Le compactage sera achevé lorsqu'on observe la formation d'une couche de mortier autour de la surcharge.

III.5 PROTOCOLE D'ESSAIS

III.5.1 L'essai de VEBE

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons de faible ouvrabilité. Dans cet essai, la consistance est définie par le temps que met la couche de ressuage du béton à apparaître sous l'effet d'une vibration et d'une surcharge donnée. Plus ce temps est court et plus le béton sera considéré comme maniable. Le déroulement de cet essai a été effectué suivant la norme américaine (ASTM-C1170/C1170M-08 2008). Suivant le temps (seconde) obtenu, nous pouvons classer la maniabilité de notre béton. Le tableau III.11 résume les différentes classes de VEBE :

Tableau III. 11: Classe de consistance VEBE.

Classe VEBE	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
Temps à l'essai VEBE (s)	≥ 31	30-21	21-11	10-5	≤ 4

III.5.2 Mesure du retrait

La mesure du retrait a été effectuée suivant la norme américaine ASTM C157 (ASTM-C157 1999). Le changement dimensionnel de l'éprouvette a été comparé par rapport au temps.

III.5.3 L'absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité d'une éprouvette de béton est directement liée à la taille et forme des pores, ainsi que la connectivité du milieu poreux. Selon Beck (K. Beck 2003),

lorsqu'un milieu poreux à l'état sec est mis en contact avec de l'eau, le fluide non mouillant (air) qui remplissait les pores est déplacé par le fluide mouillant (eau) sans qu'une pression extérieure soit appliquée.

Le principe de cet essai consiste à placer la surface inférieure d'une éprouvette de béton dans l'eau (figure III.7) et de mesurer la variation de masse de l'échantillon au cours de temps. Les éprouvettes sont préalablement séchées à 105 °C jusqu'à stabilisation de leur masse (variation de masse inférieure à 0.01 %).

Les faces latérales sont recouvertes de silicone étanche. La masse d'eau absorbée a été déterminée par pesées successives des éprouvettes à différentes échéances (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 et 1440 min). Avant chaque pesée, la face de l'éprouvette en contact avec l'eau est essuyée avec un chiffon humide afin d'éliminer les pellicules d'eaux superficielles retenues à la sous-face de l'éprouvette. L'essai a été effectué suivant la norme américaine ASTM C 1585-04 (ASTM-C1585-13 2013).

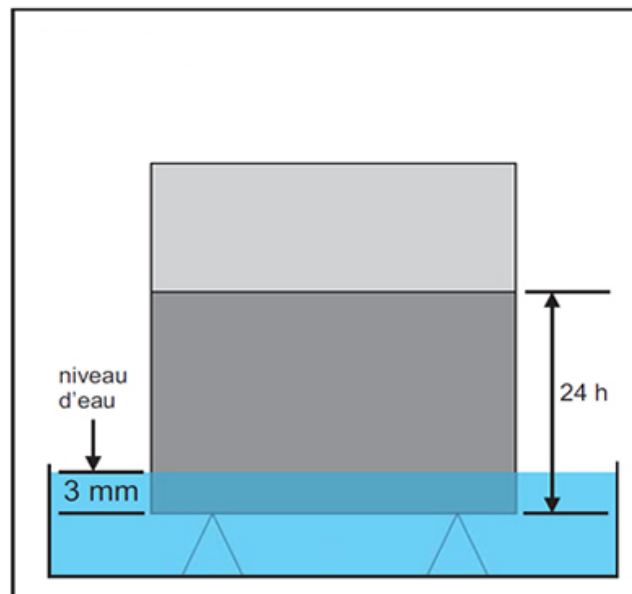


Figure III. 7 : Dispositif de mesure de l'absorption capillaire.

III.5.4 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau (indication du volume poreux) est mesurée en saturant sous vide trois échantillons. Après cela, la porosité est calculée par le rapport de la masse d'eau contenue dans la porosité sur le volume apparent de l'échantillon qui est déterminé par une pesée hydrostatique. Cet essai a été réalisé selon le mode opératoire recommandé par le groupe de travail (AFPC-AFREM. 1997).

Trois différentes pesées ont été réalisées pour calculer la porosité P (%). La masse de l'échantillon sec M_{sec} (après étuvage à 105 C° pendant 24 heures) est calculer puis l'échantillon est immergé dans l'eau pendant 72 heures, le poids obtenu représente M_{air} . Finalement, la pesée hydrostatique est effectuée (M_{eau}).

$$P = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad \%$$

Avec :

M_{air} : masse de l'échantillon immergé dans l'eau, pesé dans l'air ;

M_{sec} : masse de l'échantillon sec (étuve à 105 °C) ;

M_{eau} : masse de l'échantillon avec une pesée hydrostatique.



Figure III. 8 : Bain bouillon et pesée hydrostatique pour la porosité accessible à l'eau.

III.5.5 Ultrason

L'ultrason consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques au sein d'un béton sans provoquer un endommagement irréversible. Cette méthode, non destructive, représente une manière d'évaluer la qualité des bétons.



Figure III. 9 : Mesure de la vitesse du son.

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur, les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrage.

III.5.6 La résistance à la compression

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisée (10*20 cm) suivant la norme ASTM C39 (ASTM-C39/C39M-11a 2011).

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (Dreux G. 1998).

III.5.7 La résistance à la traction par flexion

Cet essai a été réalisé conformément à la norme Américaine ASTM C293 (ASTM-C293 2010). La réalisation de cet essai se fait sur une éprouvette prismatique de BCR mesurant 280 mm de longueur et 70 mm de hauteur et de largeur.

III.5.8 La résistance à la traction par fendage

L'essai de fendage (essai Brésilien) est un essai de traction indirect consistant à comprimer radialement l'éprouvette, créant alors des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. L'essai a été effectué suivant la norme Américaine ASTM C496 (ASTM-C496 2011).

III.5.9 Perméabilité à l'eau

La mesure de la perméabilité s'effectue par plusieurs procédés. En effet, la pénétration du béton s'effectue par différents fluides tels que : le gaz, l'eau et les chlorides. Dans notre étude, la perméabilité à l'eau a été étudiée.

La détermination de la perméabilité à l'eau d'un béton est un peu complexe. Plusieurs paramètres peuvent affecter cette mesure. Il existe deux méthodes pour mesurer la perméabilité à l'eau : la méthode directe et la méthode indirecte. Les méthodes directes ont généralement pour principe la loi de DARCY. Cette technique est assez simple. Malheureusement, elle prend énormément de temps (plusieurs semaines). Le principal problème engendré par cette longue période est le changement de la structure poreuse. En effet, ce long moment peut favoriser l'hydratation de la pâte de ciment et donc changer la porosité du béton. Ce facteur est à prendre au sérieux, car il peut fausser les mesures de la perméabilité à l'eau du béton. Pour réduire la longue durée de l'essai, plusieurs chercheurs (Loosveldt H 2002) ont proposé d'appliquer une pression supplémentaire (par exemple : 15 bars) plutôt que la pression gravitationnelle de l'eau. Cependant, appliquer une pression supplémentaire peut engendrer des problèmes tels que la présence de fuite d'eau à l'interface échantillon-cellule d'essai. Le second problème est la possible modification de la structure des pores sous une grande pression ou la création de microfissures ce qui peut effectivement donner une perméabilité des bétons erronée. La mesure indirecte se base d'une part sur l'application d'une technique d'impulsion transitoire de pression, et d'autre part sur l'application des techniques biomécanique (Quoc Tri Phung 2013). Darcy a démontré à la fin du dix-neuvième siècle que pour les conditions d'écoulement laminaire dans les matériaux granulaires saturés, le débit est proportionnel au gradient de pression ($q = ki$). Le coefficient de perméabilité de Darcy est la constante de proportionnalité entre le débit volumique (q) et le gradient de pression (i) et peut être interprété comme la vitesse moyenne d'écoulement à travers la section transversale de l'échantillon. A. Amriou et al (Abderrachid Amriou 2017) ont mesuré la perméabilité à l'eau grâce à une nouvelle méthode qui consiste à évaluer le flux de l'eau latéralement.

Dans notre étude, on a utilisé la technique directe avec une pression de 5 bars (Test-Method-71/10/625.1 1991) pour diminuer la longue période de mesure et éviter le possible changement de la structure poreuse du BCR.

Cet essai couvre la détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à l'eau de Darcy des éprouvettes en béton durci à l'aide d'un perméamètre à béton. Les échantillons sont prélevés sur des éprouvettes cylindriques moulées.

III.5.9.1 Procédure :

Tous d'abord, et évidemment, des échantillons de béton durci de diamètre approprié doivent être confectionnés. Les éprouvettes doivent être préparées conformément à la norme AS-1012.8 (AS-1012.8 2015). À l'aide d'une scie à diamant, couper une section de l'échantillon pour permettre un dégagement d'environ 2 mm à chaque extrémité du joint en caoutchouc puis couvrir les côtés de silicone. L'échantillon d'essai doit avoir une longueur minimale de 2.5 de la taille maximale de l'agrégat. La section coupée sera l'échantillon d'essai.

Conditionner l'échantillon d'essai conformément à AASHTO-T277 (AASHTO-T277-93 1994) à un état saturé de surface saturé, en supprimant la section se référant à l'utilisation de silicone.

Remplissez les vides de 2 mm ou plus de diamètre qui se produit sur les côtés de l'échantillon d'essai avec de la pâte à modeler ou un matériau similaire.

Mesurer et enregistrer la masse de l'échantillon à 0,1 g près et le diamètre (D) et la longueur (L) de l'échantillon à 1 mm près.

Sceller l'échantillon d'essai dans la cellule perméamètre.

Assurez-vous que le perméamètre est complètement rempli d'eau désaérée et ne contient pas de poches d'air ou de bulles.

Appliquer une pression d'eau constante sur le côté d'entrée de la cellule du perméamètre et surveiller en permanence la pression pendant toute la durée de l'essai.

Surveillez et enregistrez continuellement le débit volumétrique et le débit d'eau.

Surveiller et enregistrer continuellement la température ambiante, à 0,1 °C près. Assurez-vous que la température est maintenue dans une plage de 21 à 25 °C. Après que l'écoulement à l'état stable à travers l'échantillon a été atteint, surveiller et tracer le débit volumique (Q) en fonction du temps (t) jusqu'à ce que la pente des lignes d'entrée et de sortie puisse être atteinte.

Calculer la perméabilité en prenant la moyenne des courbes d'entrée et de sortie dans la plage de débit en régime permanent.

Retirer l'échantillon de l'appareil et mesuré et enregistrer la masse de l'échantillon à 0,1 g près.

III.5.9.2 Coefficient de perméabilité

Le coefficient de perméabilité de Darcy est calculé selon la formule suivante :

$$K = \frac{QL}{tAh}$$

Où : k = Coefficient de perméabilité Darcy (m/s).

Q = Volume d'eau en m^3 .

L = Longueur de l'échantillon d'essai en mètres, à 0,001 m près.

t = Temps écoulé en secondes.

h = Hauteur de pression appliquée en mètres d'eau.

A = Surface de l'échantillon d'essai en m^2 .



Figure III. 10 : Perméamétrie à l'eau pour béton.

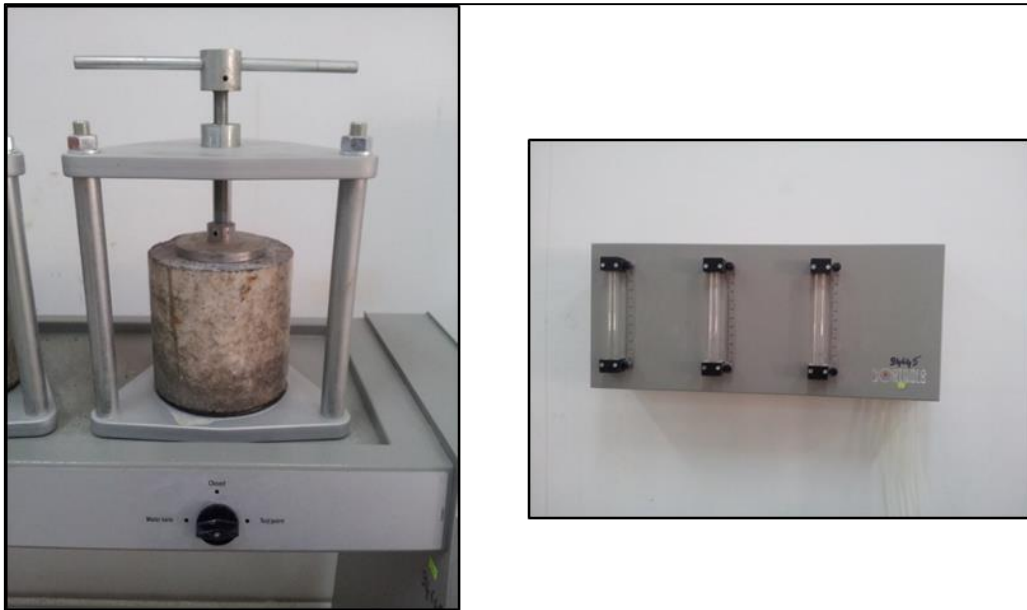


Figure III. 11 : Cellule d'éprouvette et cellules d'eau de perméamètre à l'eau pour béton.

III.5.10 Degré de pénétration

Le degré de pénétration est un autre essai propre au perméamètre à l'eau (British-Standard-European-Norme.BS-12390-8 2009). Il nous permet d'obtenir la capacité d'un matériau à être pénétré par un fluide. Cet essai peut beaucoup nous aider dans la connaissance de la durabilité des BCR. En effet, la valeur donnée représente la capacité du béton à résister au milieu externe, certes à des pressions beaucoup moins importantes, à l'intérieur de la matrice cimentaire ce qui génère beaucoup de problèmes de durabilité.

L'appareillage de cet essai est le même que celui du coefficient de perméabilité, la différence réside dans la méthodologie du test. L'échantillon est préparé, puis il est mis dans la cellule du perméamètre, ensuite une pression de 5 bars est appliquée sur le béton pendant 72 heures. Après la fin de ce temps, l'échantillon est retiré de la cellule, puis on a recours au fendage pour fendre l'éprouvette en deux. Après séparation de l'échantillon en deux, l'eau imprégnée à l'intérieur du béton peut clairement être aperçue, finalement, et à l'aide d'une règle, le degré de pénétration est calculé.

III.5.11 Porosité au mercure (MIP)

Le porosimètre au mercure est un instrument d'investigation des milieux poreux. La méthode consiste à faire pénétrer le mercure dans les pores du matériau sous pression croissante. Le mercure est, vis-à-vis de la quasi-totalité des solides, un fluide non mouillant, c'est-à-dire qu'il ne pénètre pas spontanément dans la porosité comme le ferait l'eau par

exemple. Ceci permet de contrôler l'injection au moyen de la pression. À mesure que la pression augmente, le mercure occupe des régions de plus en plus confinées de la porosité, remplissant des pores de plus en plus fins. Les appareils les plus puissants sur le marché permettent de faire varier la pression de 3 kPa à 400 MPa, donnant accès aux pores dont la taille va de 400 µm à 3 nanomètres environ.

Comme son nom MIP (mercure intrusion porosity) le révèle, le volume de métal liquide pénétrant dans un solide est mesuré en fonction de la pression appliquée. L'analyse subséquente est basée sur la loi capillaire régissant la pénétration du liquide dans les petits pores. En général, les données de pénétration sont analysées en utilisant l'équation de Washburn. Ceci rapporte le rayon r des pores (supposés cylindriques) à la pression imposée P comme suit ;

$$P = \frac{-2\gamma \cos\theta}{r}$$

Où : γ est l'énergie interfaciale (tension de surface) du mercure et θ est l'angle de contact du mercure avec le matériau.

Les valeurs communes de γ et θ (qui supposent des interfaces impliquant une phase gazeuse ou vapeur) sont de 485 mJ m⁻² et 140 °. Alors que les pores sont rarement cylindriques, et le rayon enregistré est celui de l'entrée des pores, l'équation de Washburn est généralement acceptée comme une méthode pratique d'analyse de ce qui est normalement des systèmes de pores très complexes.

Le MIP est réalisé comme suit. Après avoir préparé l'échantillon pour le pénétromètre, on place le pénétromètre sur le canal d'essai avec un appareil de micro porosimétrie. Ensuite, en utilisant un programme informatique, l'appareil peut être lancé pour exécuter une analyse à basse pression qui peut ensuite être suivie par un état d'analyse à haute pression. Au début de l'analyse à basse pression, l'air est retiré de l'intérieur de l'échantillon pour créer un vide. Le mercure tente ensuite de remplir l'intérieur de la chambre du pénétromètre et de l'échantillon par un mouvement à basse pression. Cet état s'appelle l'Intrusion, après intrusion du mercure à l'intérieur de la structure des pores et du pénétromètre, l'état suivant est appelé « Extrusion » alors que l'appareil essaie d'enlever tout le mercure à l'intérieur de la structure des pores. L'ordinateur va collecter toutes les données et les enregistrer pour calculer avec l'étape suivante comme analyse haute pression si nécessaire pour passer à un autre canal de test.

L'analyse haute pression utilise la même procédure que l'analyse basse pression, mais prend moins de temps à effectuer. Après avoir terminé les deux états, l'ordinateur calcule l'intrusion cumulée et le volume d'extrusion cumulé du mercure par rapport au diamètre de la

taille des pores et à la pression utilisée. Les données résultantes sont présentées graphiquement calculées par l'équation de Washburn.

L'analyse des échantillons de béton de cette étude a été effectuée dans le laboratoire du C-MADE à l'universitaire Beira interior au Portugal.



Figure III. 12 : Prosimètre au mercure.

III.5.12 Attaque d'acide

La résistance aux attaques acides consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance mécanique et chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (3.5 % et 5 % en volume).

Des essais d'immersion dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4) ont été effectués pour évaluer l'effet des fibres polypropylènes sur le béton compacté au rouleau.

Les échantillons testés sont de forme cubique ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$). Trois échantillons sont utilisés pour chaque mélange de BCR. Après maturation du béton (28 jours), l'essai a été réalisé à des périodes de 30 et 60 jours de conservation. Un pH-mètre numérique portable a été utilisé pour surveiller les niveaux du pH tous les deux jours. Le pH maximum du H_2SO_4 mesuré est de 2,0 ; dans le cas où le pH augmente au-dessus de cette valeur, on a l'obligation de changer la solution d'acide sulfurique afin de maintenir la même acidité au cours de l'essai.

À l'échéance souhaitée, les cubes ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ et une hygrométrie relative de 50 % pendant 30 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes. La masse sèche initiale (M_0) des cubes est déterminée avant leurs immersions dans des solutions acides (Bassuoni 2009).

Des solutions d'acides sulfuriques avec des concentrations initiales de 3.5 % et 5 % en volume ont été préparées dans des récipients résistants à l'acide. Ces solutions ont été placées à une température ambiante de 23 °C. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouverts d'environ 2 cm de solution acide (ASTM-C-267 1998).



Figure III. 13 : Les échantillons de BCR immergés dans des solutions de H₂SO₄ (3.5 % et 5 %).

La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides est évaluée physiquement (Variation de masse), mécaniquement (variation de résistance à la compression), chimiquement (analyse DRX) et aussi visuellement.

III.5.12.1 Variation de masse

Selon la procédure de la norme (ASTM-C-267 1998) : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 min pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque immersion. Selon les recommandations des normes en vigueur, la solution acide est renouvelée après chaque nouvelle pesée (ASTM-C-267 1998).

La variation de masse de chaque éprouvette est calculée à partir de la relation suivante :

$$VM = \frac{M_0 - M_i}{M_i} \times 100$$

Avec VM : variation de la masse (%) ;

M₀ : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque d'acide (gramme) ;

M_i : la masse de l'éprouvette après les attaques d'acide (gramme).

III.5.13 ANALYSE MINÉRALOGIQUE PAR DIFFRACTION AUX RAYONS X

Afin d'étudier les modifications minéralogiques des échantillons des granulats des bétons avant et après l'exposition à haute température, le diffractomètre des rayons X (DRX) permet de quantifier les phases cristallisées présentes dans ces échantillons. La méthode permet ainsi clairement de distinguer les phases amorphes des produits cristallisés.

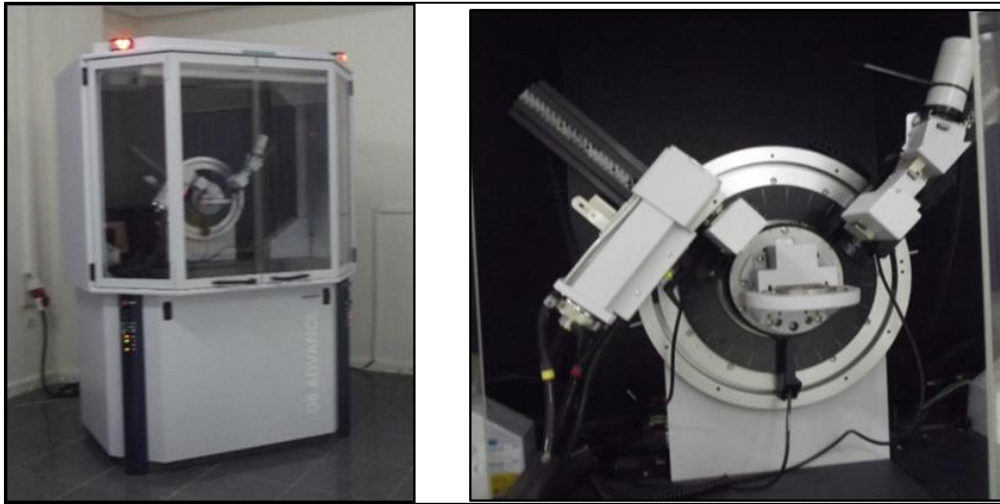


Figure III. 14: Vue d'ensemble du diffractomètre.

Pour réaliser les essais de diffraction aux rayons X, nous avons pris des échantillons des granulats avant et après l'exposition à haute température. Pour obtenir des grains de diamètre inférieur à $50\ \mu\text{m}$, les échantillons ont été bien broyés et tamisés. L'échantillon retenu pour l'analyse est placé dans des portes-échantillons en plastique et mis en place dans l'appareil.

Les diagrammes présentés dans notre étude ont été collectés sur un intervalle angulaire compris entre 10° et 90° , avec un temps d'acquisition de 1.5 s par point. Le pas d'acquisition choisi est de $0,05^\circ$.

III.6 CONCLUSION

Ce troisième chapitre est consacré premièrement à une caractérisation physique, mécanique et chimique des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges de BCR. En second lieu, et à l'aide de la caractérisation des matériaux, la formulation des BCR a été entreprise suivant les principes de la géotechnique. Finalement, on a étalé les différents protocoles d'essais (physiques, mécaniques et durabilités) des BCR renforcés par des fibres polypropylènes.

CHAPITRE IV : Comportement physique et mécanique d'un BCR renforcé par des fibres

IV.1 INTRODUCTION

Ce présent chapitre illustre la caractérisation physico-mécanique des bétons compactés au rouleau renforcés par des fibres polypropylènes. Des essais à l'état frais tels que la masse volumique et la maniabilité ont été réalisés. Alors qu'à l'état durci, la masse volumique, l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau, le retrait, les performances mécaniques et la vitesse ultrasonique ont été effectués. Les différents mélanges ont été observés par un microscope optique afin d'évaluer la qualité de la zone de transition (interface pate fibre).

IV.2 À L'ÉTAT FRAIS

IV.2.1 La masse volumique

La masse volumique est un paramètre très important dans un matériau composite comme le béton de fibre. En effet, elle nous donne une indication sur l'effet de l'élément ajouté (fibre) sur le matériau principal (béton). Les résultats de cet essai représentent la relation entre la quantité de fibres ajoutées et la masse volumique des bétons testés.

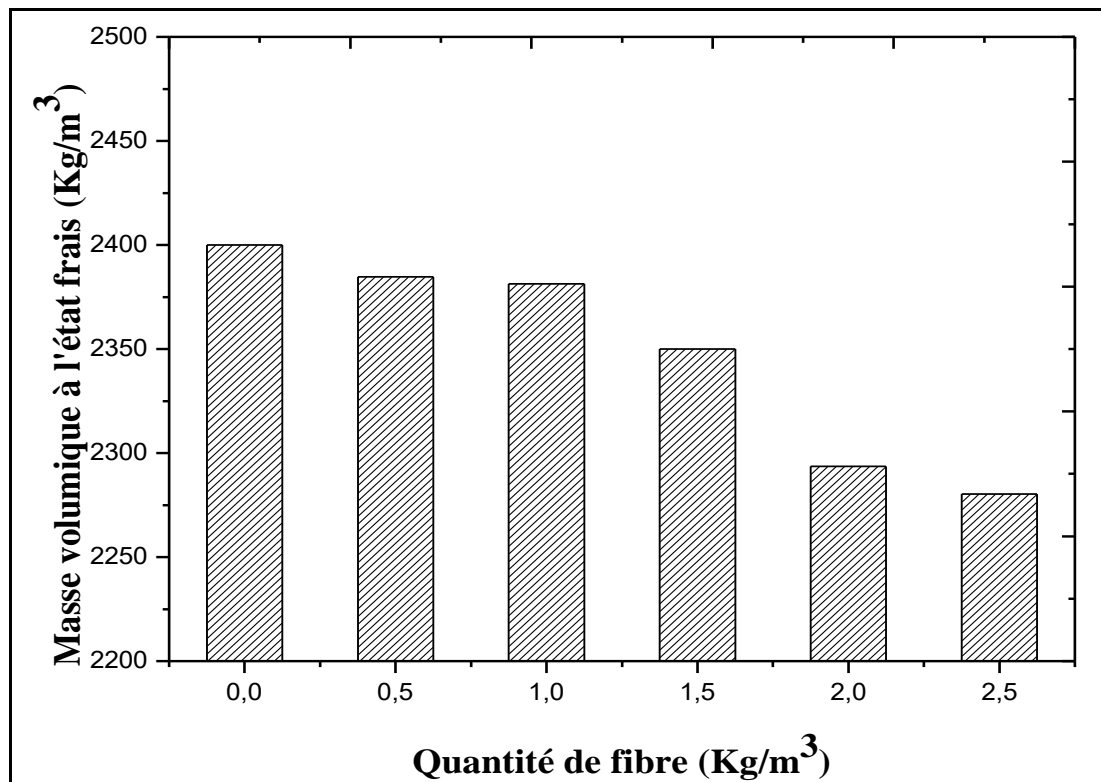


Figure IV. 1 : Masse volumique à l'état frais des différents mélanges de BCR.

Les résultats obtenus montrent une diminution de la masse volumique du béton avec l'ajout de fibre polypropylène, cela est dû, d'une part, à la faible densité des fibres polypropylènes et d'autre part à la création d'une porosité supplémentaire entre les fibres et la matrice.

IV.2.2 La maniabilité

Dans cette partie, on a étudié la maniabilité du béton compacté au rouleau. Habituellement, la maniabilité d'un béton est mesurée par le cône d'ABRAMS ou un procédé similaire qui se base sur l'écoulement du béton par rapport à une longueur ou un temps mesurer, par contre, le BCR a un affaissement quasi nul, donc les tests conventionnels n'ont aucun effet sur ce genre de béton raide. Pour y remédier, on a utilisé l'essai VEBE suivant la norme américaine (C1170, 1998). Non seulement cet essai va nous donner la variation de la maniabilité par rapport à l'ajout de fibre, mais aussi il va nous permettre d'avoir une idée sur le temps de compactage de chaque type de béton de fibre. Le temps de compactage donné par l'essai VEBE est noté, ensuite des essais d'ajustement sont effectués pour déterminer le temps de compactage adéquat pour l'obtention d'un BCR avec une compacité optimale.

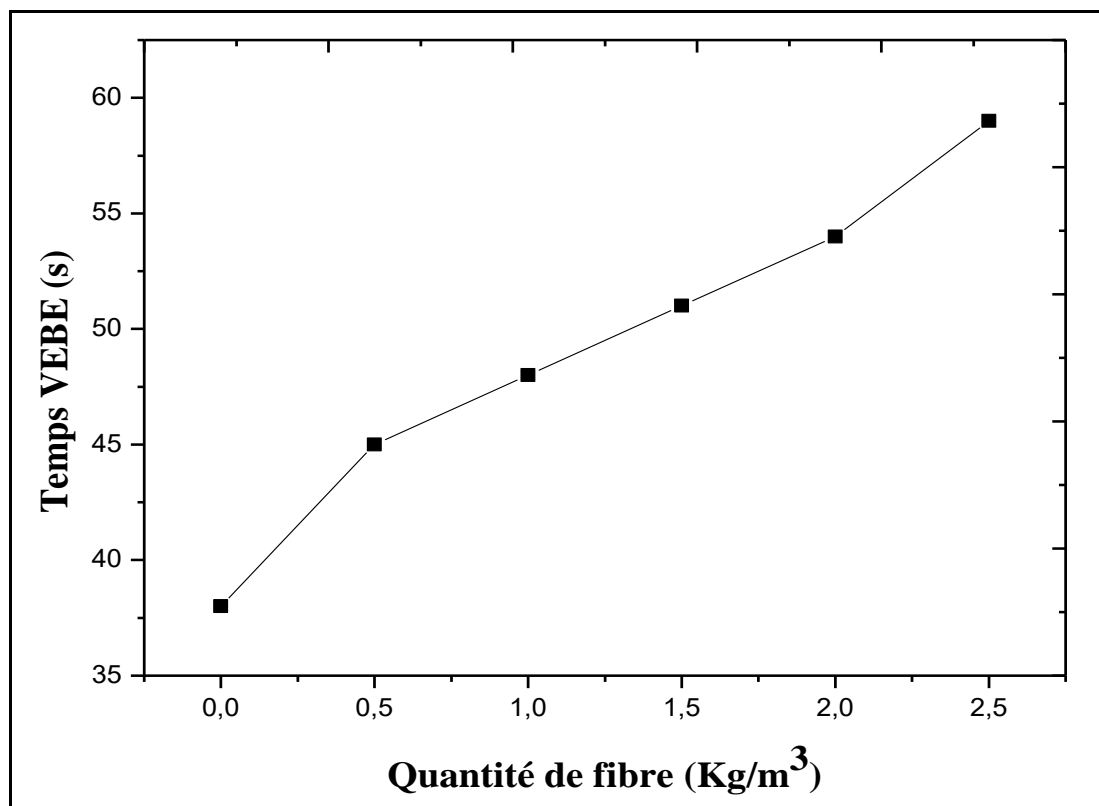


Figure IV. 2 : Maniabilité des mélanges de BCR représenté par le VEBE (s).

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que le temps de compactage mesuré avec l'essai VEBE augmente proportionnellement pour les BCRF, ce qui confirme l'effet négatif des fibres polypropylènes sur la maniabilité du béton.

La diminution de la maniabilité avec l'ajout de fibres polypropylènes est expliquée par la création de micros barrages de fibre qui emprisonne l'eau (Yap, Alengaram et al. 2013). D'autres recherches (Hsie M 2008) (Ramezani pour *et al.*, 2013) ont expliqué cette réduction par l'effet qu'ont les fibres à réduire le frottement inter-granulaire dans le béton ce qui minimise l'écoulement.

IV.3 À L'ÉTAT DURCI

IV.3.1 La masse volumique

Après conservation des éprouvettes pendant 28 jours dans l'eau, on a mesuré la masse volumique des mélanges après durcissement. La figure IV.3 regroupe les résultats de la masse volumique des BCR. Il est bien clair que l'ajout des fibres polypropylènes, au-delà de 1 kg/m³, diminue considérablement la masse volumique. On constate aussi que, à faible dosage (inférieur à 1 kg/m³), la valeur de la masse volumique reste aux alentours de 2400 kg/m³.

La réduction de la masse volumique dans les BCRF n'est pas seulement due à la faible densité des fibres polypropylènes (0.9 kg/m³), mais aussi à la porosité supplémentaire créée par les fibres.

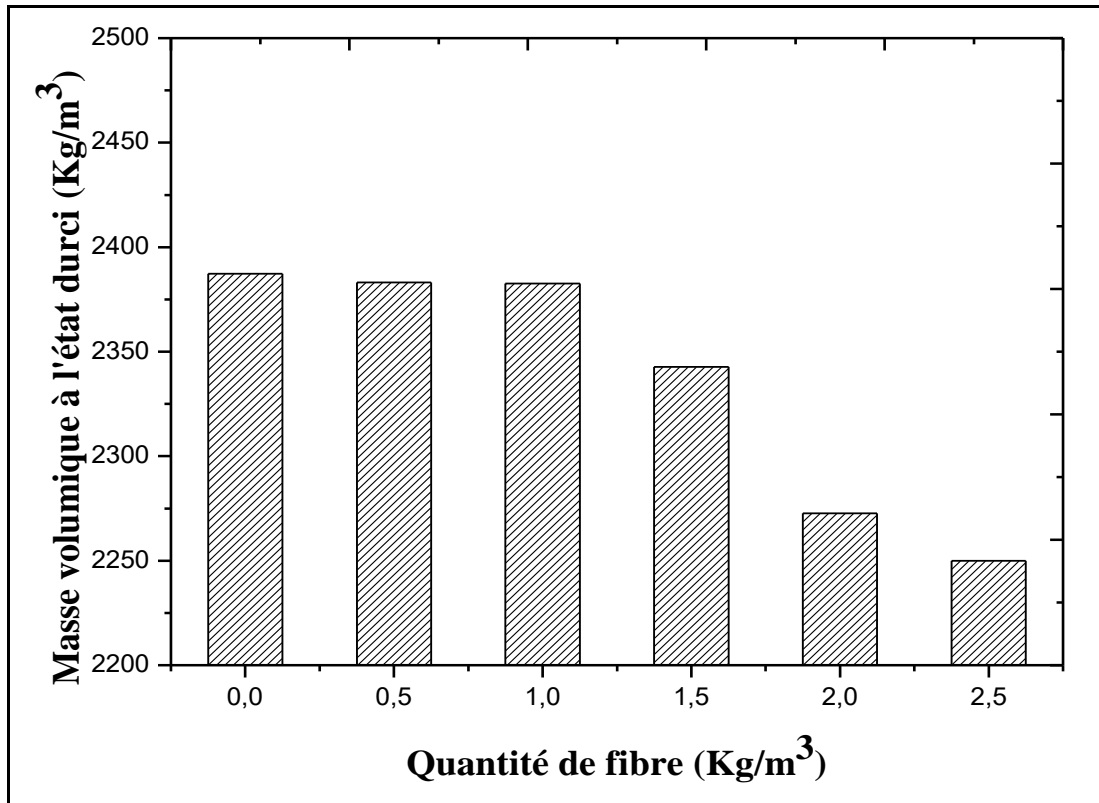


Figure IV. 3 : Masse volumique à l'état durci des différents mélanges de BCR.

IV.3.2 Absorption capillaire

La figure IV.4 montre l'évolution de l'absorption capillaire des BCR renforcés avec différentes quantités de fibres. Cette caractéristique nous permet d'avoir un aperçu sur les structures poreuses des bétons à une macro-échelle. L'absorption capillaire peut aussi nous donner une idée sur les performances mécaniques des bétons. En effet, la littérature nous apprend que la majorité des bétons avec un faible coefficient d'absorption capillaire présentent des bonnes performances mécaniques. On peut estimer, d'après les résultats de l'absorption capillaire, la durabilité des bétons dans un milieu agressif ; un béton durable doit forcément avoir un faible coefficient d'absorption ce qui minimise les transferts de fluide entre le milieu extérieur et le milieu interne du béton.

D'après les résultats obtenus dans cette étude, on peut remarquer que le coefficient d'absorption est grandement influencé par l'ajout de fibre polypropylène.

Le BCR témoin (0 kg/m³) présente une valeur plus élevée par rapport aux autres BCRF. La réduction de l'absorption capillaire est due à la création de micros barrages créés par les fibres polypropylènes ce qui empêche la remonté d'eau par capillarité.

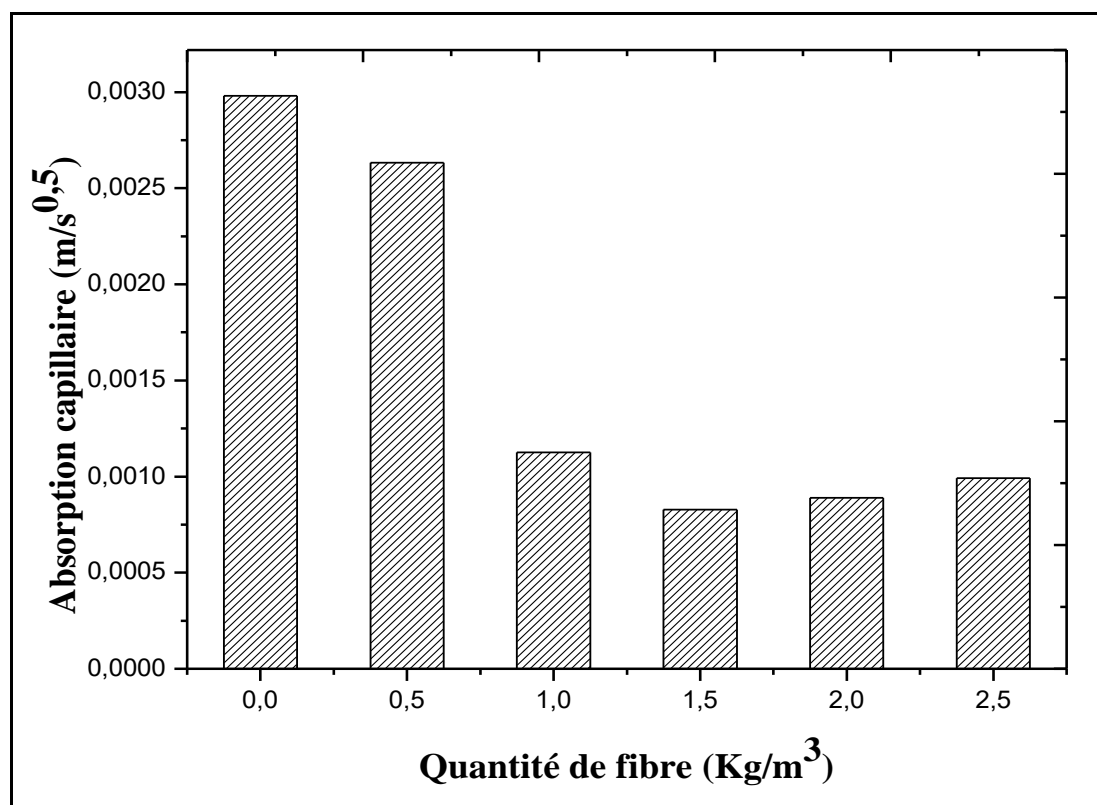


Figure IV. 4 : Absorption capillaire des différents mélanges de BCR.

IV.3.3 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un essai physique qui révèle beaucoup sur la performance du béton du point de vue mécanique et de durabilité. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cubiques 10*10*10 cm de béton, 3 essais sont effectués pour chaque mélange de BCR renforcé par des fibres polypropylènes. La porosité est exprimée généralement par le pourcentage (%) des pores par rapport au volume total de l'échantillon.

La figure IV.5 montre clairement que les fibres de polypropylènes affectent sérieusement la porosité du béton, en effet on remarque une diminution de la porosité à de faibles taux (inférieur à 1.5 kg/m³) de fibres polypropylènes. Au-delà de cette valeur, on peut remarquer une augmentation proportionnelle de la porosité. La présence des fibres, à faible taux, améliore la structure poreuse des bétons. Par contre, et à des taux plus élevés, les fibres génèrent une porosité supplémentaire.

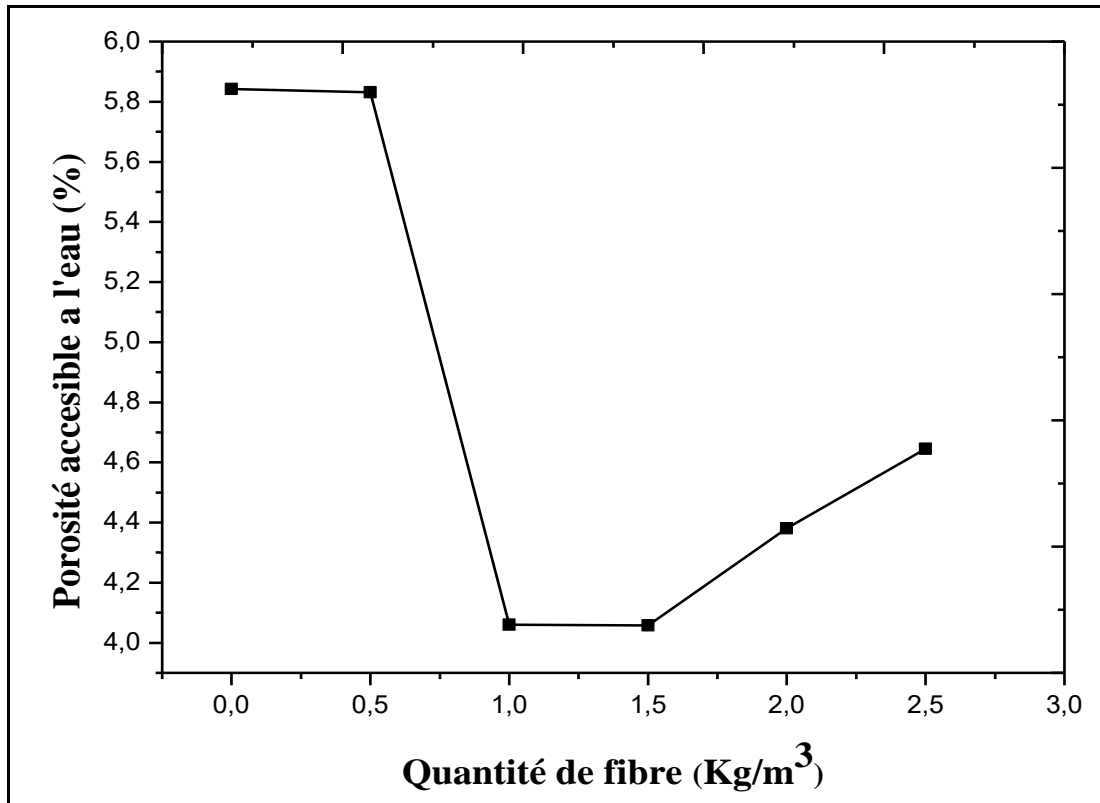


Figure IV. 5 : Porosité accessible à l'eau des différents mélanges de BCR.

IV.3.4 Retrait

Le retrait total c'est la somme du retrait de dessiccation et le retrait endogène. La figure IV.6 montre l'évolution des déformations différées totales des BCR à base des fibres polypropylènes.

On remarque à partir de la figure IV.6 qu'aux premiers jours, aucune différence mesurable n'est observée pour les différents BCR. Par contre, l'écart évolue rapidement au-delà de 7 jours. La cinétique de la déformation du retrait est rapide et probablement due au fort gradient d'humidité existant entre le matériau testé et le milieu extérieur. Par la suite, sa cinétique devient lente à cause du séchage.

On constate que l'introduction des fibres de polypropylène avec un dosage de 2.5 kg/m³ dans les BCR engendre une diminution des déformations différées totales de 59 % par rapport au BCR témoin. Cette diminution a été confirmée par les travaux de R.D. Tolêdo Filho et al (R.D. Tolêdo Filhoa 1999). La diminution du retrait dans les bétons à base de fibres de polypropylène peut s'expliquer par la création de réseaux de fibres qui créent un effet de couture, cela permet au BCR renforcé par des fibres d'avoir un faible taux de retrait (Benouadah, Beddar et al. 2017).

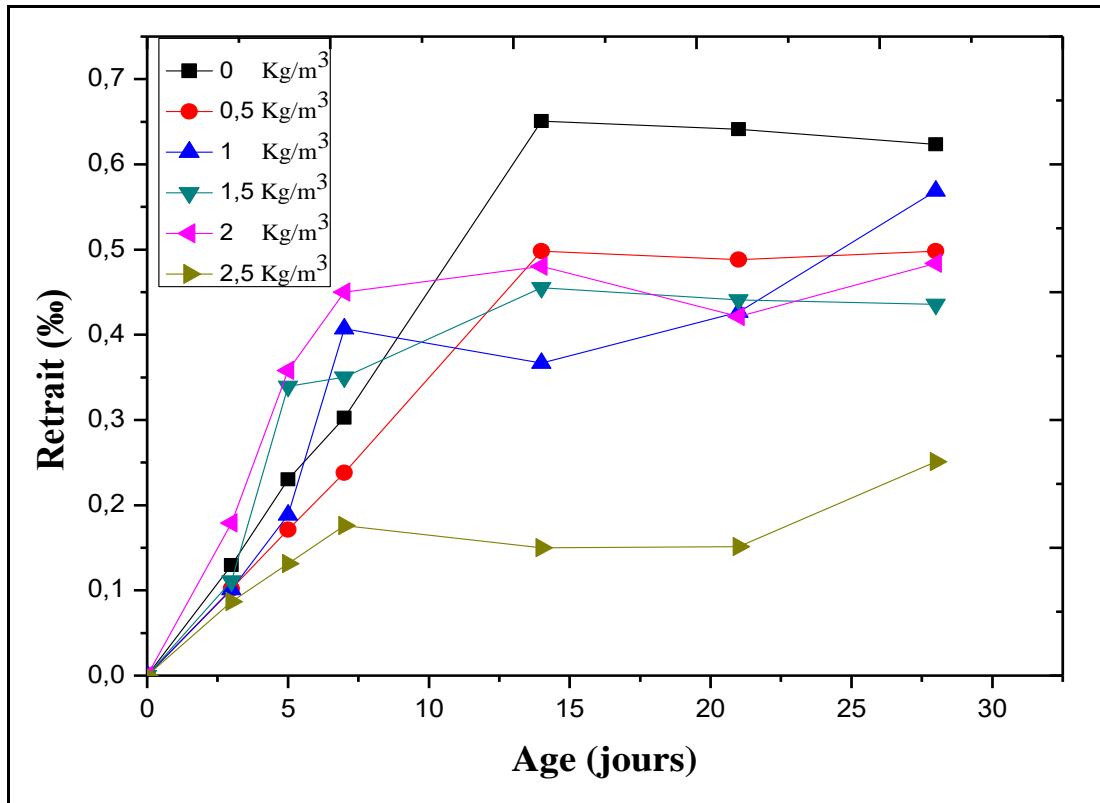


Figure IV. 6 : Variation du retrait des différents mélanges de BCR.

IV.3.5 La résistance à la compression

La résistance en compression est un facteur important dans un mélange à base cimentaire. Elle peut donner une forte indication sur la qualité du produit finale. Les résultats obtenus sont représentés par la figure IV.7 :

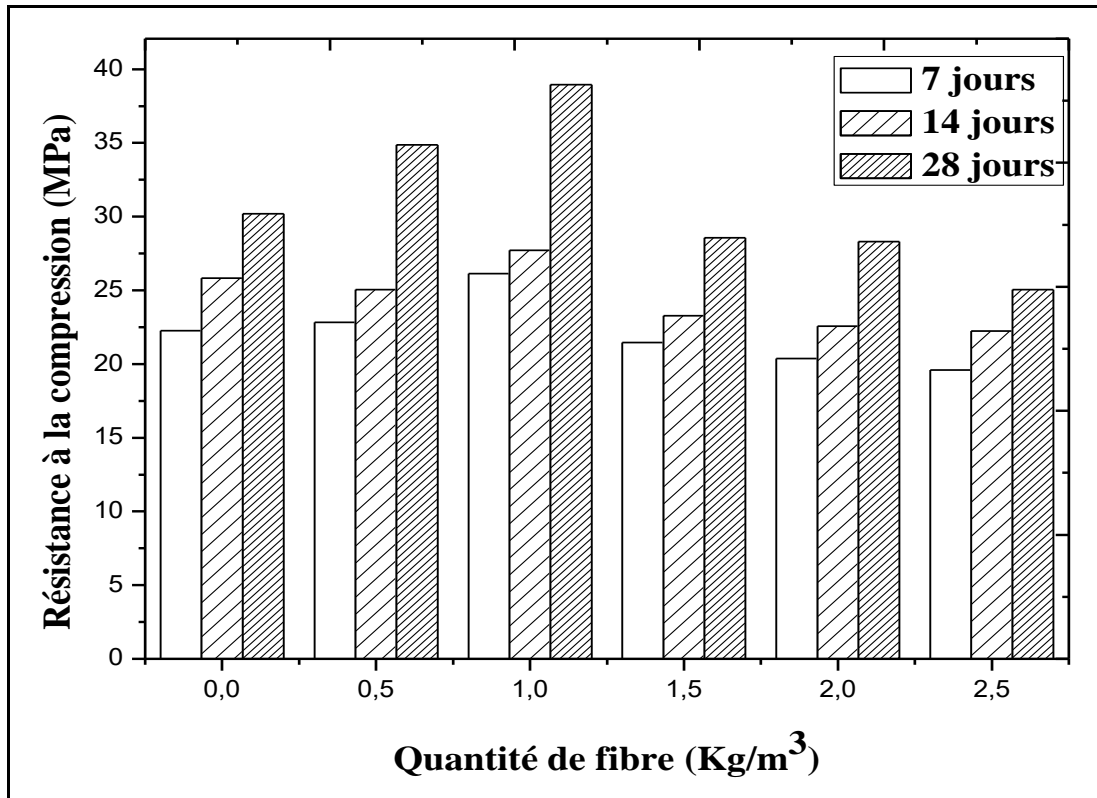


Figure IV. 7 : Résistance à la compression des différents mélanges de BCR à 7, 14 et 28 jours.

Selon la figure IV.7, on remarque que tous les mélanges étudiés présentent la même cinétique de développement de la résistance aux différents âges 7, 14, et 28 jours. Cela est naturel vu que tous les mélanges ont le même dosage de liant.

Les mélanges contenant 0.5 et 1 kg/m³ de fibres de polypropylènes présentent une augmentation remarquable de la résistance à la compression de l'ordre de 14 % et 23 % comparativement au béton sans fibre. Par contre, une réduction de la résistance des mélanges contenant un dosage supérieur à 1.5 kg/m³ de fibres de polypropylènes a été observée, la diminution est de l'ordre de (5 %, 6 %, 17 %) pour les mélanges (1.5, 2 et 2.5 kg/m³) respectivement.

Topçu et Canbaz (Topçu and Canbaz 2007) ont également démontré que les fibres pourraient réduire la formation et le développement des fissures, et donc conduisent à l'augmentation de la résistance à la compression. S. Kakooei et al (Kakooei 2012) ont constaté que l'augmentation de la résistance à la compression dans les bétons renforcés avec des fibres polypropylènes est due à la disposition des fibres qui se situe en largeur par rapport aux fissures créant des ponts de connexion qui rendent le béton plus résistant.

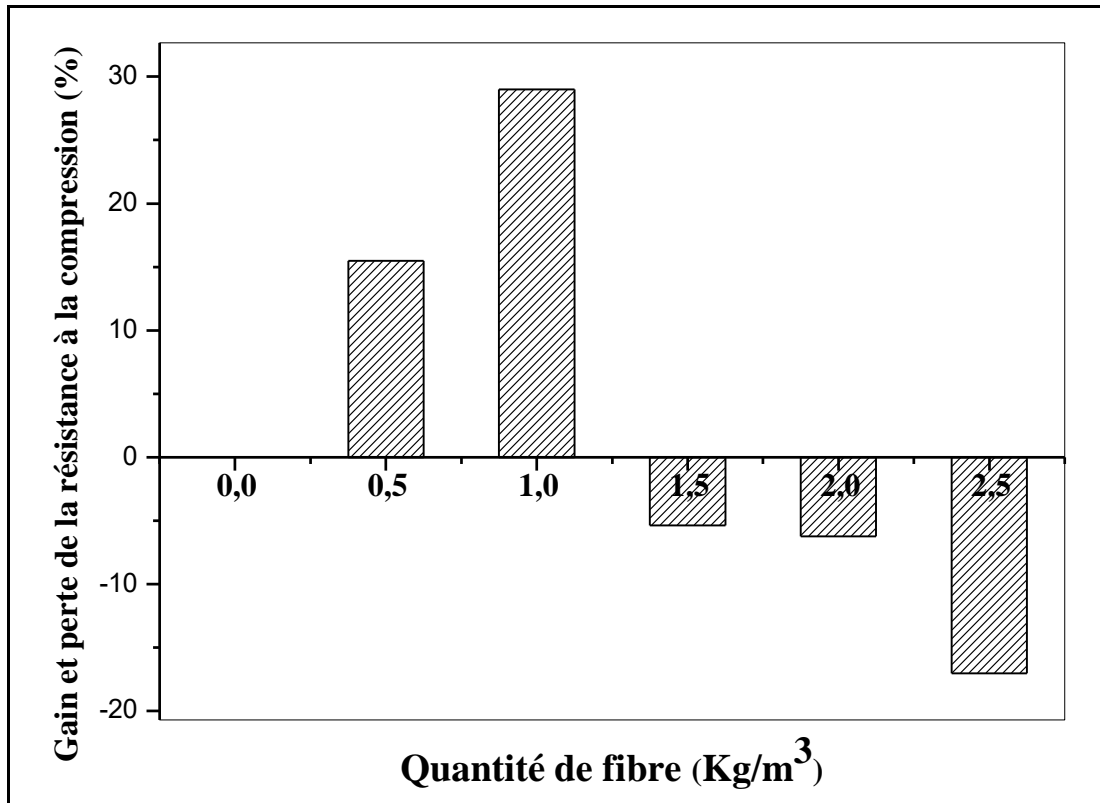


Figure IV. 8 : Variation de la résistance à la compression des différents mélanges de BCR.

IV.3.6 La résistance à la traction par flexion

À partir des figures IV.9 et IV.10 qui représentent la variation de la résistance à la traction par flexion des différents mélanges ; on observe que l'utilisation des fibres polypropylène dans les BCR avec des quantités de 0.5, 1, 1.5 et 2 kg/m³ a un effet bénéfique sur la résistance, une augmentation de 21 % du BCR 0.5 (dosage en fibre) par rapport au BCR_T (sans fibre) a été remarquée. C. Jiang et al. (Jiang, Fan et al. 2014) ont expliqué cela par l'action de pontage des fibres distribuées à travers les fissures. Ce phénomène appelé effet de couture retarde la propagation des microfissures. Après la fissuration primaire, les contraintes sont transférées vers les fibres ce qui améliore la résistance à la traction.

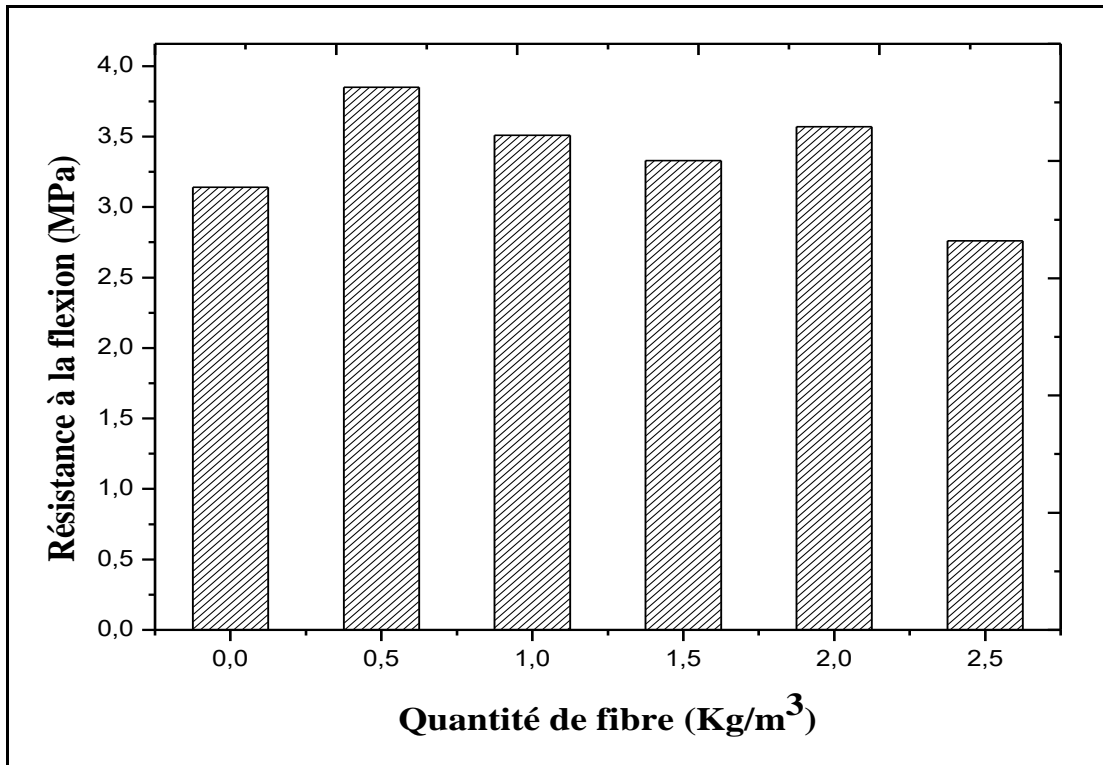


Figure IV. 9 : Résistance à la traction par flexion des différents mélanges de BCR.

La résistance des bétons sous des sollicitations de flexion est très faible, ce matériau a d'excellentes performances au niveau de la compression, mais en ce qui concerne la flexion son rendement est très limité.

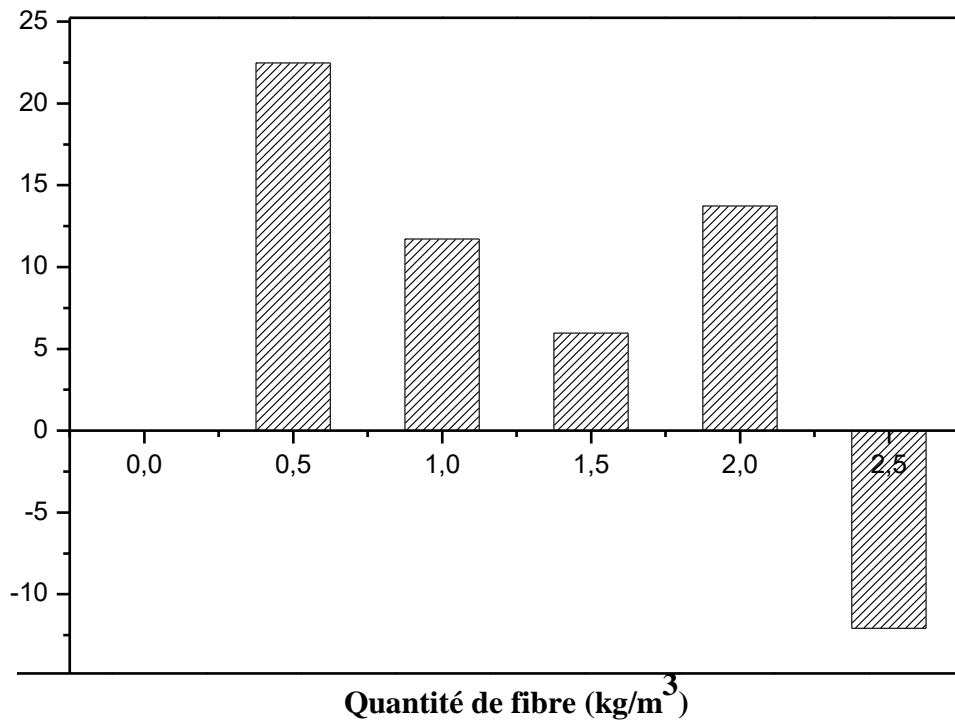


Figure IV. 10 : Variation de la résistance à la flexion des différents mélanges de BCR.

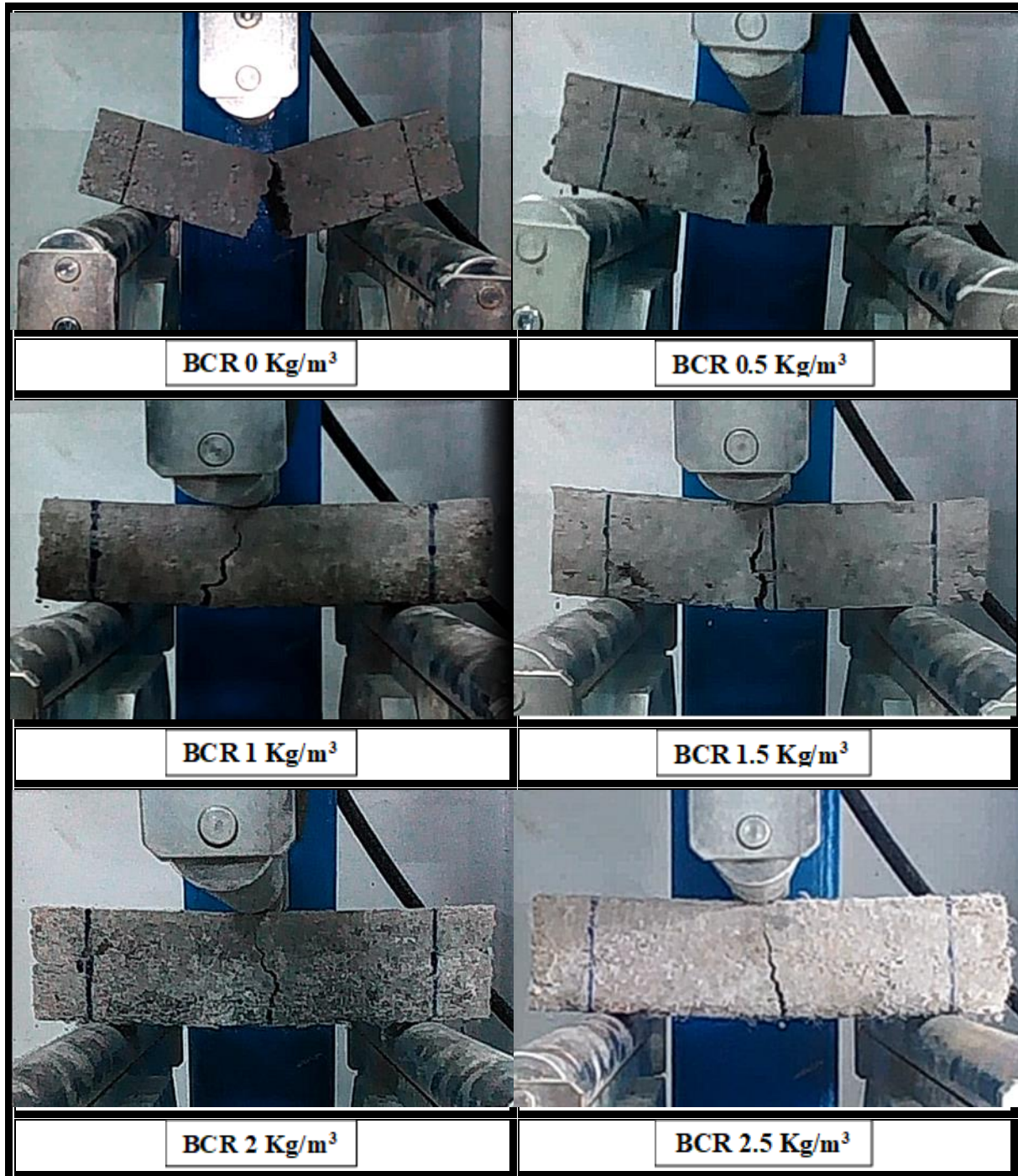


Figure IV. 11 : Aspect des éprouvettes à la rupture.

La figure IV.11 présente le mode de rupture des éprouvettes prismatiques des bétons compactées au rouleau renforcé par différentes quantités de fibres polypropylènes soumises à un effort de flexion (3point). On peut remarquer d'après ces figures que la ductilité d'un BCR renforcé par des fibres est plus importante que celle d'un BCR sans fibres.

En effet, plusieurs chercheurs (Ramezianpour *et al.*, 2013)(Wu 2002) ont démontré que les fibres polypropylènes exercent au sein du béton des coutures au moment de la

fissuration primaire ce qui augmente en premier lieu l'effort de rupture et en second lieu une ductilité importante.

IV.3.7 La résistance à la traction par fendage

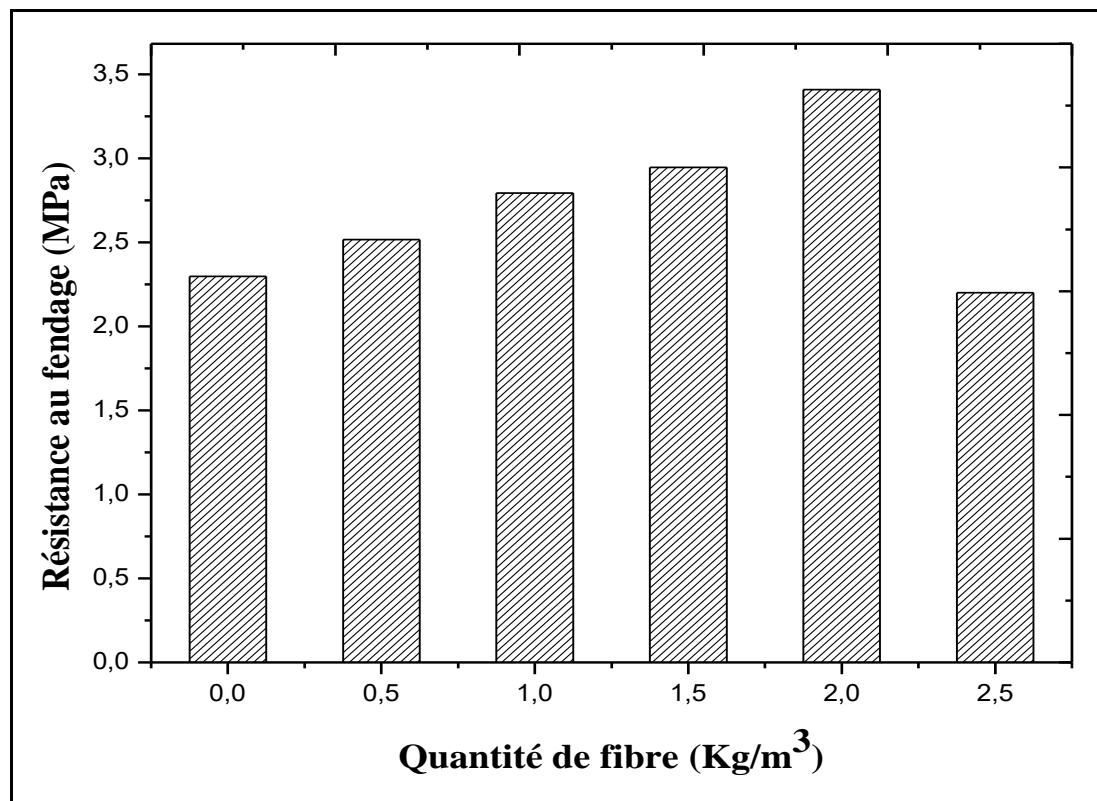


Figure IV. 12 : Résistance à la traction par fendage des différents mélanges de BCR.

La figure IV.12 présente la variation de la résistance à la traction par fendage des différents types de BCR renforcé par des fibres polypropylènes. D'après cette figure, on observe que l'utilisation des fibres polypropylènes dans les BCR a des quantités de 0.5, 1, 1.5 et 2 kg/m³ a un effet bénéfique sur la résistance de la traction par fendage, on a noté une augmentation de 32 % du BCR 2 par rapport au BCRT (sans fibre). Les résultats du fendage sont en coordinance avec la résistance à la traction par flexion. La création de ponts de connexion entre les fibres et la matrice explique cette augmentation de résistance.

IV.3.8 Vitesse ultrasonique

Les ondes ultrasonores qui se propagent dans le béton subissent une divergence géométrique due à la morphologie microstructurale des bétons ainsi qu'aux différents constituants (granulats, matrice cimentaire et dans notre cas les fibres polypropylènes). La figure IV.13 montre les valeurs de la vitesse ultrasonique en fonction du dosage des fibres. Une

réduction proportionnelle à l'ajout de fibre a été observée. Cette diminution est due principalement à la faible connectivité sonore des fibres polypropylènes qui empêche la propagation des ondes dans le béton. En effet, les polypropylènes sont considérés comme un matériau isolant (phonique).

Généralement, la vitesse ultrasonique est utilisée pour déterminer la résistance à la compression des bétons. Cependant, les recherches n'ont toujours pas trouvé une relation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression des BCR (Rao, Sravana et al. 2016).

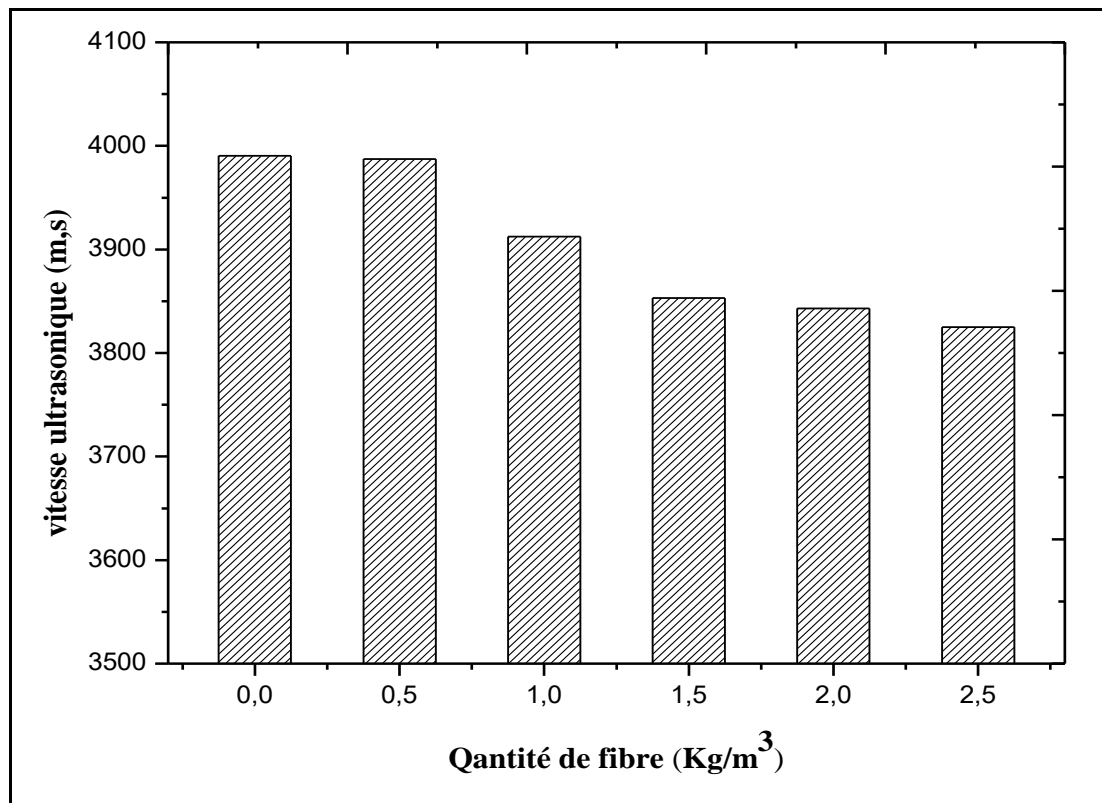


Figure IV. 13 : Variation de la vitesse ultrasonique des différents bétons.

IV.3.9 Observation au microscope optique

Les éprouvettes de BCR renforcé par des fibres polypropylènes ont été préparées et transformées en lamelles au sein de l'ORG (Office National de Recherche Géologique et Minière, Boumerdès). Ainsi, on peut visualiser les échantillons de béton au microscope optique.

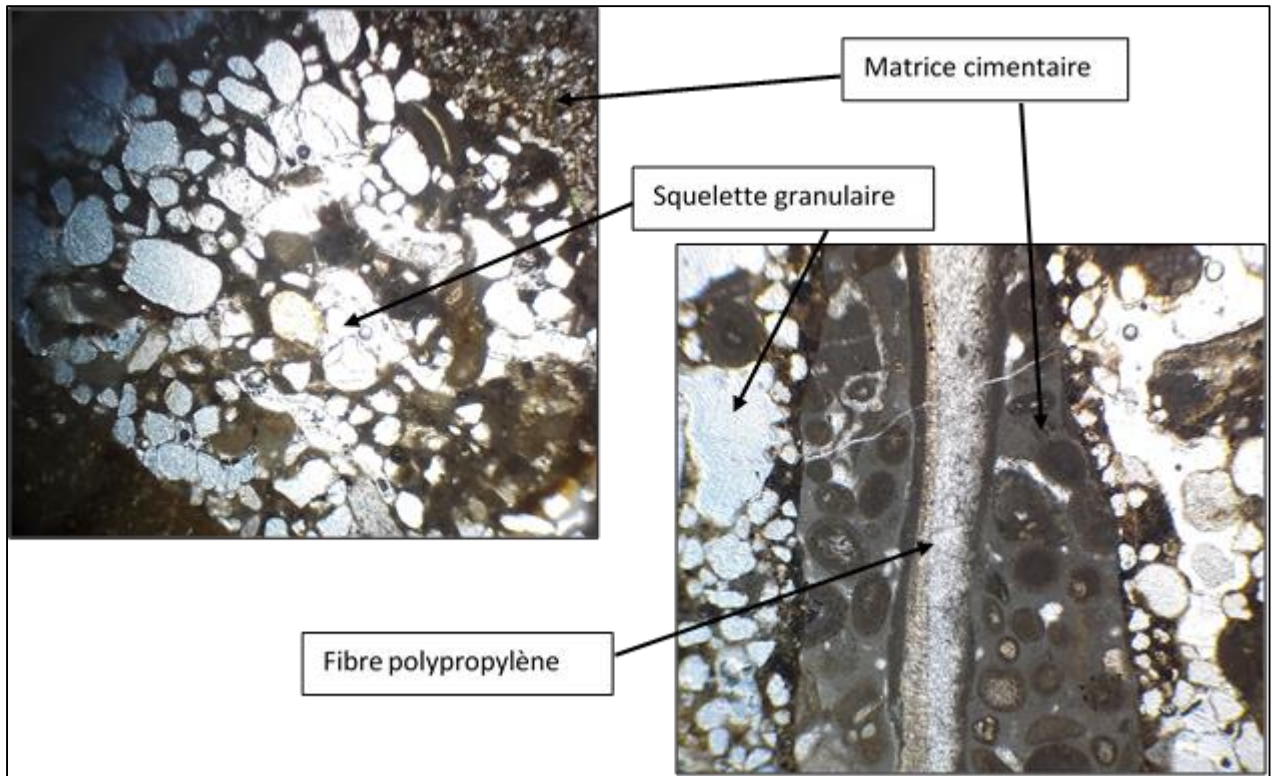


Figure IV. 14 : Photographie de microscope optique des BCR0 et BCR2.5.

La figure IV.14 représente la structure des différents bétons étudiés. On peut visualiser clairement la présence de différentes phases. À gauche (béton sans fibre), deux phases ; la matrice cimentaire et le squelette granulaire ont été observés. Pour les bétons avec fibre (à droite), on remarque clairement la présence d'une troisième phase (fibre polypropylène).

IV.4 Conclusion

Le présent chapitre expose l'effet des fibres polypropylènes sur le comportement physico-mécanique du béton compacté au rouleau. Au début, on a étudié les mélanges à l'état frais afin de comprendre l'effet des fibres sur le comportement rhéologique de béton compacté au rouleau. Ensuite, les résultats des essais physico-mécaniques (retrait, absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et les performances mécaniques) ont été présentés et interprétés.

CHAPITRE V : Effet des fibres sur l'écoulement hydrique et la durabilité d'un BCR.

V.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on a traité le comportement hydrique des BCR renforcé par des fibres polypropylènes. La perméabilité, le degré de pénétration et la porosité au mercure ont été effectués. Les paramètres régissant l'écoulement dans le béton renforcé par des fibres ont été étudiés.

En second lieu, la durabilité des BCR dans un milieu agressif (acide sulfurique) a été entreprise. Plusieurs paramètres tels que la variation de masse, la résistance à la compression et l'analyse minéralogique ont été suivis.

V.2 DEGRÉ DE PÉNÉTRATION

Il est bien connu qu'un béton avec une bonne résistance à la pénétration au fluide extérieur possède une bonne durabilité, le béton compacté au rouleau est destiné à deux applications (barrages et pavages) qui exige une bonne imperméabilité et une résistance au milieu agressif extérieur. Le BCR destiné à une application routière est très sollicité à cause de son emplacement qui se trouve notamment approximé des réseaux d'assainissement qui contiennent généralement plusieurs types d'agents agressifs pour les bétons, sans oublier les différentes eaux qui s'écoulent sur les routes (pluie, verglas et sel de déverglaçage).

La figure V.1 présente le degré de pénétration des BCR renforcé avec différentes quantités de fibres polypropènes, l'essai est effectué suivant le mode opératoire expliqué dans le chapitre III. On remarque d'après les résultats obtenus que les fibres polypropylènes affectent positivement le degré de pénétration des BCR étudiés, en effet le degré de pénétration est nettement faible pour les BCR (0.5, 1 et 1.5 kg/m³), au-delà de cette quantité le degré de pénétration reprend son ascension. Ce changement est causé par la présence des fibres et leurs proportions dans le béton. Selon Ramezianpour et al (Ramezianpour *et al.*, 2013), la présence des fibres polypropylènes, à de faibles taux, diminue le degré de pénétration. Cette réduction est expliquée par le blocage des réseaux poreux et de la diminution de l'absorption capillaire. L'augmentation du degré de pénétration pour les mélanges (2 et 2.5 kg/m³) est due à la création d'une porosité supplémentaire créée par l'excès en fibres polypropylènes.

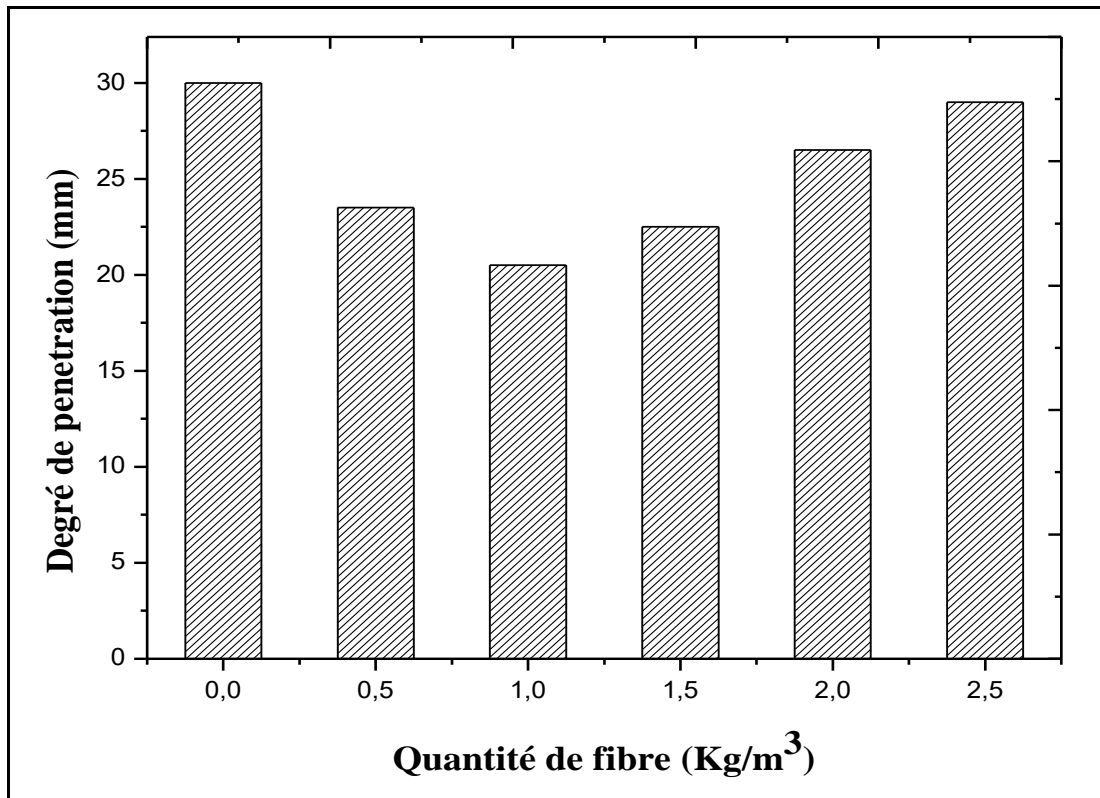


Figure V. 1 : Degré de pénétration des différents mélanges de BCR.

Les figures (V.2, V.3 et V.4) présentent des éprouvettes de bétons compactés au rouleau après fendage et après exposition à une pression d'eau de 5 bars pendant 72 heures. Selon Ramezani pour et al (Ramezani pour *et al.*, 2013), la majorité des bétons possède un degré de pénétration aux alentours de 7 cm. Cependant, le béton compacté au rouleau témoin présente une valeur de 3 cm, cela est expliqué par l'effet du compactage exercé.



Figure V. 2 : Degré de pénétration du BCR 0 kg/m³.



Figure V. 3 : Degré de pénétration du BCR 1 kg/m³.



Figure V. 4 : Degré de pénétration du BCR 2.5 kg/m³.

V.3 COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ (K)

La procédure de mesure des perméabilités à l'eau des bétons est très complexe à déterminer. En effet, plusieurs paramètres influent sur le bon déroulement de cet essai tels que : la pression exercée, les conditions climatiques et la durée de l'essai. De plus, dans ce cas de figure, aucune méthode type n'est proposée par la littérature. Plusieurs chercheurs travaillent sur une procédure qui procure des bons résultats sans perturber la microstructure des bétons.

Dans notre étude, on a suivi le mode opératoire décrit dans le chapitre III. L'échantillon est préparé et mis dans le perméamètre à une pression de 5 bars. En effet, l'utilisation d'une importante pression d'eau (inférieur à 5 bars) peut engendrer une modification microstructurale à l'intérieur du béton. Par contre, une faible pression (inférieur à 5 bars) augmente la durée de l'essai. Cette faible pression crée de nouveaux produits d'hydratation changeant la connectivité des pores.

La figure V.5 présente le coefficient de perméabilité (k) suivant la loi de Darcy par rapport à la quantité de fibres polypropylènes ajoutées dans le béton. On remarque que la perméabilité des mélanges renforcés par des fibres est plus faible que celle du BCR témoin (sans fibre). De plus, on peut voir que la perméabilité atteint son minimum pour le mélange BCR1. Par contre, au-delà de cette quantité de fibres, la perméabilité augmente légèrement.

Les résultats du coefficient de perméabilité (k) valident les constatations observées à propos du degré de pénétration d'eau. D'après les travaux de BEDDAR (Miloud 2005), une faible porosité dans le béton ne signifie pas une perméabilité faible. Donc, la connectivité des pores joue un rôle important dans la perméabilité.

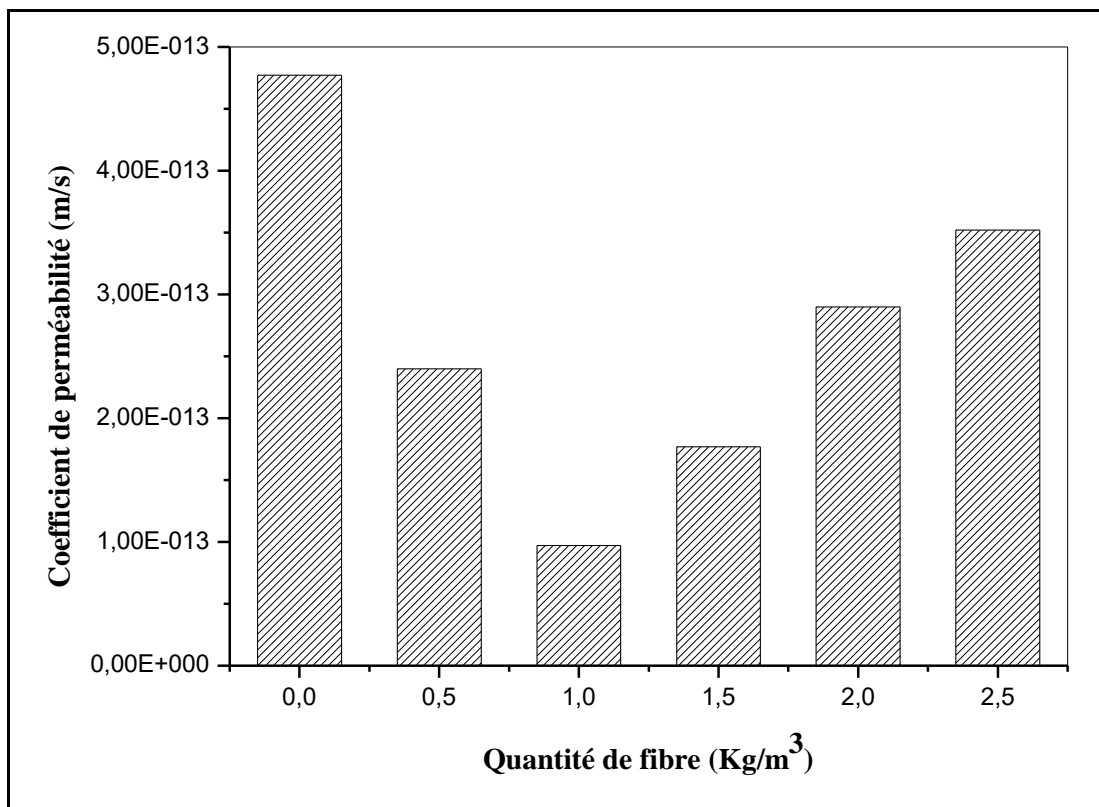


Figure V. 5 : Coefficient de perméabilité (k) des différents mélanges de BCR.

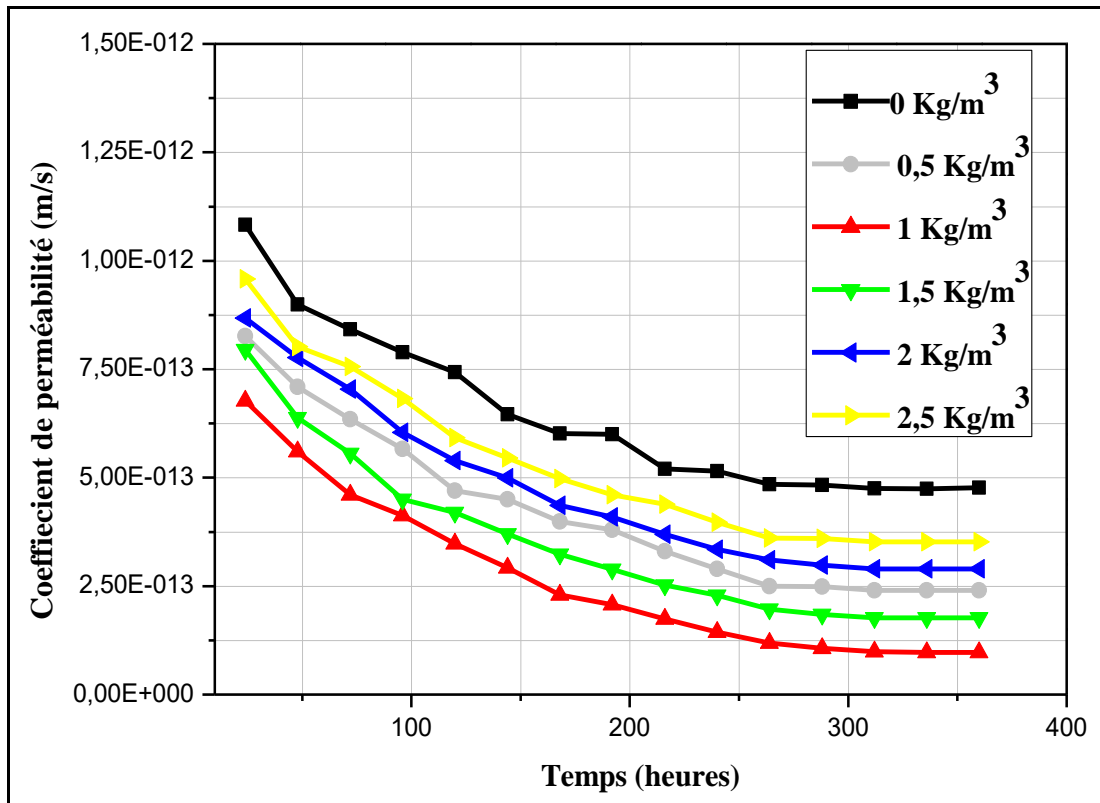


Figure V. 6 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps.

La figure V.6 présente la variation du coefficient de perméabilité en fonction du temps. On constate que la cinétique de la perméabilité est presque la même pour tous les mélanges étudiés.

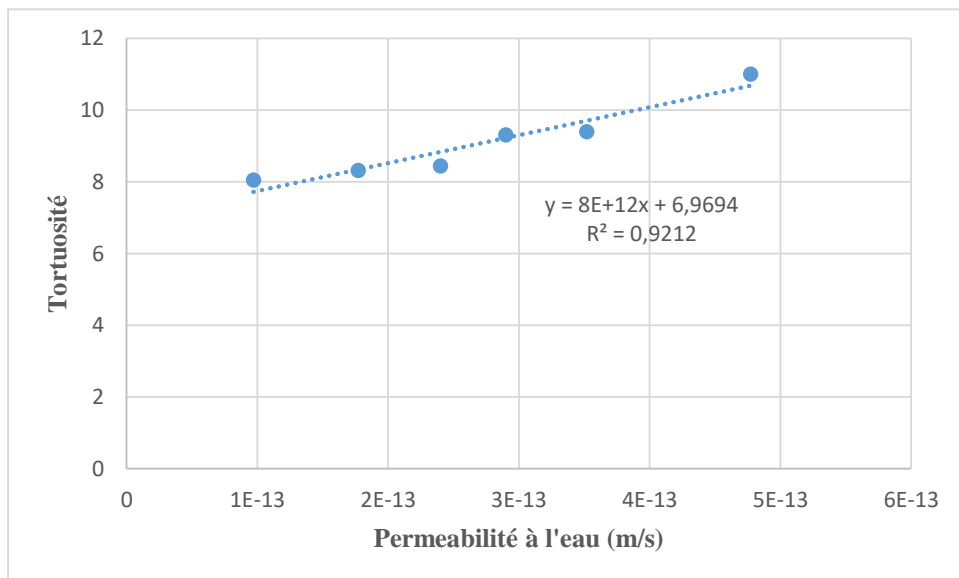


Figure V. 7 : Relation entre la perméabilité à l'eau et la tortuosité.

On constate à partir de la figure V.7 qu'il y a une bonne corrélation entre la perméabilité à l'eau et la tortuosité.

V.4 POROSITÉ AU MERCURE

La porosité par intrusion de mercure est une technique qui nous permet de connaître plusieurs propriétés microstructurales d'un matériau. Parmi ces propriétés, on distingue :

- Le pourcentage de porosité donné par cet essai est beaucoup plus précis que celui obtenu par d'autres techniques (porosité accessible à l'eau).
- La distribution de la taille des pores peut aider à mieux comprendre la structure du béton.

Dans la présente étude, la porosité au mercure est effectuée suivant la procédure décrite dans le chapitre III. L'échantillon est préparé minutieusement (étuvage à 60 °C pendant 24 heures) puis mis dans le pénétromètre. Ensuite, deux cycles de pression sont exercés (basse pression et haute pression).

La figure V.8 montre les résultats de la porosité des différentes BCR avec et sans fibres de polypropylènes. On remarque que l'ajout de fibre polypropylène diminue la porosité particulièrement pour les 0.5, 1 et 1.5 kg/m³. À des taux de 2 et 2.5 kg/m³, une augmentation de la porosité est remarquée. Cela est expliqué par l'agglomération des fibres produisant des porosités supplémentaires.

À partir des résultats trouvés, on peut remarquer que la porosité obtenue avec le MIP est plus considérable que celle obtenue par la porosité accessible à l'eau. Cette différence est expliquée d'une part par la nature de fluide utilisé (mercure et eau). D'autre part, la pression d'injection du mercure dans le MIP est élevée ce qui nous permet d'atteindre les pores à l'échelle microscopique.

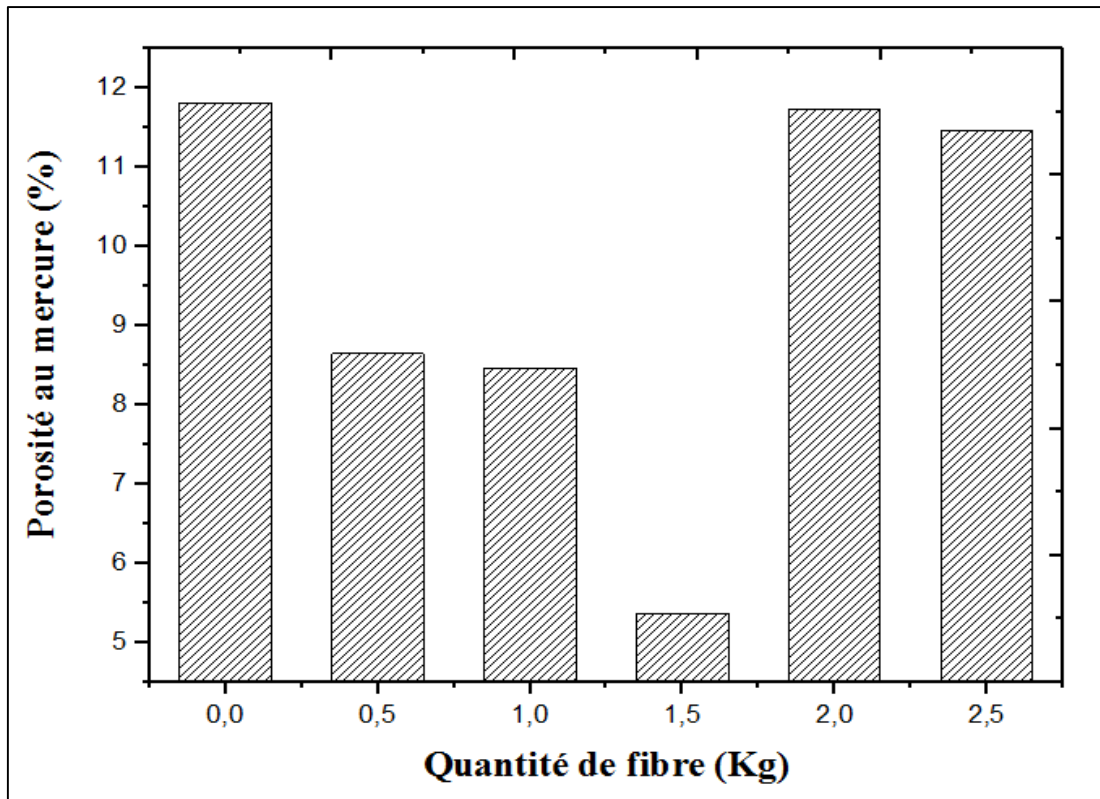


Figure V. 8 : Porosité par intrusion de mercure (MIP) des différents mélanges de BCR.

La figure V.9 présente le diamètre de pore médian par rapport aux mélanges étudiés. On peut voir clairement que les mélanges avec 1 et 1.5 kg/m³ de fibre présentent les plus faibles valeurs du diamètre médian. Ces résultats consolident la faible porosité obtenue par ces deux mélanges.

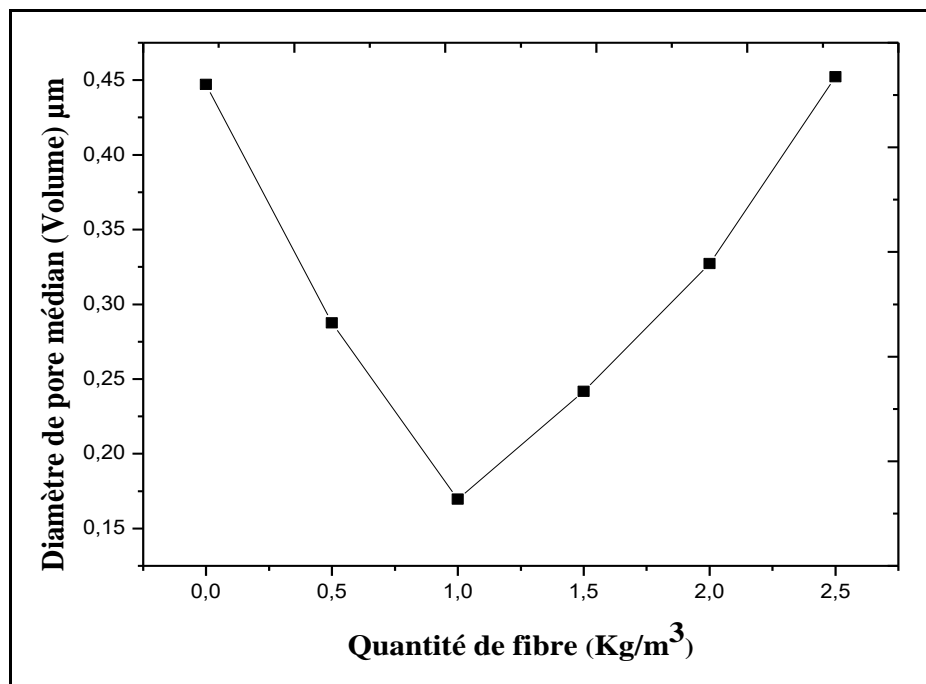


Figure V. 9 : Diamètre des pores médians (volume) des différents mélanges de BCR.

V.4.1 Distribution des pores par intrusion de mercure (MIP)

Afin d'estimer la distribution des pores par intrusion de mercure, on a utilisé l'équation de Washburn. Les figures (V.10, V.12, V.14, V.16, V.18, V.20 et V.22) montrent les incréments de volume injectés dans chaque mélange de BCR étudié.

On remarque qu'il existe trois familles selon le diamètre des pores ; microspores (0.0076-3 μ m), méso pores (3-30 μ m) et macrospores (30-400 μ m).

- Micro-pores (0.0076-3 μ m) : on constate que le BCR1 a un taux de pores très important par rapport aux autres mélanges. Le BCR 2.5 a la plus faible quantité de pores comprise entre (0.0076-3 μ m).
- Méso pores (3-30 μ m) : tous les BCR ont la même distribution de pore à l'exception, entre les 7 et 9 μ m, des mélanges (BCR 1 et BCR 1.5) qui présentent des pics plus élevés.
- Macrospores (30-400 μ m) : une augmentation considérable des pores a été constatée pour les BCR2 et BCR2.5.

Les figures (V.11, V.13, V.15, V.17, V.19, V.21 et V.23) regroupent le volume injecté cumulé dans chaque BCR. On distingue que le volume de mercure introduit est très significatif pour les BCR0.5, BCR2 et BCR2.5 par rapport aux autres mélanges.

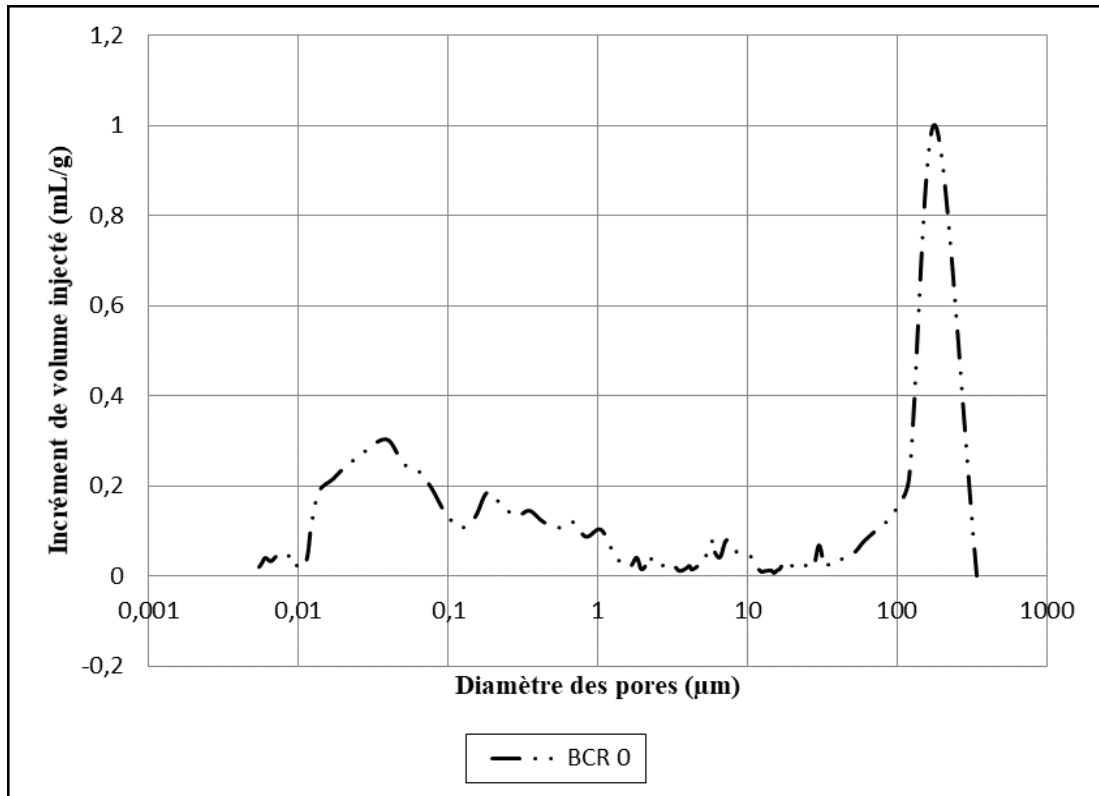


Figure V. 10 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 0.

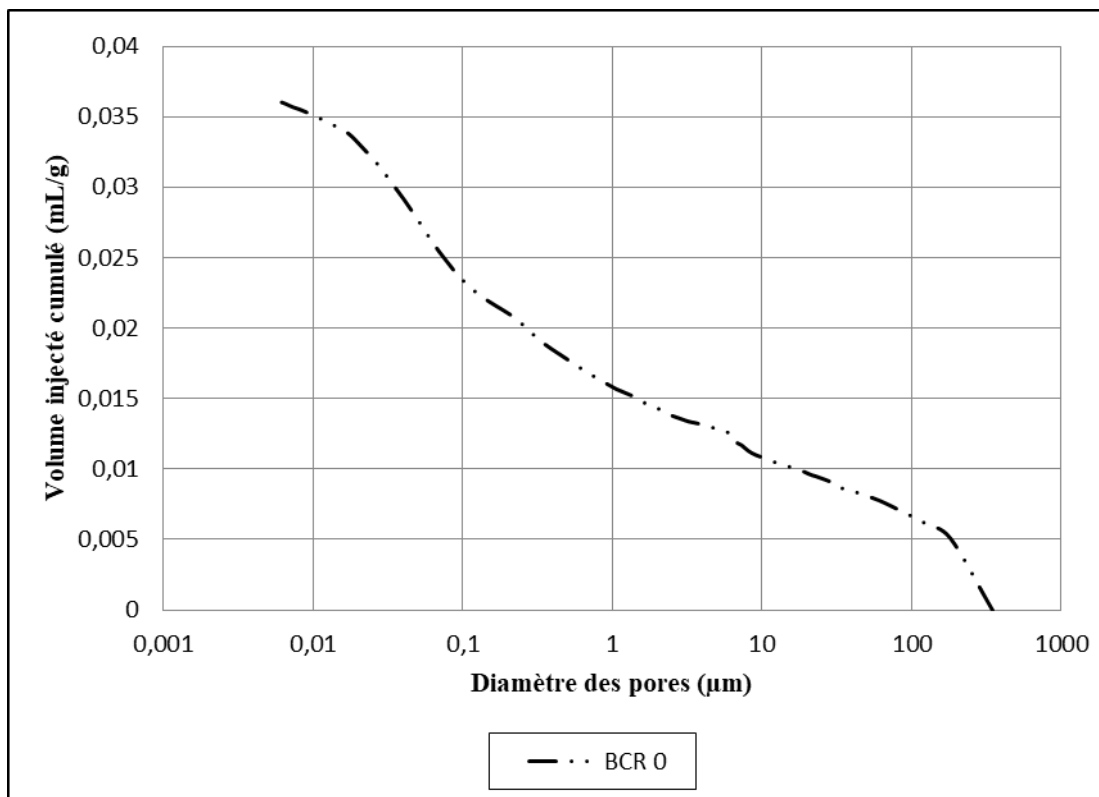


Figure V. 11 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 0.

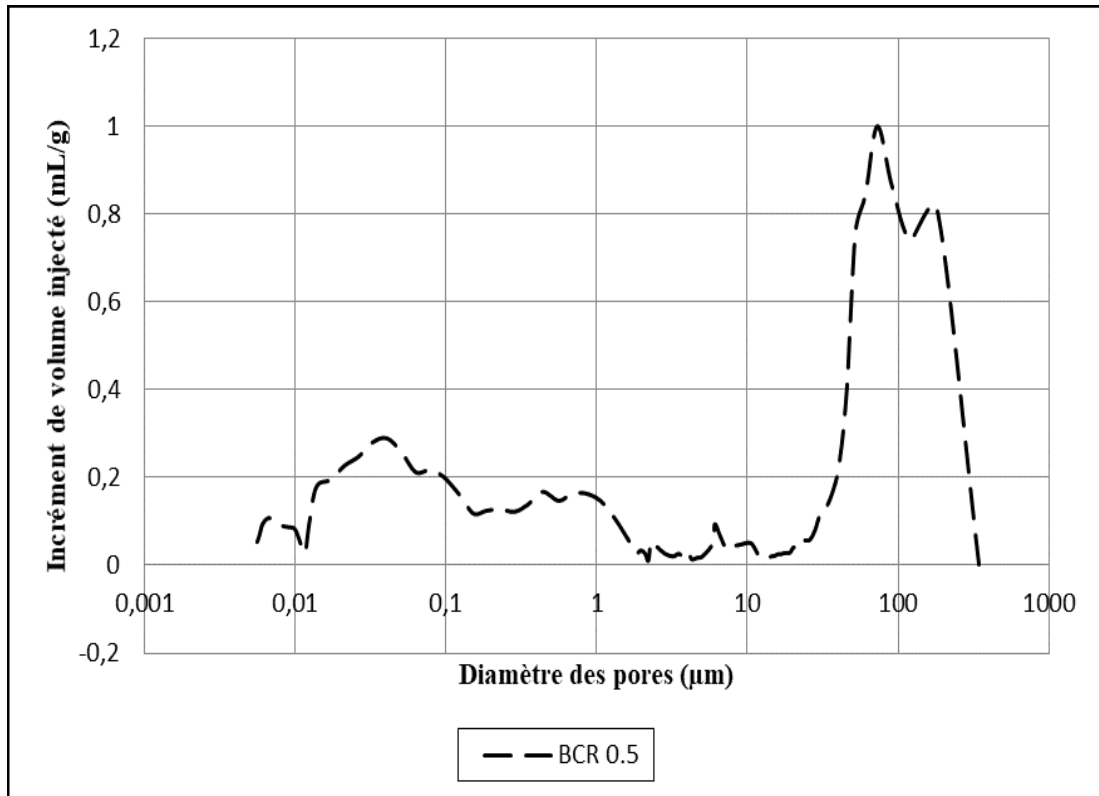


Figure V. 12 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 0,5.

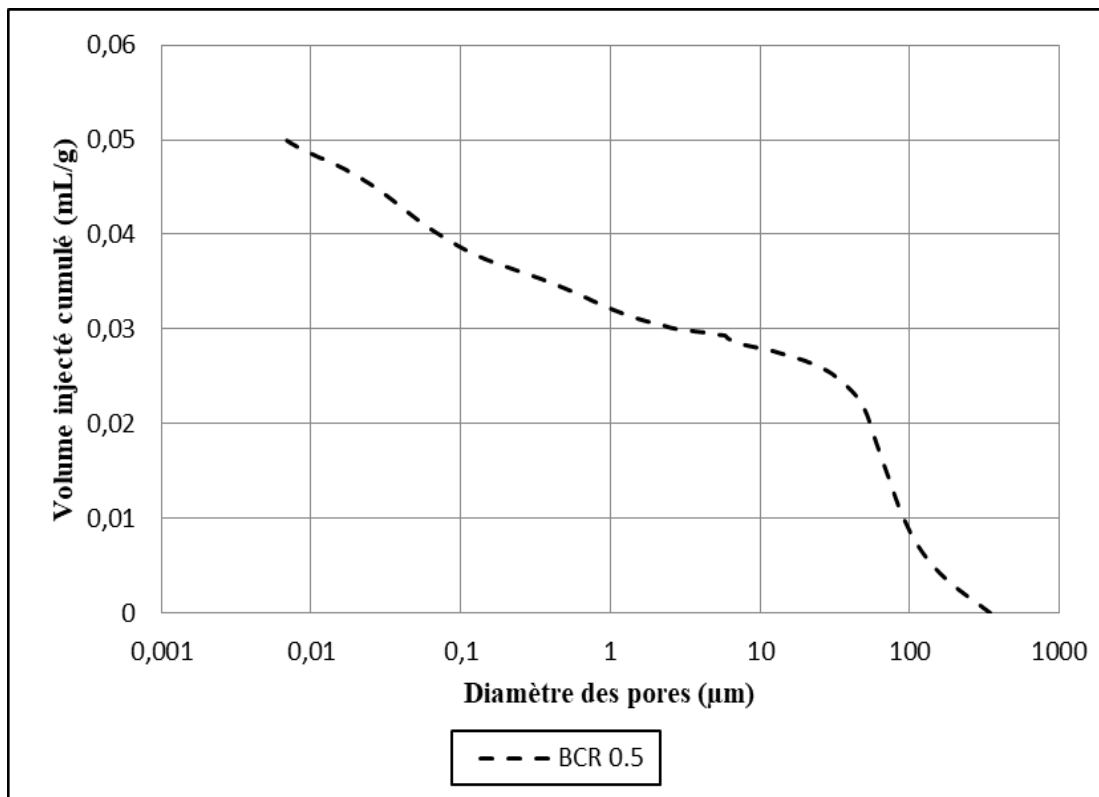


Figure V. 13 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 0,5.

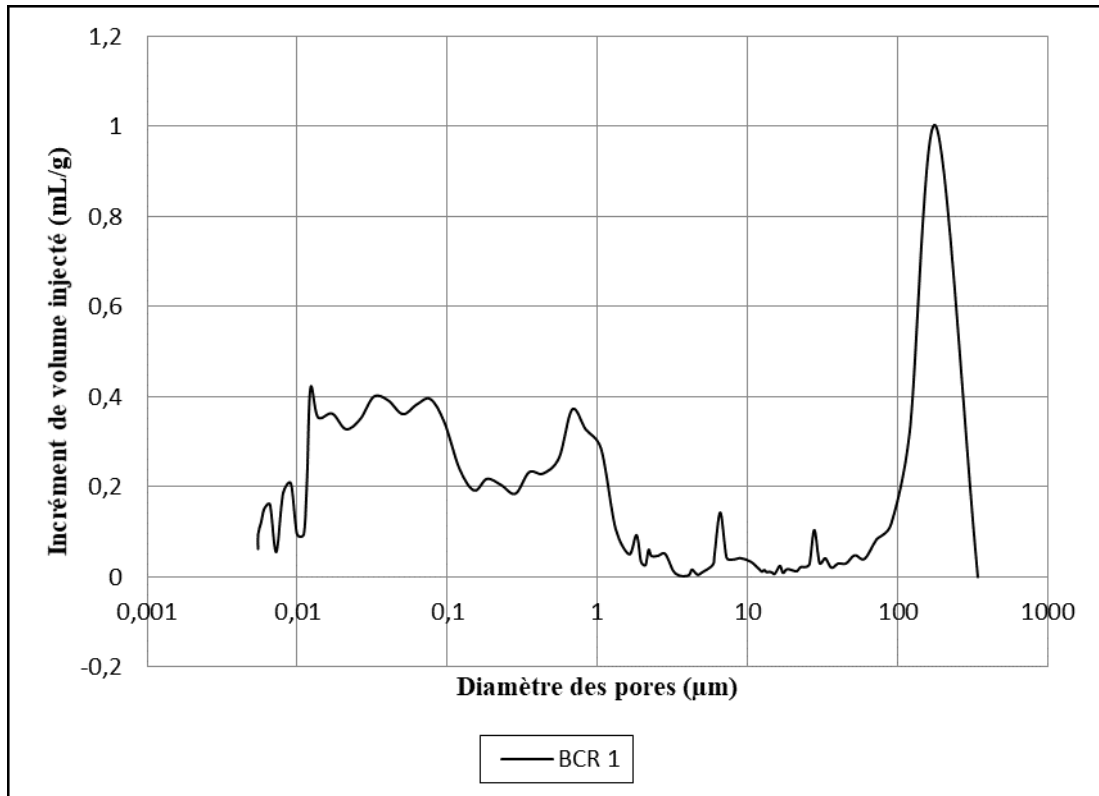


Figure V. 14 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 1.

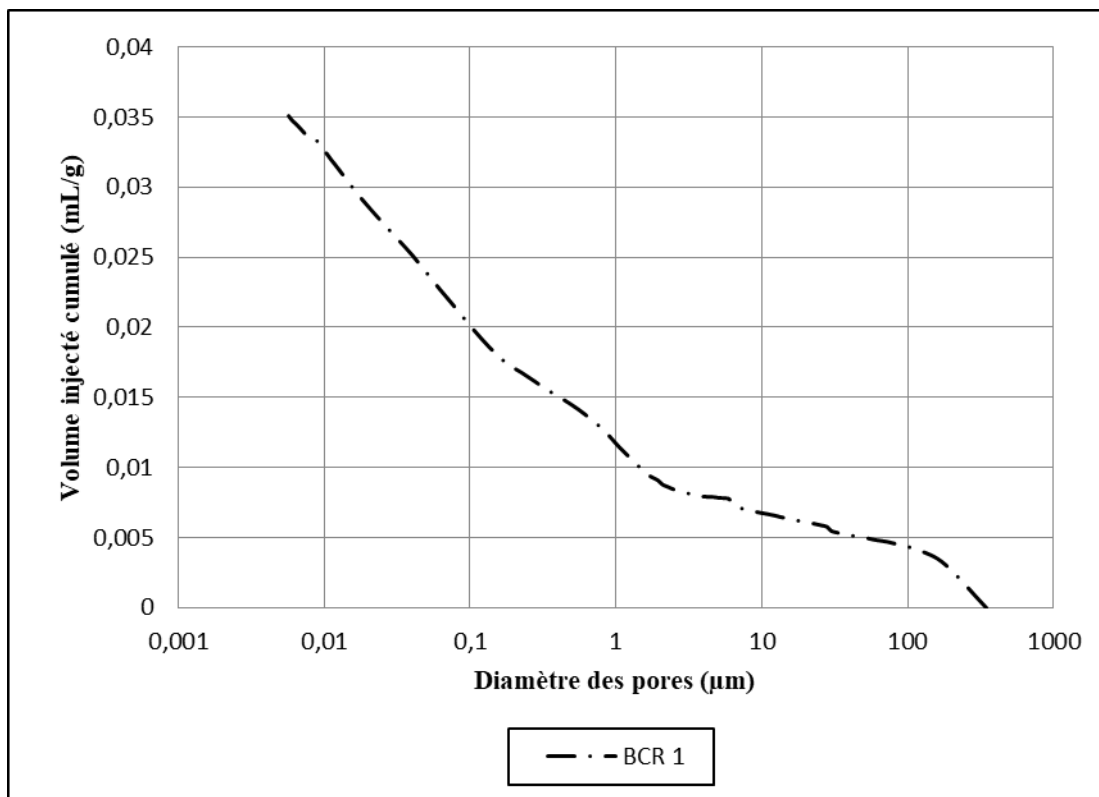


Figure V. 15 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 1.

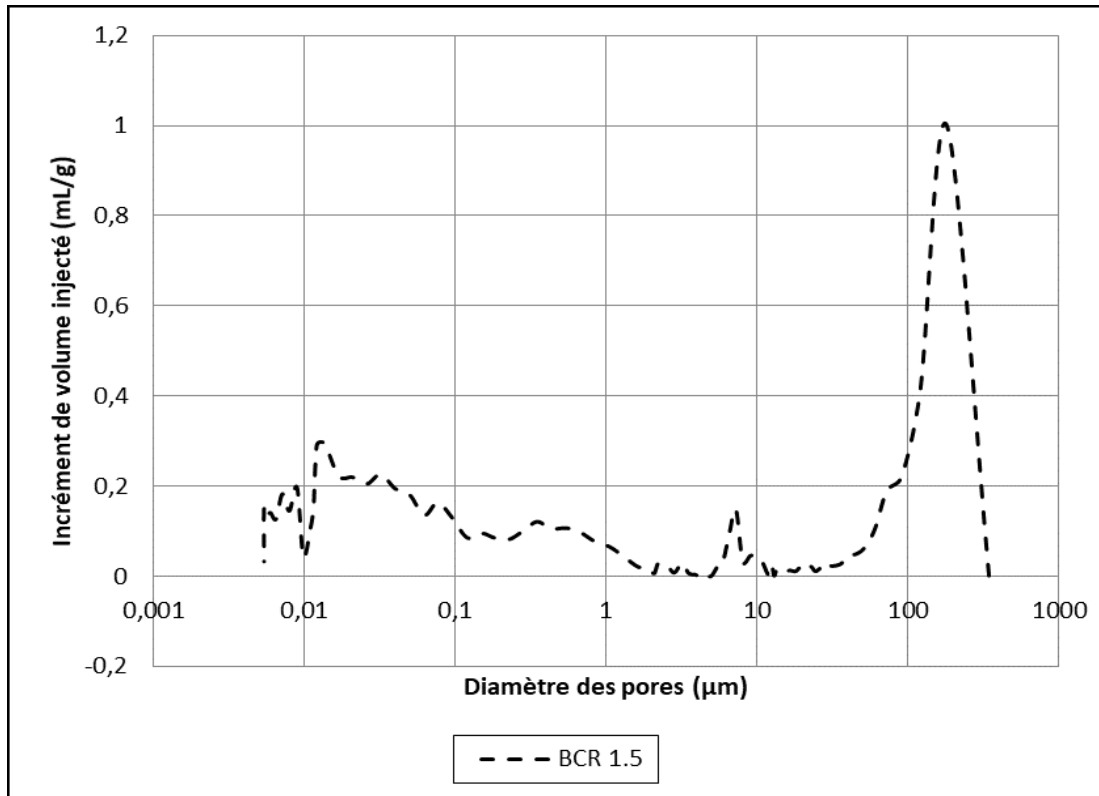


Figure V. 16 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 1,5.

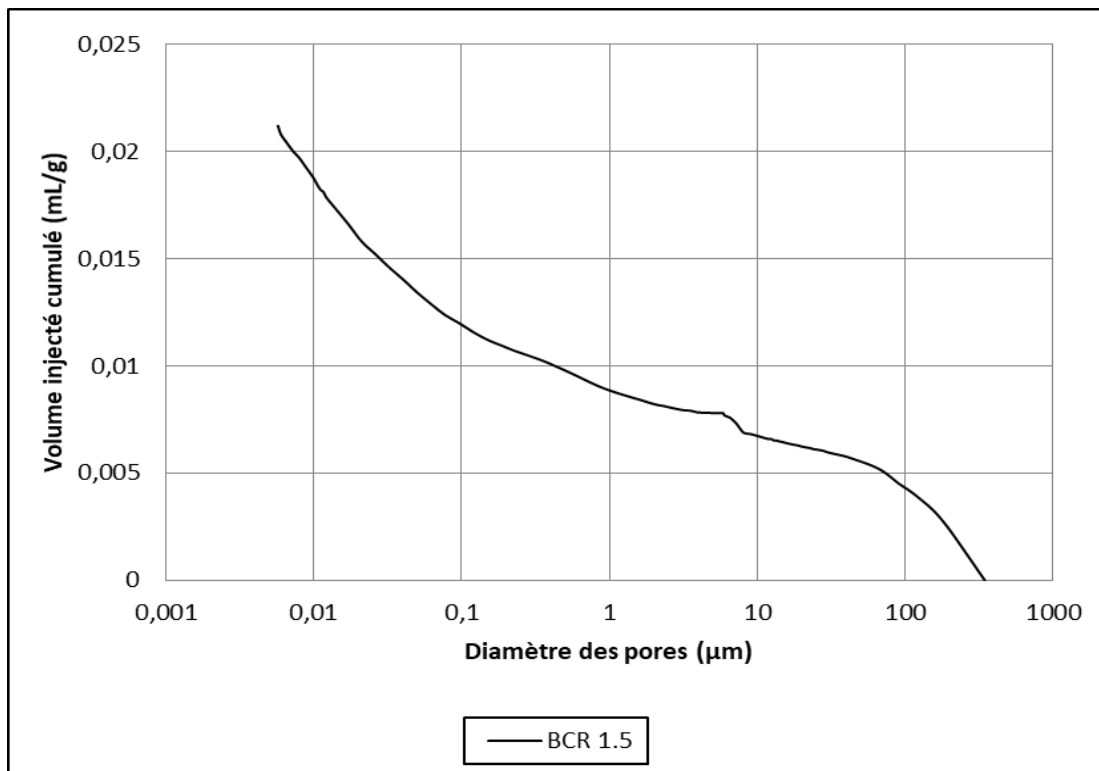


Figure V. 17 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 1,5.

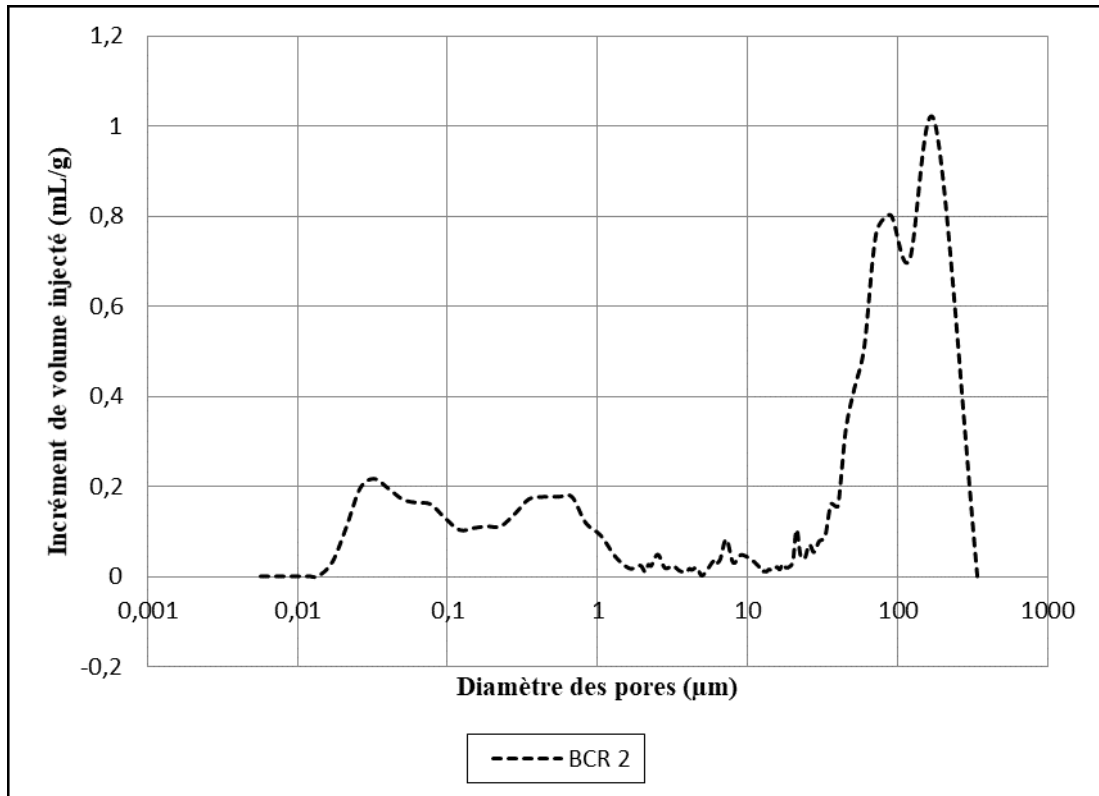


Figure V. 18 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 2.

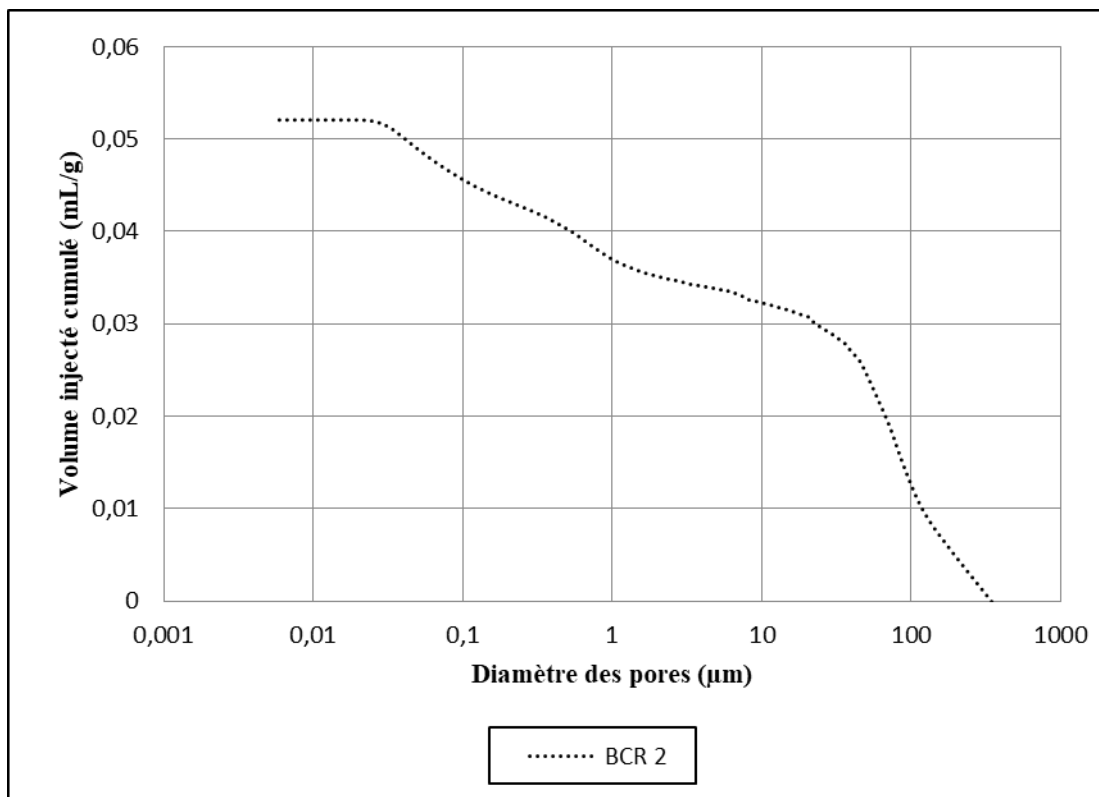


Figure V. 19 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 2.

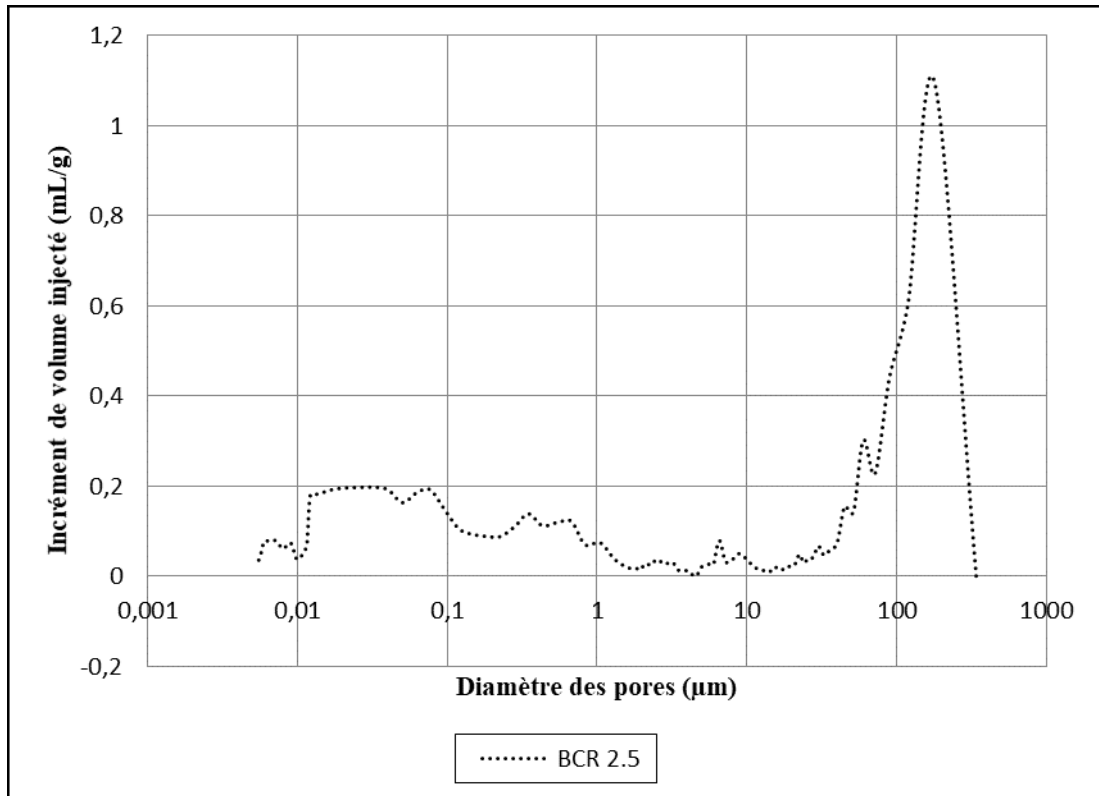


Figure V. 20 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores du BCR 2,5.

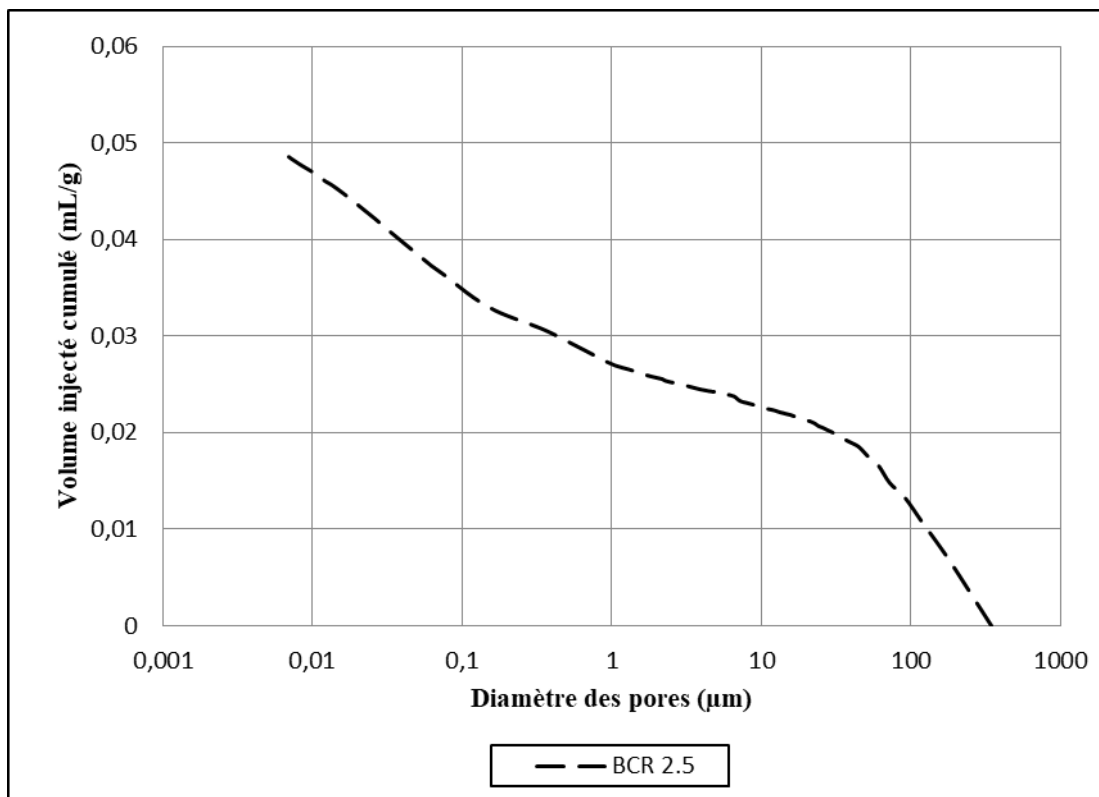


Figure V. 21 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores du BCR 2,5.

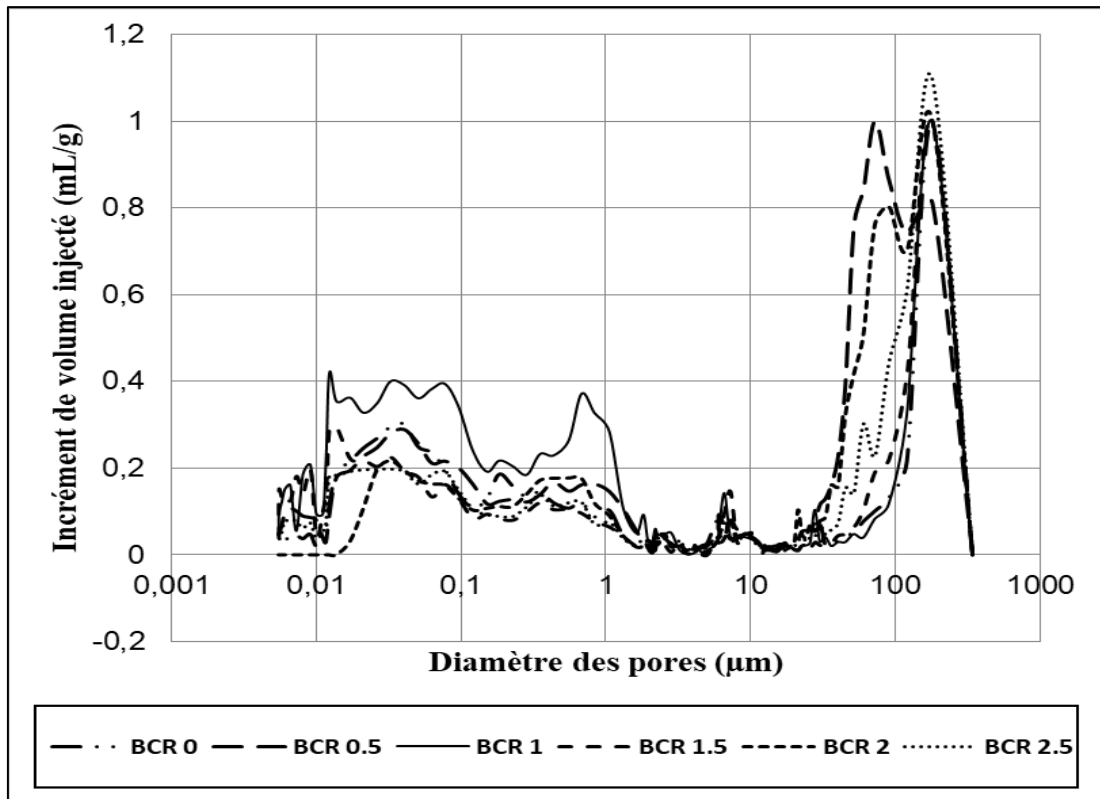


Figure V. 22 : Évolution des courbes d'incrément de volume de mercure injecté par le diamètre des pores des BCR cumulé.

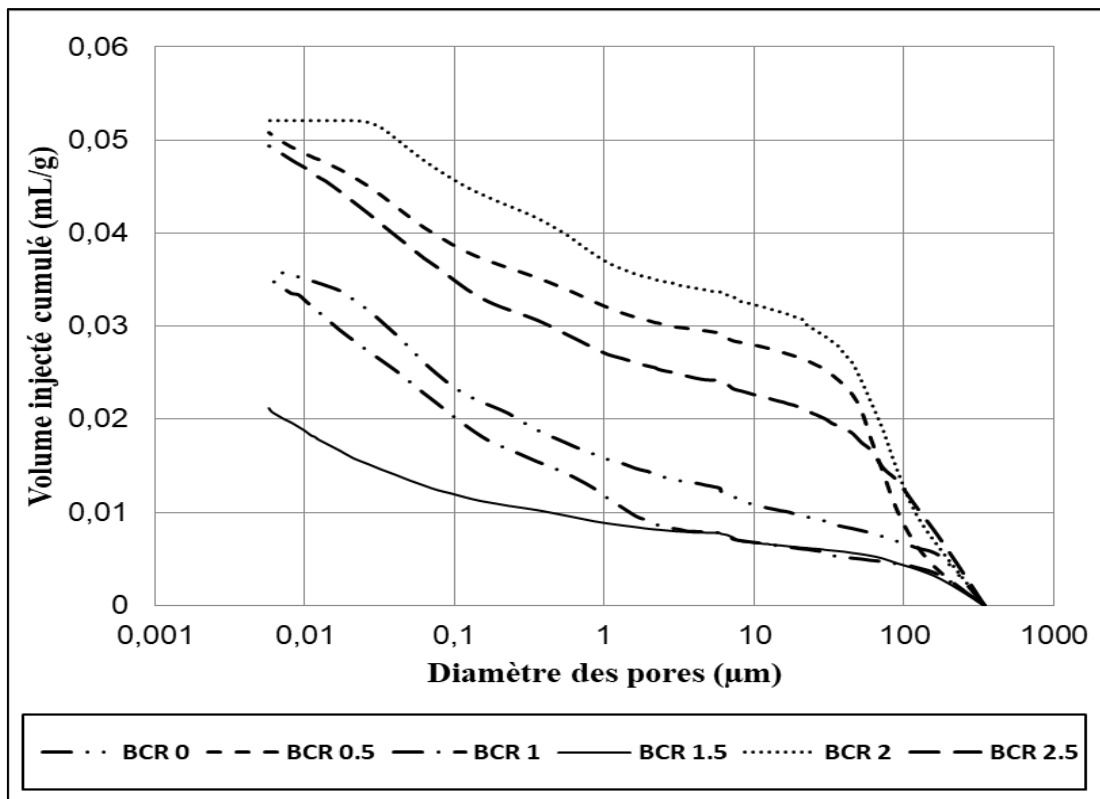


Figure V. 23 : Évolution des courbes de volume injecté cumulé par le diamètre des pores des BCR cumulé.

V.4.2 Répartition des pores

La figure V.24 présente le pourcentage des différents diamètres de pores selon le dosage des fibres. On remarque que la majorité des pores des BCRF se situe autour de macropores. Par contre, le BCR0 présente une structure poreuse uniformément répartie.

On peut remarquer une différence de distribution des pores entre les différents mélanges. La distribution aléatoire des pores ne permet pas de trouver une relation entre l'ajout de fibres et la structure poreuse des BCR.

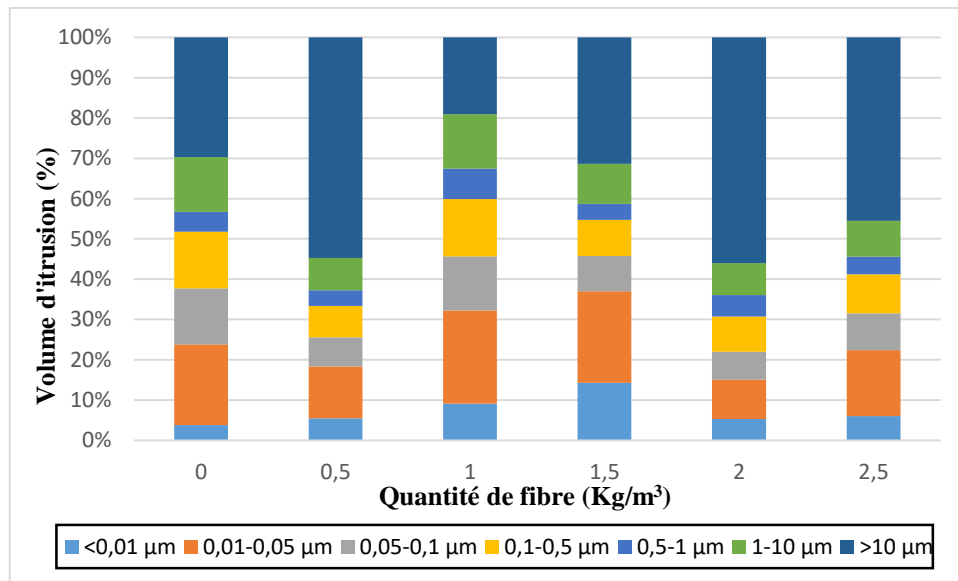


Figure V. 24 : Pourcentage des pores des différents mélanges.

V.5 LA RÉSISTANCE AUX ATTAQUES ACIDES

Dans ce paragraphe, la durabilité des BCR contenant les fibres polypropylène soumis une attaque d'acide sulfurique à différente concentration (3.5 et 5 %) a été discutée. Pour cela, on a effectué des essais de la variation de masse et la résistance à la compression sur les spécimens cubiques 10x10x10 cm³ après une conservation dans le milieu agressif pour une durée de 30 et 60 jours.

V.5.1 Variation de Masse

Les figures (V.25 et V.26) présentent le changement de masse des BCR renforcé avec des fibres polypropylènes sous deux concentrations d'acide sulfurique (3.5 et 5 %). Pendant les 30 premiers jours, on remarque que l'augmentation de taux des fibres dans le BCR engendre une diminution de la perte de masse. Les éprouvettes (BCR0 et BCR2.5) ont subi une perte de masse de 18 et 6 % respectivement à une concentration de 3.5 %. Les éprouvettes immergées

dans une concentration de 5 % présentent une forte diminution de masse égale à 39 et 14 % pour les mélanges BCR0 et BCR2.5 respectivement.

À 60 jours, la variation de masse a la même cinétique qu'à 30 jours de conservation avec un taux plus élevé surtout pour le BCR témoin (sans fibre).

À une concentration de 3.5 % de H_2SO_4 , on remarque que l'ajout de fibre influe sur la variation de la masse. En effet, la perte de masse est inversement proportionnelle avec le dosage de fibre polypropylène. Une grande partie des éprouvettes non renforcées par des fibres a fondu sous l'effet de la solution d'acide à 5 % de concentration.

L'acide sulfurique réagit beaucoup plus avec la matrice cimentaire, de ce fait la différence de la perte de masse est due principalement à la profondeur de pénétration des acides au sein des bétons. En effet, les bétons avec des taux élevés de fibres présentent une meilleure structure poreuse par rapport aux bétons sans fibres ce qui empêche la diffusion des acides à l'intérieur des BCR. D'autre part, la bonne résistance des polypropylènes vis-à-vis aux acides contribue à la bonne tenue des bétons renforcés par des fibres.

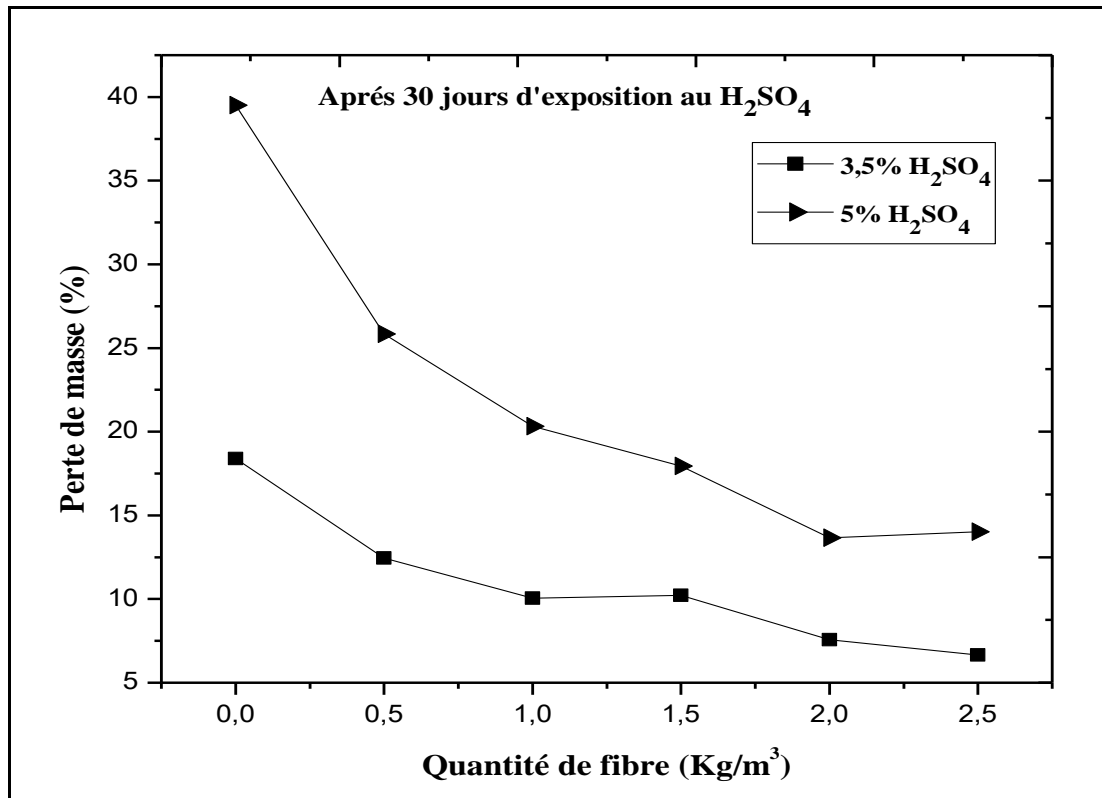


Figure V. 25 : Variation de la masse des BCR après 30 jours de conservation sous acide sulfurique.

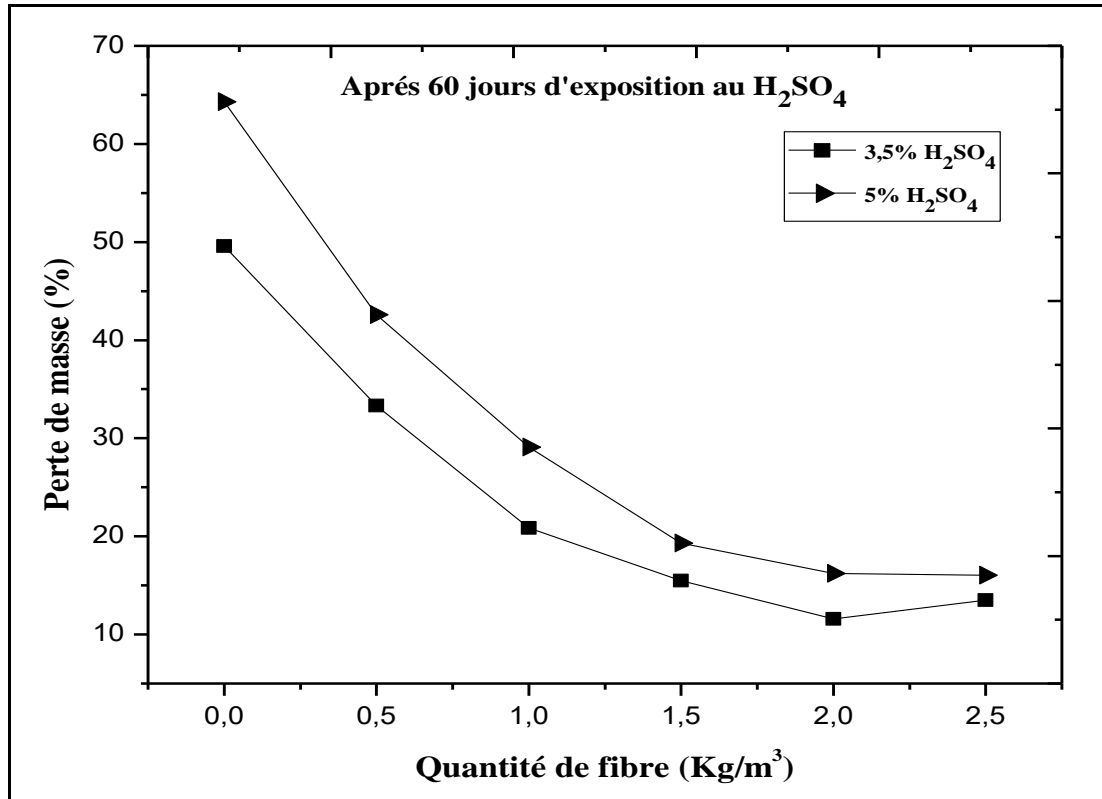


Figure V. 26 : Variation de la masse des BCR après 60 jours de conservation sous acide sulfurique.

V.5.2 La résistance à la compression

La figure V.27 présente la variation de la résistance à la compression résiduelle (R_{cr}) après 30 jours de conservation dans la solution de H₂SO₄. Pour une concentration de 3.5 %, on constate que les BCR (0, 0.5 et 1 kg/m³) ont subi une diminution de résistance de l'ordre de 6.11 %, 2.5 % et 3.5 % respectivement. Pour les BCR (1.5, 2 et 2.5 kg/m³), un bon comportement mécanique est remarqué vis-à-vis de l'attaque sulfurique ; les mélanges (1.5 et 2 kg/m³) ont maintenu leurs résistances initiales. Quant au BCR2.5, une augmentation de la résistance à la compression autour de 17 % a été constatée. Ces résultats peuvent être expliqués par les bonnes propriétés de transfert qu'offrent les fibres au béton. La pénétration de l'acide sulfurique est obstruée par la présence des fibres polypropylènes. De plus de la relation inversement proportionnelle entre le dosage des fibres et la porosité des BCR, le polypropylène présente une bonne résistance aux acides.

Pour une concentration de 5 %, on a remarqué que les mélanges présentent une diminution considérable de la résistance à la compression ; le mélange avec 2.5 kg/m³ de fibre présente une réduction de 16 %, alors que le mélange sans fibre donne une chute de 31 % de la résistance.

La figure V.28 montre la variation de la résistance à la compression résiduelle après 60 jours. Comparativement aux BCR conservés durant 30 jours, une diminution majeure de la résistance a été observée pour tous les mélanges.

Pour les deux concentrations, l'ajout de fibre polypropylène a été bénéfique pour la résistance. En effet, la diminution de la résistance du BCR 2.5 est de l'ordre de (13 et 21 % pour les concentrations 3.5 et 5 % respectivement), alors qu'une diminution de 57 % a été notée pour le BCR0 à une concentration de 3.5 %. Les éprouvettes sans fibres conservées dans une concentration de 5 % se sont décomposées d'une façon qui rend l'essai d'écrasement irréalisable.

Ces résultats sont en accord avec les différentes études présentes dans la littérature (Kamali, Gérard et al. 2003) (Viet-Hung Nguyen 2007), selon ces auteurs, la diminution des propriétés mécaniques de la zone affectée par l'attaque acide est due à la dissolution de la portlandite, de l'ettringite, des monosulfoaluminate et à la décalcification des CSH (Kamali S. 2003) (F. Adenot 1992).

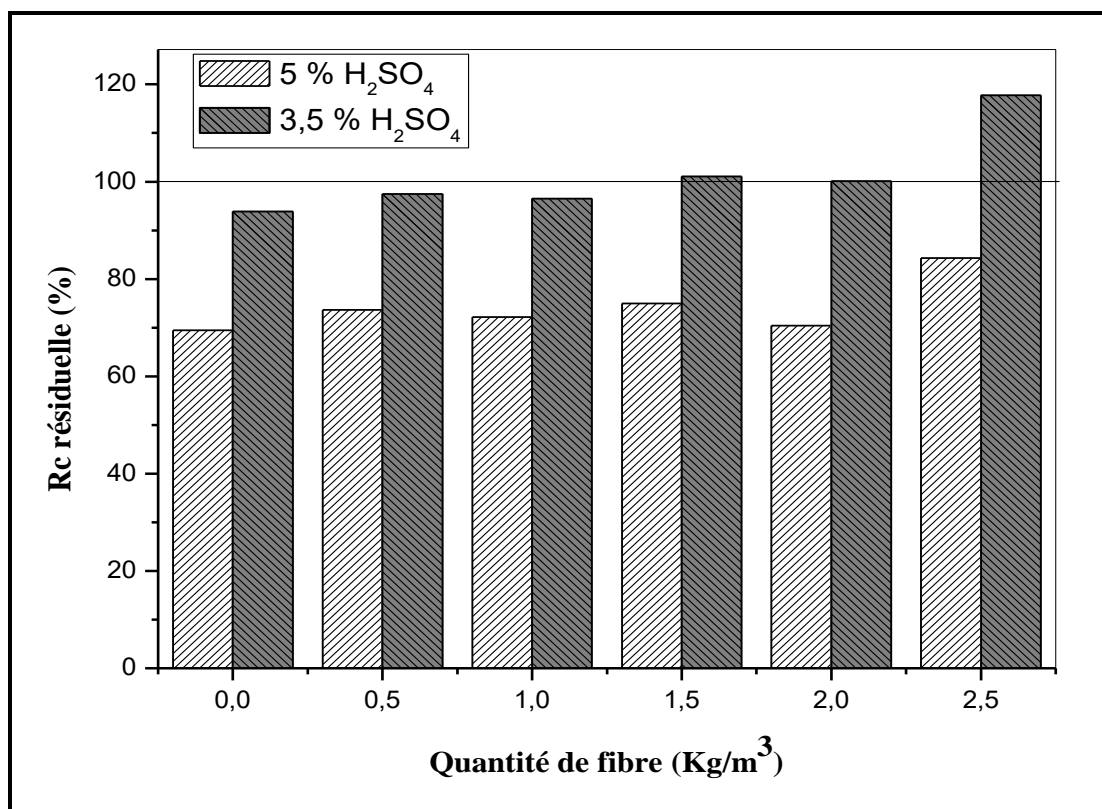


Figure V. 27 : Résistance à la compression résiduelle des BCR après 30 jours de conservation sous acide sulfurique.

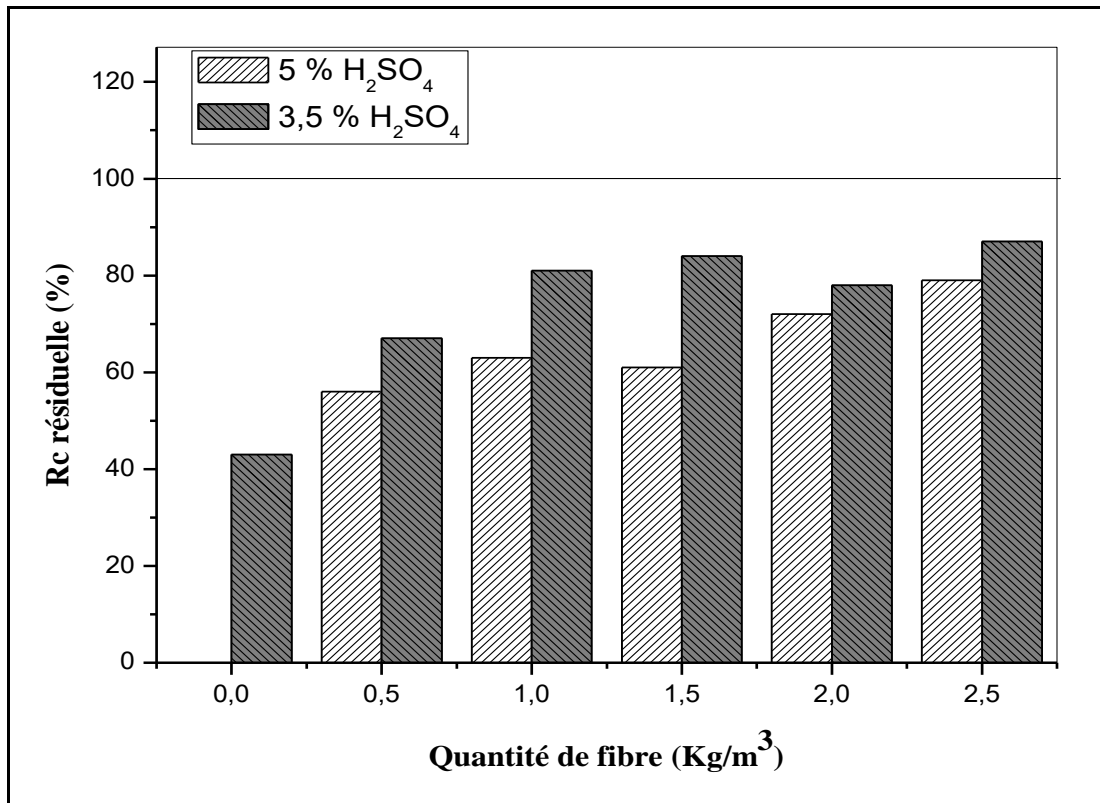


Figure V. 28 : Résistance à la compression résiduelle des BCR après 60 jours de conservation sous acide sulfurique.

V.5.2.1 Relation entre la perte de résistance à la compression et la perte de masse après attaque H₂SO₄

La figure V.29 illustre la relation entre la perte de résistance à la compression et la perte de masse en pourcentage des valeurs initiales avant immersion.

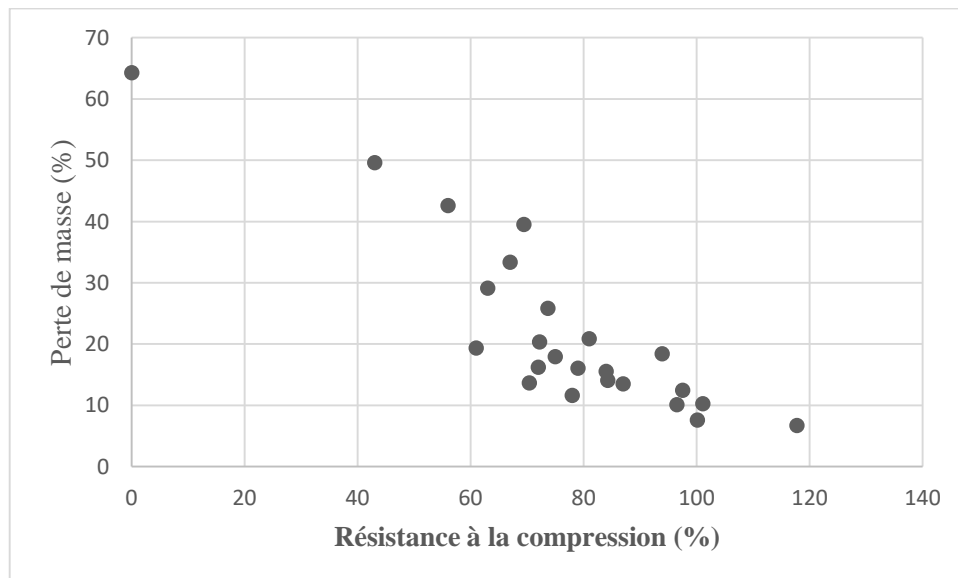


Figure V. 29 : Variation de la perte de résistance à la compression en fonction de la perte de masse.

Les résultats présentés sur la figure V.29 révèlent l'absence d'une relation directe entre la perte de résistance à la compression et la perte de masse des échantillons immergés dans la solution H₂SO₄. Cela peut être expliqué par la création d'une zone extérieure affectée non dégradée (zone de protection) avec de faibles performances mécaniques, permet de diminuer la perte de masse (Siad, Mesbah et al. 2010).

V.5.3 Diffraction au rayon X

Les analyses ont été effectuées sur des échantillons de BCR broyés à <63 µm et testés avec un diffractomètre à rayon X. Le but de cette analyse est d'avoir les éléments minéralogiques et la nature de la cristallisation de nos composants (amorphes ou cristallins).

Afin de voir l'effet de l'acide sulfurique (H₂SO₄) sur les BCR, on a effectué trois modes de conservations durant une période de 60 jours, on distingue :

- BCR conservé dans l'eau (témoin).
- BCR immergé dans une concentration de 3.5 % H₂SO₄.
- BCR mit dans une concentration de 5 % H₂SO₄.

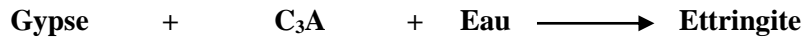
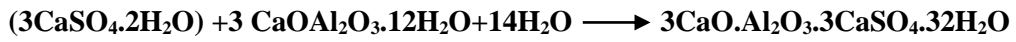
La figure V.30 présente le diffractogramme du BCR armé par des fibres polypropylènes (1 kg/m³ témoin) conservé dans l'eau. On observe les pics des cristaux de produits d'hydratation du ciment : C-S-H, portlandite.

La figure V.31 montre le diffractogramme du BCR renforcé par des fibres de polypropylènes (1 kg/m³) soumis à une attaque chimique (3.5 % H₂SO₄). Les pics révèlent que l'intensité de la portlandite a chuté, alors que la phase du gypse est apparue. Ce dernier est formé à la suite de la dissolution de la portlandite en Ca²⁺ et 2OH⁻ et de l'acide sulfurique H₂SO₄ en ions H⁺ et SO₄²⁻. La réaction s'est faite selon la formule :



Dans le diffractogramme du BCR renforcé par des fibres polypropylènes (1 kg/m³) conservés dans l'acide sulfurique (5 %) (figure V.32). L'intensité des pics montre que la portlandite a fortement diminué, ainsi que la phase du gypse a augmenté avec l'apparition de l'ettringite.

La présence de l'ettringite est expliquée par la réaction du gypse avec les C₃A. Ces derniers réagissent avec le gypse qui produit l'ettringite secondaire expansive suivant la réaction :



L'ettringite secondaire, de sa nature, est un élément très expansif dans la matrice cimentaire. En effet, la présence de cette particule provoque une expansion interne ce qui induit à une formation des fissures au sein du béton.

Les résultats obtenus par les diffractogrammes au rayon X confirment la variation de la résistance à la compression et la perte de masse des BCR attaqués par l'acide sulfurique (3.5 et 5 %).

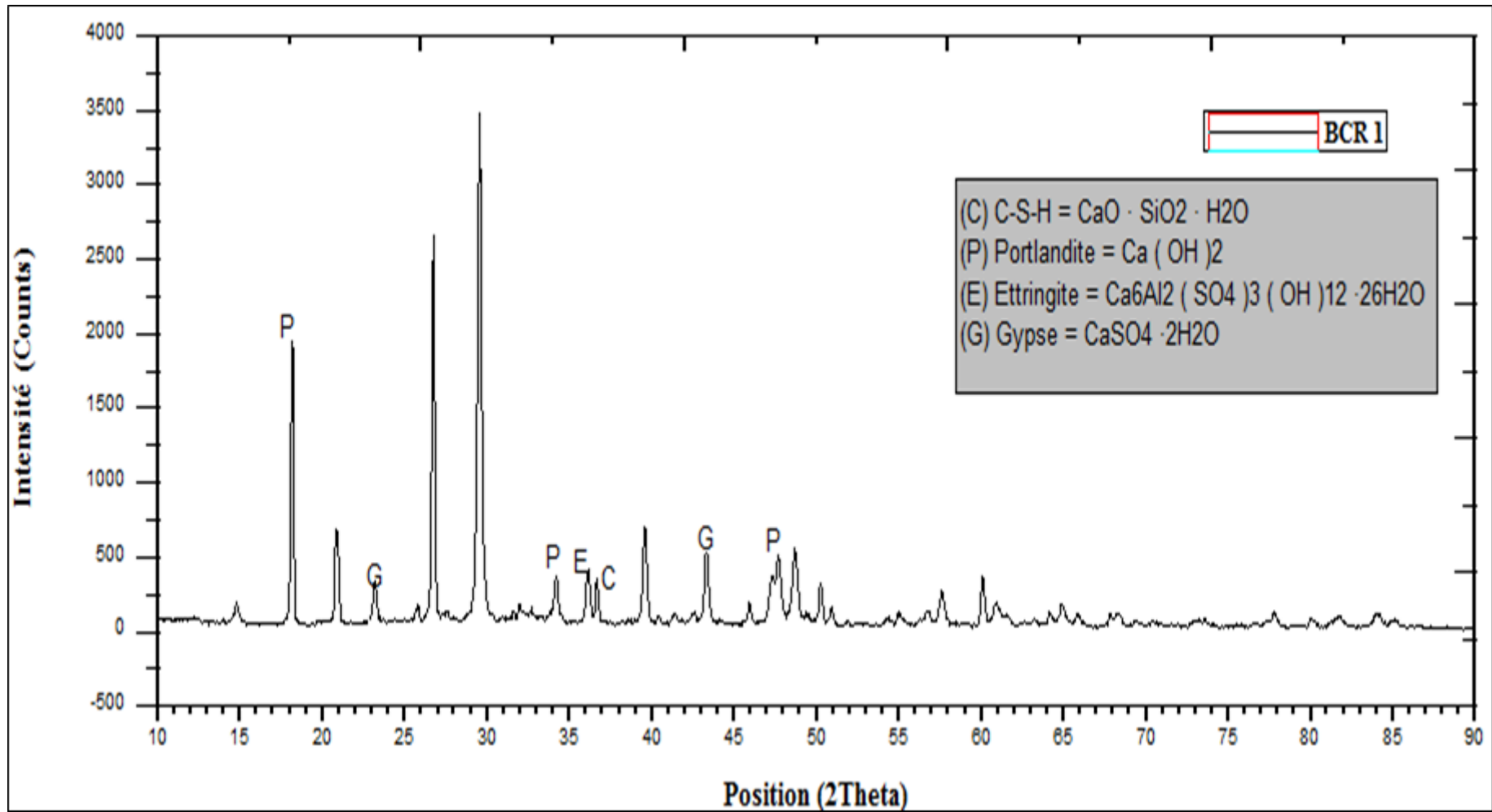


Figure V. 30 : Diagramme de diffraction X du BCR avec 1 kg/m³ de fibres PP.

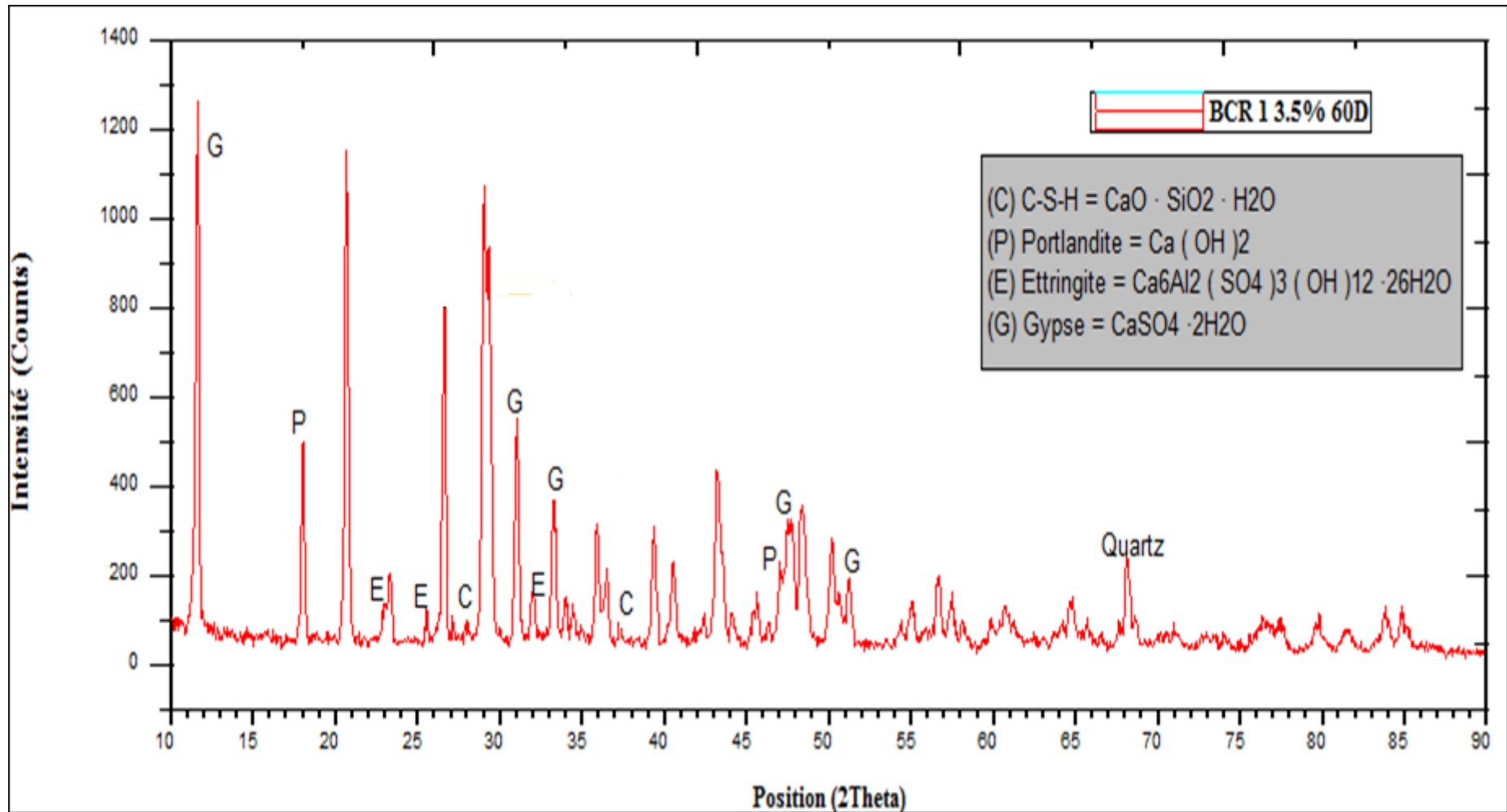


Figure V. 31 : Diagramme de diffraction X du BCR avec 1 kg/m³ de fibres PP immergé dans l'acide sulfurique 3.5 %.

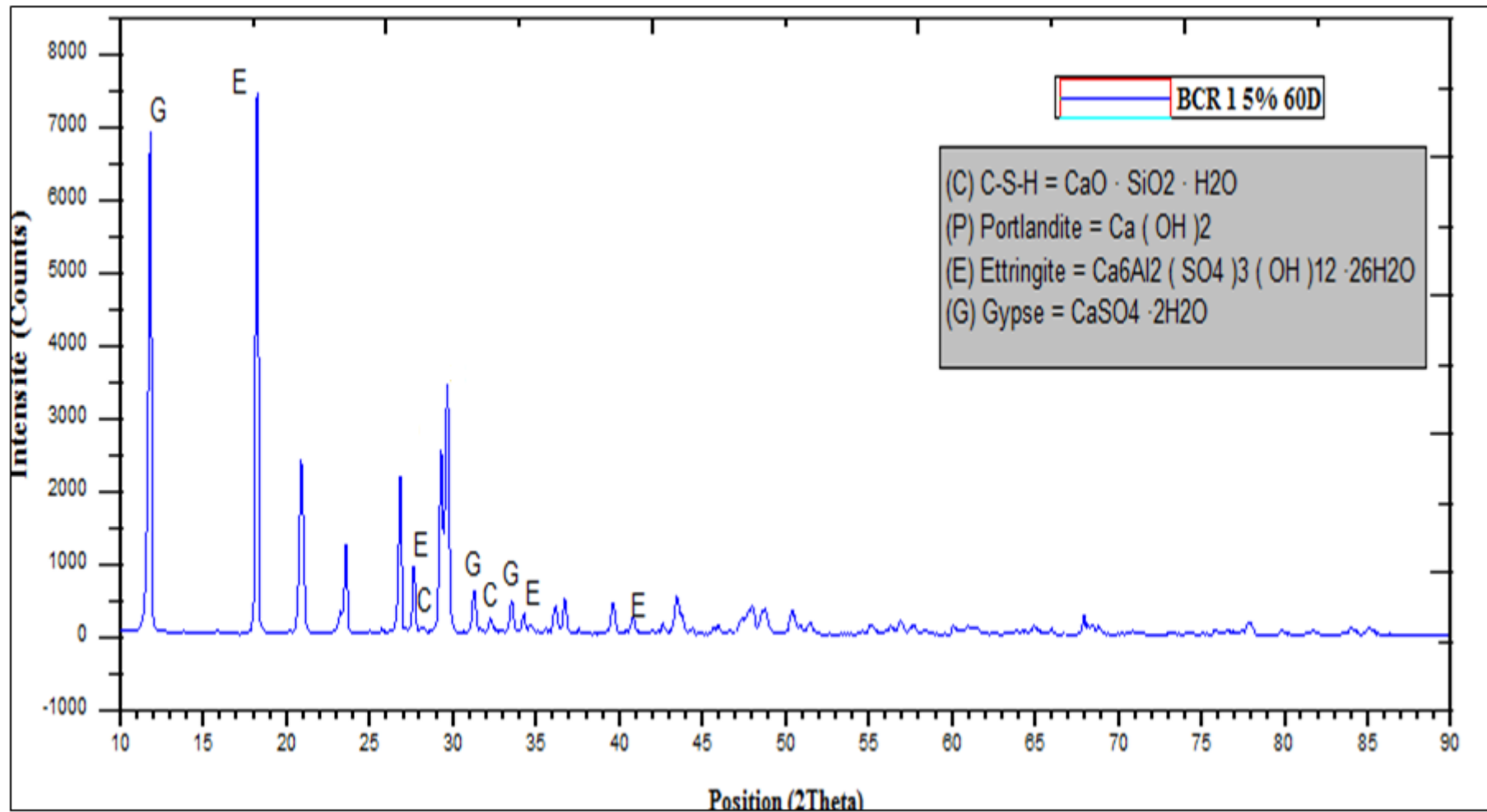


Figure V. 32 : Diagramme de diffraction X du BCR avec 1 kg/m³ de fibres PP immergé dans l'acide sulfurique 5 %.

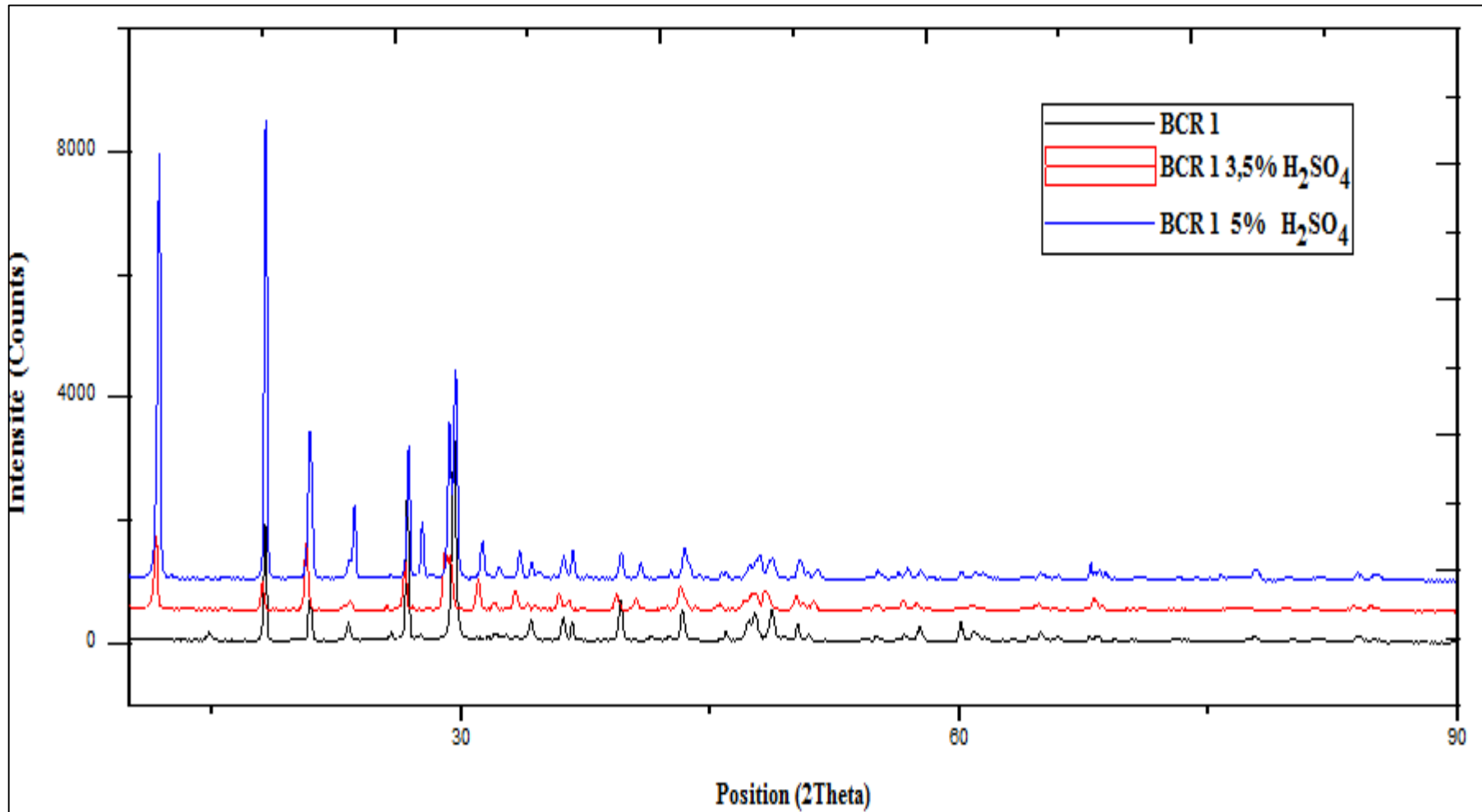


Figure V. 33 : Diagramme cumulé de diffraction X des BCR avec 1 kg/m³ de fibres PP.

V.5.4 Aspect visuel

Les matériaux cimentaires, après les réactions d'hydratation, ont une microstructure très complexe, contenant les C-S-H, les cristaux minéraux et des pores partiellement ou totalement occupés par l'eau. L'attaque sulfurique provoque une dégradation au sein des bétons (voir la figure V.34).



Figure V. 34 : Les observations visuelles des dégradations.

Un examen visuel a été réalisé afin d'évaluer les signes visibles de fissuration et d'effritement de la surface des échantillons après soumission à l'effet de l'acide sulfurique. En référence aux photos figure V.34, les échantillons des BCR0 présentent un endommagement plus conséquent par rapport au BCR renforcé par des fibres polypropylènes.

V.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a étudié le comportement des BCR renforcés par des fibres polypropylènes au niveau hydrique et durabilité. L'évaluation de la perméabilité et la porosité ont été effectuées afin d'estimer l'effet de dosage des fibres polypropylènes sur les propriétés de transfert. En second lieu, la résistance des BCR vis-à-vis l'attaque sulfurique H_2SO_4 a été suivie. Les principaux résultats obtenus montrent que :

Les fibres polypropylènes offrent au BCR une perméabilité et une porosité moins importante. Ces caractéristiques hydriques permettent au BCR renforcé par des fibres de mieux résister à l'attaque chimique (sulfurique).

CONCLUSION GENRALE

Le béton compacté au rouleau se distingue des autres béton par son faible taux de ciment et d'eau et par sa grande contenance en granulats. Les performances de ce béton sont obtenues principalement grâce à son squelette granulaire très dense. Une force de compactage exercé sur plusieurs couches offre également au béton une densité supplémentaire. Bien que ce béton soit déjà très utilisé dans le monde, néanmoins les BCR restent un domaine de recherche qui possède un fort potentiel de développement.

Le béton compacté au rouleau possède deux différentes approches, les BCR sont tous d'abord considérés comme des bétons par leurs constituants et comme des sols du point de vue de leurs aspects, procédure de mise en place et compactage. De ce fait, n'importe quelle étude consacrée à ce matériau doit prendre en compte les deux approches. Au cours de notre travail, on a analysé les BCR en tant que bétons à l'état frais et à l'état durci.

Le renforcement des bétons par des fibres est très fréquemment utilisé de nos jours, les améliorations et les perspectives qu'offrent ces renforts en ont fait un atout incontournable pour augmenter certaines caractéristiques des bétons. Les fibres polypropylènes représentent un renfort très appréciable chez les constructeurs pour leur facilité de mise en œuvre et leur disponibilité, elles sont fabriquées à partir de textile. L'utilisation de ce type de fibre, comme renforcement pour les bétons, a fait ses preuves par le passé. Par contre, leurs utilisations dans un béton routier comme le BCR est très limitées si ce n'est inexistant, leurs comportements dans ce genre de béton sont inconnus à ce jour. L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement de ces fibres en tant que renfort pour les BCR à plusieurs niveaux ; physique, mécanique, hydrique et durabilité.

Afin de caractériser les bétons compactés aux rouleaux, on a préparé plusieurs mélanges avec différentes quantités de fibres (0, 0.5, 1, 1.5, 2 et 2.5 kg/m³). La formulation utilisée lors de ce travail est basée sur les principes de la géotechnique (méthode empirique).

Afin d'aboutir aux objectifs fixés, on a divisé le programme expérimental en trois parties ; propriétés physiques, propriétés mécaniques, propriétés hydriques et durabilité des BCR. Les propriétés physiques ont à leurs tours été divisées en deux phases ; état frais et état durci.

À l'état frais :

Le BCR témoin (sans fibre) a donné une masse volumique élevée par rapport au BCR renforcé par des fibres polypropylènes. En effet, la masse volumique diminue proportionnellement avec l'ajout de fibre.

La mesure de la maniabilité par l'essai VEBE a révélé que l'ajout de fibres diminue la capacité du béton à être maniable. La confection des BCR pour route exige d'avoir un affaissement proche de 0, de ce fait, on peut conclure que le renforcement du béton par les fibres polypropylènes n'affecte en rien la mise en œuvre du BCR.

À l'état durci :

Les résultats de l'absorption capillaire indiquent que les fibres ont un effet positif sur les BCR. La valeur du coefficient d'absorption capillaire diminue proportionnellement avec le dosage des fibres. En revanche pour les BCR avec une quantité élevée de fibres, une légère augmentation a été remarquée.

Les bétons compactés au rouleau routier sont susceptibles à l'élévation de la température ce qui provoque un taux de retrait thermique important.

L'ajout des fibres polypropylènes a donné des résultats très positifs. En effet, le BCR témoin a un retrait plus élevé par rapport au BCR renforcé par des fibres. On a constaté que la cinétique du retrait des bétons renforcés par des fibres ralentit à 7 jours alors que le BCR témoin continue jusqu'à 14 jours.

Pour les performances mécaniques ; la résistance à la compression, la traction par flexion et la traction par fendage ont été suivies.

La présence des fibres à faible pourcentage dans les BCR a montré une bonne résistance à la compression. Par contre, les BCR contenant des taux élevés (au-delà de 1 kg/m³) des fibres polypropylènes ont indiqué une diminution de la résistance à la compression.

Concernant la traction par flexion et par fendage, les BCR renforcés par des fibres polypropylènes présentent une meilleure résistance par rapport au BCR témoin. Les BCRF sont plus ductiles que le BCR témoin.

Concernant les propriétés de transfert des BCR, on a réalisé des essais de perméabilité, degré de pénétration et de la porosité au mercure. En effet, les BCRF ont montré que la perméabilité et le degré de pénétration diminuent par rapport au BCR témoin. Cette diminution est expliquée par l'effet des fibres sur le réseau poreux des bétons.

Les résultats de la porosité au mercure montrent que l'ajout de fibre polypropylène diminue la porosité particulièrement pour les 0.5, 1 et 1.5 kg/m³. À des taux de 2 et 2.5 kg/m³, une augmentation de la porosité a été constatée. Cela est expliqué par l'agglomération des fibres produisant des porosités supplémentaires.

Pour le comportement des BCR vis-à-vis à la durabilité, on a étudié l'effet de l'agressivité de l'acide sulfurique sur ces bétons.

Les résultats montrent que le BCR témoin se dégrade fortement durant la conservation dans H₂SO₄, alors que les BCRF résistent mieux à ce milieu. Cette dégradation est représentée par les valeurs de la résistance à la compression et la perte de masse.

La diffraction au rayon X explique le mécanisme de dégradation par l'acide sulfurique. L'apparition de l'ettringite secondaire confirme la chute de résistance et la perte de masse.

Du point de vue de la performance, le BCR offre des propriétés intéressantes pour la construction des routes. Le renforcement de ce matériau par des fibres polypropylènes représente une solution efficace pour améliorer ces caractéristiques. De plus, l'incorporation des fibres dans le BCR est facile à réaliser. Cependant, les fibres polypropylènes doivent être ajoutées avec modération pour éviter un effet négatif pouvant engendrer une baisse des performances.

Finalement, on peut conclure que l'utilisation de fibres polypropylènes dans les BCR à un dosage de 1 kg/m³ procure un meilleur comportement. Néanmoins, un excès de ces fibres peut engendrer une diminution de performances.

Perspectives

Le présent travail a étudié le comportement d'un BCR renforcé par des fibres synthétiques (polypropylène). Cependant, plusieurs facettes de ce béton, en présence des fibres ou sans, reste inexplorées. Les avantages cités ou obtenus de ce travail montrent que le BCR possède des caractéristiques qui lui permettent de dépasser le bitume en application de chaussées. Cependant, plusieurs recherches peuvent être réalisées afin d'améliorer d'avantages ce matériau. Dans la continuité de ce travail, on peut recommander quelques perspectives de

travaux d'avenir à entreprendre tel que :

- Étudier le comportement des BCR à la fatigue.
- Étudier la possibilité d'incorporation d'un entraîneur d'air pour pallier au gel dégel.
- Solliciter les BCR à plusieurs milieux agressifs autres que l'acide sulfurique.
- Étudier l'effet de la longueur des fibres polypropylènes sur les BCR.
- Étudier la possibilité d'incorporer de nouveaux types de fibres (verres, carbone, végétal...) au BCR.
- Enfin, une étude à long terme sur des routes en BCR renforcé par des fibres en pleins services est primordiale pour valider définitivement les performances de ce béton comme matériaux de pavages.

RÉFÉRENCES

AASHTO-T277-93 (1994). "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride." American Association of State Highway and Transportation Officials.

Abderrachid Amriou, M. B. (2017). "New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by a lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece." *Construction and Building Materials*: 642–649.

ABSI, E. (1994). « Béton de fibres, synthèse des études et recherches réalisées au CEBTP. » *Annales de l'ITBTP N°520*.

ACI-325.10R-95 (1995). "State-of-the-art report on rollercompacted concrete pavements." *Manual of concrete practice, ACI manual of concrete practice, ACI, USA*,: 32.

ACI Comimittee (2001). "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001)." *ACI Materials Journal, (Reapproved)*.

AFPC-AFREM. (1997). « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. » *Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons »*, Toulouse.

Anderson (1986). "Roller Compacted pavements- Physical Properties, CBI report No. Ra 3:86." *Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden*: 18-24.

AS-1012.8 (2015). "Methods of making and curing concrete—Mortar and grout specimens." *AUSTRALIAN STANDARD*.

ASTM-C39/C39M-11a (2011). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*.

ASTM-C157 (1999). "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete." *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*: 1-7.

ASTM-C293 (2010). "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C496 (2011). "Standard tensile test method for splitting for splitting strength of cylindrical concrete specimens." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C1170/C1170M-08 (2008). "Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller compacted Concrete Using has Vibrating Table." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C1176/C1176M-08 (2008). "Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C1585-13 (2013). "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C-267 (1998). "Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars , Grouts , and Monolithic." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: 1-6.

ASTM-C-1435-99 (1999). "Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-D1557-07 (2007). "Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort Standards " AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

BaCaRa, P. N. (1996). « Le béton compacté au rouleau. » Presse ENPC, Paris: 17-25.

BALAGURU, P. (1994). "fiber Reinforced Concrete for structural Components." A state of art, Workshop on Fiber Reinforced cement & concrete Sheffield, U.K.

BALAGURU, P., & RAMAKRISHNAN, V (1987). "Comparison of Slump Cone and V-B tests as measures of workability for fiber-reinforced and plain concrete." cement Concrete Aggregate revue 9(1): 3-11.

Banthia, N. and R. Gupta (2006). "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete." Cement and Concrete Research 36(7): 1263-1267.

Bassuoni, M. T. a. N., M. L. (2009). "Durability of self-consolidating concrete to different exposure regimes of sodium sulfate attack." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 42(8): 1039-1057.

BEDDAR, M. (2007). « Etude de la faisabilité d'utiliser un béton renforcé de fibres à base de déchets métalliques. » Université Hadj Lakhdar Batna.

Behnood, A. and M. Ghandehari (2009). "Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures." *Fire Safety Journal* 44(8): 1015-1022.

Benouadah, A., M. Beddar and A. Meddah (2017). "Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber." *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9(2): 623.

BENTUR, A. e. a. (1985). "Pull-out Processes in Steel Fibre Reinforced Cement." *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 7(1): 29-37.

Berga, L., Buil, J. Jofre, C., Chongand, S (2003). "Roller Compacted Concrete Dams." In *Proceedings of the fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) dams*.

BIJEN, J. (1983). "Durability of Some Glass Fiber Cement Composites." *American Concrete Institute , Proceeding* 80(12).

British-Standard-European-Norme.BS-12390-8 (2009). Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure.

CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT (2005). "Comparison of the permeability to water of the concrete compacted with roller (RCC) and of a mixture of conventional concrete."

Choi, Y.-K. H., K.D (2005). "RCC/Soil-Cement: What's the Difference?" *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(4): 371–378.

CT, G. o. e. e. g. (2014). *Des bétons prêts à l'emploi innovants Partie 2 (*) : le béton renforcé de fibres*. L. D. d. CSTC.

DAVE, N. J. E., D.G. (1979). « Polypropylène fibre reinforced cement. » International Journal of cement composites 1: 19-28.

DEBICKI, G., et al ; (1990). "Fibrous Concrete, sensitivity of workability to percentage and type of fiber." Symposium Proceedings Boston, U.S.A, Edited by Sidney Mindess & Jan Skalny 11: 127-132.

Debieb, F., L. Courard, S. Kenai and R. Degeimbre (2009). "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates." Construction and Building Materials 23(11): 3382-3387.

Dreux G., F. J. (1998). « Nouveau guide du béton. » Eyrolles édition, France 1995. RILEM TC 107-CSP. Measurement of time-dependent strains of concrete; Materials and structure.

ERES, C. (1998). "Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures." étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.

F. Adenot, M. B. (1992). "MODELLING OF THE CORROSION OF THE CEMENT PASTE BY DEIONIZED WATER." CEMENT and CONCRETE RESEARCH 22: 489-496.

Forbes, B. B. a. B. A. (2007). A High RCC Dam with Low Grade Aggregates. 5th International Symposium on RCC Dams.

FORDYCE, M. W. W., R.G (1983). "Glass fiber reinforcement for Portland cement." Butterworthan Co., Publisher Ltd.

GAGNÉ, R. (2000). "High-performance roller-compact concrete for pavement - Mixture design, application and durability." International symposium on engineering materials for sustainable development, Okayama, Japon: 74-88.

Gagné, R. (2004). « Le Béton Compacté au Rouleau BCR, présentation PowerPoint. » Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.

Gauthier P, M. (2004). « Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. » Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.

Gauthier P., M. J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M. (2000). « Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtement en béton compacté au rouleau. » Centre de recherche

interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.

Gossia, U. (2006). "Flat ceilings made of steel fiber concrete." *Beton-und Stahlbetonbau* 101(2): 94-102.

Harrington, D. e. a. (2010). "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report,." National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University.

Hsie M, T. C. a. S. P. (2008). "Mechanical properties of polypropylene hybrid fibre-reinforced concrete." *Material Science and Engineering A*(494): 153-157.

Huang, Y. H. (2004). "Pavement Analysis and Design Second Edition." University of Kentucky.

J. Marchand, R. G., E. Ouellet and S. Lepage (1997). " Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete-A Review." *ACI Special Publication* 171.

Jeuffroy G, S. (1989). « Cours de routes, Chaussée en béton de ciment. » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France: 81-107.

Jiang, C., K. Fan, F. Wu and D. Chen (2014). "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete." *Materials & Design* 58: 187-193.

Jianzhuang, X., H. Falkner (2007). "Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars." *Construction and Building Materials* 21(2): 395-401.

JOHNSTON, C. D. (1996). "Steel fibre reinforced mortar and concrete : a review of mechanical properties." *A.C.I. International symposium*: 127- 142.

JOHSTON, C. D. (1974). "Steel fiber reinforced mortar and Concrete: a review of mechanical properties." *International symposium* 127-142.

K. Beck, M. A.-M., O. Rozenbaum (2003). « Pierres des Monuments Historiques : Caractérisations et mécanismes d'altération du tuffeau. » *AFGC* 26(27): 1-16.

Kakooei, S. A., Hazizan Md Jamshidi, Morteza Rouhi, Jalal (2012). "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures." *Construction and Building Materials* 27(1): 73-77.

Kamali, S., B. Gérard and M. Moranville (2003). "Modelling the leaching kinetics of cement-based materials—influence of materials and environment." *Cement and Concrete Composites* 25(4-5): 451-458.

Kamali S. (2003). *Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan.*

Karimpour, A. (2010). "Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS)." *Construction and Building Materials* 24(11): 2079-2083.

KENCHEL, H. S., S. (1985). « Applications de polypropylène fibres in Scandinavia. » *Concrete international design and construction* 7(3): 32-34.

Kokubu, K., Cabrera, J.. & Uenoa, A (2004). "Compaction Properties of Roller Compacted Concrete." *Journal of Cement and Concrete Composites*: 109–117.

LANDAU, E. A. (1986). "A practical approach to the use of synthetic fibres in concrete." *RILEM Symp*, Edited by R.N. Swamy, et al Sheffield 6(7): 13-17.

Loosveldt H, L. Z., Skoczylas F (2002). "Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar." *Cement and Concrete Research* 32(9): 1357–1363.

M.H.HarajliD.MaaloufH.Khatib (1995). "Effect of fibers on the punching shear strength of slab-column connections." *Cement and Concrete Composites* 17(2): 161-170.

Madhkhan, M., R. Azizkhani and M. E. Toriki Harchegani (2012). "Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements." *Construction and Building Materials* 26(1): 102-112.

MAJUMDAR, A. J. (1979). "Properties of fiber cement composite." *RILEM, Neville (A), 120 Communication 7.1*,: 279-313.

MEDDAH, A. (2015). Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques, École Nationale Polytechnique d'Alger.

Meddah, A., M. Beddar and A. Bali (2014). "Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement." *Journal of Cleaner Production* 72: 187-192.

Meddah, A., H. Bensaci, M. Beddar and A. Bali (2017). "Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement." *Innovative Infrastructure Solutions* 2(1).

Miloud, B. (2005). "PERMEABILITY AND POROSITY CHARACTERISTICS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE." *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)* 6(4): 317-330.

MIMOUNE, M. (1994). « Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de construction. » *Revue Algérie Equipement*, N°15: 2-7.

Nanni A, J. A. (1989). "RCC pavement reinforced with steel fibers." *Concr Int Des Constr* 11(3): 64-69.

Neocleous, K., H. Angelakopoulos, K. Pilakoutas and M. Guadagnini (2011). "Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* 164(2): 97-109.

Norbert Delatte, N. A., and Chris Storey (2003). *Improved Management of RCC Pavement Technology*, The University of Alabama at Birmingham.

Pei, M., D. Wang, X. Hu, Y. Zhao, Y. Xu, J. Wu and D. Xu (2004). "Performance characteristics of subdenier monofilament polypropylene fiber reinforced mortars." *Journal of Applied Polymer Science* 94(6): 2251-2256.

Pittman, D. W. (1989). "The Effects of the Construction Process on Selected Fresh and Hardened Properties of Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements." *ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB.*

Quoc Tri Phung, e. a. (2013). "Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method." *Construction and Building Materials*: 1488–1496.

R.D. Tolêdo Filhoa, M. A. S. (1999). "Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age." *Cement and Concrete Research*: 1597–1604.

Ramezaniyanpour, A. A., M. Esmaeili, S. A. Ghahari and M. H. Najafi (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.

Rao, S. K., P. Sravana and T. C. Rao (2016). "Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand." *International Journal of Pavement Research and Technology* 9(4): 289-301.

ROSSI, P. (1998). « Les bétons de fibres métalliques. » Presses des PC: 309.

ROSSI, P. e. a. (1996). "Compressive behavior of concrete: physical mechanisms and modeling." *J. Eng. Mech, ASCE* 11(122): 1038-1043.

Saucier F., C. B. e. D. C. (1995). « Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment. » Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.

Shihata, S. A. (2000). "Strength and Density of Laboratory-Prepared RCC Specimens: Effect of Compaction Procedure." *Cement, Concrete and Aggregates* 22(1).

Siad, H., H. A. Mesbah, H. Khelafi, S. Kamali-Bernard and M. Mouli (2010). "Effect of mineral admixture on resistance to sulphuric and hydrochloric acid attacks in self-compacting concrete." *Canadian Journal of Civil Engineering* 37(3): 441-449.

Simmonds, S. D. B. A. a. S. H. (1992). "Tests of Column-Flat Plate Connections." *International Concrete Abstracts Portal* 89(5): 495-502.

SWAMY, R. N. (1975). "Fibre reinforcement of Cement and Concrete." *Journal. Matériaux et Construction* 235-254.

SWAMY, R. N. e. a. (1982). "Workability of SFR lightweight aggregate concrete." *Internatioanl. J. Cement Composites and Lightweight concrete* 4(2): 103-109.

T. Plagué, C. D., J.-P. Charron (2017). "Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading." *Cement and Concrete Research* 94: 59–70.

Taylor, F. D. L. I. G. B. (1997). "Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete." *Cement and Concrete Composites* 19(4): 329-340.

Test-Method-71/10/625.1 (1991). "WATER PERMEABILITY OF HARDENED CONCRETE." MAIN ROADS Western Australia.

Topçu, İ. B. and M. Canbaz (2007). "Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash." *Construction and Building Materials* 21(7): 1486-1491.

Tremblay, S. (1997). « Méthodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraîneur D'air sur La Maniabilité. » Université de Laval.

USACE (2000). "Engineering and Design, Roller Compacted Concrete." Engineer Manual No 1110-2-2006,.

Viet-Hung Nguyen , B. N. J.-M. T. (2007). « Modélisation de la lixiviation des matériaux cimentaires. » *Revue Européenne de Génie Civil* 11(6): 813-825.

Wu, Y. (2002). "Flexural Strength and Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams." *Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed* 17(2): 54-57.

Yap, S. P., U. J. Alengaram and M. Z. Jumaat (2013). "Enhancement of mechanical properties in polypropylene– and nylon–fibre reinforced oil palm shell concrete." *Materials & Design* 49: 1034-1041.

ZDIRI M (2008). Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisement, L ' Université de Tunis El Manar (Tunisie), L ' Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai.

ZIAD, B. J., ZENG (1993). "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete." *ACI Materials Journal* 90(6): 605-612.

Annexe 1.



FICHE TECHNIQUE	
FIBERTEK PP	
FIBRES POLYPROPYLENE	
	
<p>DESCRIPTION FIBERTEK PP est une fibre de polypropylène multi-files, à dispersion facile et homogène.</p> <p>CARACTERISTIQUE Etat physiquefibres Couleurblanc Densité (20°C).....0,8 à 1,00 g/cm³ Dimensions..... 6 /12/18 mm</p> <p>PROPRIETES ET EFFETS -Améliore la thixotropie des mélanges -Réduit la fissuration -Réduit le retrait -Améliore les résistances en flexion -Améliore la thixotropie du mortier ou béton.</p> <p>DOMAINES D'APPLICATION -Micro béton et mortier projetés ou manuels. -Application en épaisseur pour mortier en ciment ou en plâtre en une seule passe. -Chapes légères. -Mortier auto nivelant. -Plates formes.</p> <p>MODE D'EMPLOI 1) Mélanger les agrégats, l'eau et le ciment. 2) Ajouter graduellement les fibres dans la bétonnière, toujours en mouvement pour obtenir une dispersion plus uniforme. Continuer de mélanger pour au moins 5 minutes, après l'ajout des fibres. 3) Ajouter un super plastifiant de notre gamme sans arrêter le malaxage jusqu'à l'obtention d'une pate homogène.</p>	<p>DOSAGE Le dosage est compris entre 50 à 100 grammes sur le poids total des mortiers secs (pour mortiers spéciaux) et 200 à 500 grammes pour les plâtres projetés. En général le dosage varie entre 900 à 1000 g par mètre cube.</p> <p>CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE Stockage en lieu sec et protégé. Carton de 27 kg (30 sachets de 0,9kg)</p> <p>N.B. : les fibres de 6 mm de longueur ont la particularité, à égale poids de n'importe quelles autres fibres, d'être trois fois supérieures en nombre. Avoir donc un nombre triple de fibres, dans une épaisseur réduite de mortier de ciment, permet une résistance supérieure et une remarquable élasticité du mélange.</p> <p>PRECAUTIONS D'EMPLOI Se référer à la fiche de données de sécurité.</p>
	<p>Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispense pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans les propres conditions d'emploi. Par conséquent la TEKNACHEM ALGERIE SARL décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.</p>

Figure 1 : fiche technique des fibres polypropylènes.