

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et génie civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Structure, Matériaux et Sol

PERFORMANCE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DES DECHETS DES PNEUS EN CAOUTCHOUC ET AJOUTS MINÉRAUX

Par

Hamza BENSACI

Devant le jury composé de :

GRINE KHALED.	Prof.	U. de Blida-1	Président
GHERNOUTI YOUCEF	Prof.	U. de Boumerdès	Examineur
CHAID RABAH	Prof.	U. de Boumerdès	Examineur
ABDESSEMED MOULOUD	M.C.A	U. de Blida-1	Examineur
MENADI BELKACEM	Prof.	U. de Blida -1	Rapporteur
KENAI SAID	Prof.	U. de Blida -1	Co-Rapporteur

Blida, 2019

المخلص

الغرض من هذه الدراسة هو تبيين نفايات الإطارات المستعملة في شكل حبيبات مطاطية وغيرها في شكل ألياف معدنية في خلطات الخرسانة المرصوصة ذاتيا. في الجزء الأول ، تمت إضافة الجزيئات المطاطية إلى الخلائط كبديل جزئي للحجم الكلي للرمال بنسب مختلفة (5 ، 10 ، 15 ، 20 ، و 30٪). يهدف الجزء الثاني إلى دمج بشكل منفصل و بمعدلات مختلفة (0.5 ، 0.8 ، 1 و 1.5 ٪) الألياف الحديدية المعاد تدويرها والصناعية في الحجم الكلي للخرسانة. يتمثل الجزء الثالث في تحسين جدوى استخدام الألياف المعاد تدويرها ليس فقط عن طريق الجمع بين الألياف المعاد تدويرها والألياف الصناعية الأخرى من أجل الحصول على ألياف هجينة، ولكن أيضا عن طريق استبدال خبث الافران بوزن الاسمنت بنسبة 0 ٪ ، 15 ٪ و 25 ٪. أجريت الإختبارات العادية لتوصيف قابلية التشغيل للخرسانة المرصوصة ذاتيا في الحالة الطازجة، وكذلك الإختبارات الريولوجية. تمت دراسة مقاومة الضغط في 28 و 90 يوما، ونفاذية المياه مع وجود ضغط للماء، الانكماش، الموصلية الحرارية ، الامتصاص الشعيري، نفاذية الكلوريد والمسامية.

أصبحت الخرسانة المرصوصة ذاتيا أخف وزناً وأقل قابلية، أكثر مقاومة للفصل في الحالة الطازجة ،أقل نفاذية وأكثر عزلاً ضد التغيرات الحرارية. إذا كان استبدال المطاط محددًا بنسبة 15٪، فيتم تلبية متطلبات المواصفة الأوروبية لقابلية الخرسانة المرصوصة ذاتيا. العيب الرئيسي المتعلق بإدراج المطاط في الخرسانة هو الانخفاض في الخواص الميكانيكية، وكذلك زيادة الانكماش الكلي للخرسانة.

تقلل إضافة الألياف المعاد تدويرها أو الصناعية من قابلية تشغيل الخرسانة. ترتبط النسبة المئوية للألياف المضافة سلبًا بقابلية تشغيل الخرسانة، وبالتالي تؤدي إلى زيادة اللزوجة، وانخفاض في السيولة ، ولكنها تزيد من مقاومة الفصل. استبدال الأسمنت بالخبث يحسن العوامل الريولوجية للخرسانة خاصة مع نسبة 15 ٪ من الخبث. إضافة الألياف المعدنية تعمل أيضا على تحسين مقاومة الضغط و الانحناء وتقليل الانكماش الكلي للخرسانة.

كلمات المفاتيح: الخرسانة المرصوصة ذاتيا، إعادة التدوير ، المطاط ، ألياف المعدنية ، الريولوجيا ، الانضغاط ، الانكماش ، الموصلية ، الديمومة.

RESUME

Cette étude vise à valoriser les déchets de pneus usés sous forme de granulats en caoutchouc et de fibres d'acier dans le béton autoplaçant (BAP). Dans la première partie, les particules de caoutchouc ont été ajoutées aux mélanges en substitution partielle du volume total de sable à différents pourcentages (5, 10, 15, 20 et 30%). La deuxième partie, vise à incorporer séparément à des taux différents (0.5, 0.8, 1 et 1.5%) les fibres d'acier recyclées (FMR) et industrielles (FM) en volume total du béton. La troisième partie, consiste à améliorer la faisabilité de l'utilisation de fibres recyclées non seulement par la combinaison entre les fibres recyclées (FMR) et autres industrielles (FM) dans le but d'obtenir des fibres hybrides (FHy), mais aussi par la substitution du ciment en poids par le laitier à 0%, 15% et 25%. Les essais classiques pour la caractérisation de différents BAP étudié à l'état frais ont été effectués, ainsi que des essais au rhéomètre. La résistance à la compression à 28 et 90 jours, le retrait total, la conductivité thermique, la perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire et la perméabilité aux ions chlore ont été étudiés.

En présence du caoutchouc, le BAP est devenu plus léger, moins maniable, plus résistant à la ségrégation, moins perméable et plus isolant vis-à-vis des changements thermique. Si la substitution de sable par le caoutchouc est limitée à 15%, les exigences des directives européennes relatives à l'ouvrabilité du BAP sont satisfaites. Le principal inconvénient lié à l'incorporation du caoutchouc dans le BAP est la chute des propriétés mécaniques, ainsi que l'augmentation du retrait total du BAP.

L'addition des fibres d'acier FMR ou FM réduit l'ouvrabilité du BAP. Le pourcentage de fibres ajoutées est corrélé négativement à la maniabilité du béton et entraîne par conséquent une augmentation de la viscosité, une diminution de la fluidité, mais augmente la résistance à la ségrégation. La substitution du ciment par du laitier a amélioré les paramètres rhéologiques du BAP en particulier à 15% de laitier. L'addition des fibres d'acier améliorent la résistance à la compression et à la flexion et réduisent le retrait total.

Mot clés : béton autoplaçant, recyclage, caoutchouc, fibres d'acier, rhéologie, compression, retrait, conductivité, durabilité.

ABSTRACT

This study aims to analyze the possibility of valorizing waste tires rubber as sand and steel fibers in self-compacting concrete mixtures. In the first part, the rubber particles were added to the mix as partial replacement of the total volume of sand at different rates (5, 10, 15, 20, 25 and 30%). The second part aims to incorporate separately and at different rates (0.5, 0.8, 1 and 1.5%) recycled and industrial fibers in SCC in the total volume of concrete. The third part, aims to improve the feasibility of using recycled fibers not only by combining recycled fibers and other industrial fibers in order to obtain hybrid fibers (FHy), but also by replacing cement by weight of slag at 0%, 15% and 25%. The tests for the characterization of the different SCC studied in the fresh state were carried out, as well as rheometer tests. The compression strength at 28 and 90 days, total shrinkage, thermal conductivity, water depth penetration, capillary absorption and chloride permeability were investigated.

In presence of rubber, the SCC became lighter, less workable, more resistant to segregation, less permeable and more insulating against thermal changes. The principal disadvantage of rubber incorporation was the decrease in the mechanical properties of SCC, as well as the increase of the total shrinkage of the SCC. If rubber waste in SCC is limited to 15% of the total volume of fine aggregates, the requirements of rheological proprieties are satisfied.

The addition of fibers reduces the workability of SCC, but increases the resistance to segregation. While, cement substitution by slag improved furthermore the rheological parameters of SCC with hybrid fibers with an optimal dosage of 15% slag. The addition of steel fibers improve the compressive and flexural strengths and reduce the total shrinkage.

Keywords: self-compacting concrete, recycling, rubber, steel fibers, rheology, compression, shrinkage, conductivity, durability.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent, en premier lieu, à mes deux responsables de la thèse, Monsieur Belkacem MENADI, Professeur à l'université de Blida-1 et à Monsieur Said KENAI Professeur à l'université de Blida-1, pour leur précieuse aide qui a permis de réaliser ce travail. Je les remercie pour leur disponibilité, leurs conseils et orientations ainsi pour leurs grandes qualités humaines. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance. Espérant avoir l'occasion de travailler avec eux dans des futurs travaux. Je tiens à remercier aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail :

Professeur GRINE Khaled.	Président du jury de thèse
Professeur CHAID Rabah	Examineur de thèse
Professeur GHERNOUTI Youcef	Examineur de thèse
Docteur ABDESSEMED Mouloud	Examineur de thèse

Je tiens à remercier Monsieur FORTAS Abdelkader et toute l'équipe du laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux à l'Université du Blida. Mes remerciements s'adressent aussi aux enseignants, du département de génie civil avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

J'adresse aussi mes remerciements à toute l'équipe de GRANITEX et de la société SAEL qui ont mis à ma disposition des produits nécessaires pour l'élaboration de mon travail de recherche.

Je remercie enfin, particulièrement mes parents, mes frères et tous les membres de ma famille qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ce travail.

Je dédie cette thèse

A MÈRE CHÈRE MÈRE

*Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta
Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.*

*Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et
ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta
confiance et tes sacrifices.*

*Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et
Bonheur.*

TABLE DES MATIÈRES

RESUME

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 7

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: VALORISATION DES DECHETS DE
CAOUTCHOUC DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE 10

1.1 Introduction 10

1.2 Définition du caoutchouc 10

1.3 Utilisation du caoutchouc 10

1.4 Déchet de caoutchouc..... 11

1.5 Traitement des pneus usagés 12

1.6 Les constituants 13

1.7 Nécessité de recyclage des pneumatiques 13

1.8 Valorisation des pneus usagés : 15

1.8.1 La valorisation énergétique : l'incinération..... 15

1.8.2 Le rechapage..... 15

1.8.3 Le broyage 16

1.9 Influence du caoutchouc sur les propriétés du béton à l'état frais..... 20

1.9.1 Ouvrabilité du béton vibré..... 20

1.9.2 Ouvrabilité des BAP..... 23

1.9.3 Les masses volumiques et l'air occlus..... 24

1.10 Influence du caoutchouc sur les propriétés à l'état durci 25

1.10.1 Résistance à la compression 25

1.10.2 Résistance à la traction 28

1.10.3 Module d'élasticité 30

1.10.4 Traitement de la surface des granulats de caoutchouc : 31

1.10.5 Capacité de déformation..... 32

1.10.6 Retrait 35

1.10.7 Mode de rupture : 36

1.10.8 Amortissement des vibrations 37

1.10.9 La conductivité thermique..... 38

1.10.10 Propriétés de transfert..... 38

1.11 Conclusion..... 42

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES	43
2.1 Introduction	43
2.2 Définition et avantages et inconvénients du béton auto-plaçant	43
2.3 Formulation des BAP	44
2.4 Caractérisation des BAP à l'état frais.....	45
2.4.1 Essai d'étalement.....	46
2.4.2 Essai de la boîte en L.....	46
2.4.3 L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel ».....	47
2.4.4 Essai de stabilité au tamis.....	47
2.5 Rhéologie des bétons autoplaçants.....	47
2.5.1 Loi de comportements rhéologiques.....	48
2.5.2 Paramètres rhéologiques.....	49
2.5.3 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP	52
2.6. Les bétons fibrés.....	54
2.6.1 Historique	54
2.6.2. Applications actuelles et potentielles des BFM.....	54
2.7 Les fibres	55
2.7.1 Différents types de fibres.....	55
2.7.2 Rôle des fibres	55
2.7.3 Principe d'action des fibres	56
2.7.4 Action des fibres métalliques dans les bétons ordinaires à l'état frais	58
2.7.5 Comportement mécanique des bétons renforcés de fibres	59
2.7.6 Processus de couture des fissures	60
2.7.7 Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres	61
2.7.8 Orientation préférentielle des fibres	62
2.8 Bétons autoplaçants fibrés.....	63
2.9 Influence des fibres sur les propriétés du BAP à l'état frais	63
2.9.1 Effet sur l'étalement	63
2.9.2 Effet sur le temps d'écoulement V-funnel.....	65
2.9.3 Effet sur la capacité de passage (boîte en L et J-RING).....	66
2.10 Influence des fibres sur les propriétés du BAP à l'état durci	67
2.10.1 Comportement à la flexion	67
2.10.2. Comportement à la compression et à la traction.....	68
2.10.3 Retrait	69
2.10.4 La perméabilité à l'eau	70
2.10.5 Pénétration aux ions chlorure	71
2.10.6 Absorption capillaire	71

2.12 Effet des additions minérales sur les performances des BAP.....	72
2.12.1 Effet des additions minérales sur les performances des BAP à l'état frais.....	72
2.12.2 Effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP	73
2.13 Conclusions	74
CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS	75
3.1 Introduction	75
3.2 Caractérisation des matériaux.....	75
3.2.1 Le sable.....	75
3.2.2 Le gravier	75
3.2.3 Le ciment.....	77
3.2.4 Le laitier	77
3.2.5. Caoutchouc.....	78
3.2.6 Les fibres métalliques recyclées (FMR).....	79
3.2.7 Les fibres industrielles Dramix (FM) :.....	81
3.2.8 Les adjuvants.....	82
3.3 Formulations adoptées.....	82
3.3.1 Formulation du mortier autoplaçant	83
3.3.2 Essais réalisés sur MAP.....	84
3.3.3 Formulation du béton autoplaçant (BAP).....	85
3.3.4. Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état frais.....	86
3.3.5 Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état durci.....	90
3.6 Récapitulatif des essais réalisés.....	94
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS EFFET DE CAOUTCOUC SUR LES PROPRIETES DU BAP.....	98
4.1. Introduction	98
4.2. Optimisation de dosage du superplastifiant.....	98
4.2.1. Effet du superplastifiant sur l'étalement.....	99
4.2.2. Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel)	100
4.3. Effet du caoutchouc sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.....	100
4.3.1. La densité et la teneur en air.....	101
4.3.2. Etalement et le rapport H2/H1	102
4.3.3. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V et le temps T_{50}	104
4.3.4. Résistance à la ségrégation par tamisage.....	105
4.3.5. Effet du caoutchouc sur la rhéologie des BAP.....	106
4.4. Effet du caoutchouc sur le BAP à l'état durci	108
4.4.1. Les propriétés mécaniques	108
4.4.2. La conductivité thermique.....	110

4.4.3.	Retrait total	112
4.4.4.	Absorption capillaire	114
4.4.5.	La perméabilité à l'eau	116
4.4.6.	Pénétration aux ions de chlorure	117
4.5.	Conclusion.....	119
CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DES FIBRES METALLIQUES SUR LES PERFORMANCES DU BAP		121
5.1	Introduction	121
5.2	Effet des fibres sur les propriétés du BAP à l'état frais.....	121
5.2.1	La teneur en air.....	122
5.2.2	Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams	124
5.2.3	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V	128
5.2.4	Le rapport H_2/H_1 à la boîte en L (L-Box test)	131
5.2.5	Résistance à la ségrégation par tamisage.....	133
5.2.6	Effet des fibres sur la rhéologie des BAP.....	135
5.3	Effet des fibres sur le BAP à l'état durci.....	137
5.3.1	La résistance à la compression	137
5.3.2	La résistance à la flexion	140
5.3.3	Retrait total.....	142
5.3.4	La perméabilité à l'eau	145
5.3.5	Pénétration aux ions de chlorure	146
5.3.6	Absorption capillaire	149
5.4	Conclusion.....	150
CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DU LAITIER ET DES FIBRES HYBRIDES SUR LES PERFORMANCES DU BAP		151
6.1.	Introduction	151
6.2.	Effets des fibres hybrides et du laitier sur les propriétés du BAP à l'état frais	151
6.3.	Effet des fibres hybrides sur les propriétés du BAP à l'état frais.....	152
6.3.1.	Air occlus	152
6.3.2.	Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams	153
6.3.3.	Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel	156
6.3.4.	Mesures du rapport H_2/H_1 de l'essai L-Box.....	158
6.3.5.	Résistance à la ségrégation par tamisage.....	159
6.4.	Effet du laitier sur les propriétés des BAP avec FHy à l'état frais.....	162
6.4.1.	Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams	162
6.4.2.	Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel	164
6.4.3.	Mesures du rapport H_2/H_1 de l'essai L-Box.....	165

6.4.4. Résistance à la ségrégation par tamisage.....	166
6.4.5. Effet du laitier sur la rhéologie des BAP fibrés.....	167
6.5. Effet du laitier sur les propriétés mécaniques du BAP fibrés	169
6.5.1. La résistance à la compression	169
6.5.2. La résistance à la flexion	170
6.6. Effet des FHy sur les propriétés mécaniques du BAP	172
6.6.1. La résistance à la compression	172
6.6.2. La résistance à la flexion	173
6.6.3. Le retrait total	175
6.6.4. La perméabilité à l'eau	176
6.6.5. Pénétration aux ions de chlorure	177
6.6.6. Absorption capillaire	178
6.7. Conclusion.....	180
CONCLUSION GENERALE	181
RÉFÉRENCES.....	185

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE

Figure 1. 1: Modes de traitement des déchets pneumatiques en Europe [12].	14
Figure 1. 2 : Pose d'une bande de roulement sur un pneu usagé [15].	16
Figure 1. 3 : Formes de déchets pneumatiques [16]. a) déchet de pneu à l'état brut, b) particules de caoutchouc seul, c) textile +caoutchouc +fibres d'acier d) fibres d'acier, e)fibres d'acier +caoutchouc, e, f) fibres d'acier +caoutchouc.	18
Figure 1. 4 : Etat de la surface des particules de caoutchouc broyé; A) à la température ambiante, B) cryogéniquement [12].	19
Figure 1. 5: Schéma du principe de granulation des pneus usagés [10].	20
Figure 1. 6 : Variation de l'affaissement du béton en fonction du contenu en caoutchouc [24].	21
Figure 1. 7 : Variation de l'affaissement du béton en fonction de la teneur en caoutchouc [26].	22
Figure 1. 8 : Influence de G.C. sur l'affaissement [21].	23
Figure 1. 9 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus [19].	25
Figure 1. 10 : Influence de l'adjonction de GC sur la résistance en compression [19].	26
Figure 1. 11 : Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours [30].	27
Figure 1. 12: Taux de réduction des résistances [5].	29
Figure 1. 13 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [24].	29
Figure 1. 14 : Influence des G.C. sur module d'élasticité [42].	30
Figure 1. 15 Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de...	30
Figure 1. 16 : Surface de fracture de l'éprouvette ; dans le cas du caoutchouc à l'état brut (gauche), et dans le cas du traitement du caoutchouc dans la solution NaOH (droite) [47].	31
Figure 1. 17 : Influence de l'incorporation de caoutchouc sur la capacité de déformation en.	33
Figure 1. 18 : Comportement en flexion des blocs de béton caoutchouté [52].	34
Figure 1. 19 : Courbes "force-flèche" en flexion – effet du remplacement partiel du sable par des granulats de caoutchouc dans un BAP [30].	34
Figure 1. 20 : Types de rupture [21].	36

Figure 1. 21 : Influence des G.C. et du temps de conservation sur la vitesse des ondes ultrasoniques du béton [20].	38
Figure 1. 22 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en caoutchouc [61].	39

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES

Figure 2. 1 : Les différents comportements rhéologiques des fluides [78].	49
Figure 2. 2 : Schéma du glissement des couches [77].	50
Figure 2. 3 : Schéma de la vitesse de cisaillement [79].	51
Figure 2. 4 : Comportements rhéologiques pour différents types de béton [83].	53
Figure 2. 5 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres [89].	55
Figure 2. 6 : Processus de fissuration du béton [93].	57
Figure 2. 7 : Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures [94].	57
Figure 2. 8 : Effet de la taille des granulats sur la distribution de fibres [97].	58
Figure 2. 9 : Effet du rapport sable/gravier sur la maniabilité du béton renforcé par des fibres [101].	59
Figure 2. 10 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction [102].	59
Figure 2. 11 : Processus de couture [105].	61
Figure 2. 12 : Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [109].	62
Figure 2. 13 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP [96].	64
Figure 2. 14 : Evolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [111].	64
Figure 2. 15 : L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres [111].	65
Figure 2. 16: Courbe effort-flèche pour différentes compositions [120].	68
Figure 2. 17 : Comportement à la traction de différentes compositions [122].	69
Figure 2. 18 : Effet des différents types de fibres sur la contrainte de retrait [123].	70

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

Figure 3. 1: Courbes granulométriques du sable et du caoutchouc.	76
Figure 3. 2: Courbe granulométrique des graviers	76
Figure 3. 3: Particules en caoutchouc utilisées dans le programme expérimental.	79
Figure 3. 4: (a) Mesure des longueurs des fibres FMR. (b) Mesure de géométrie des fibres à l'aide d'un pied à coulisse.	80

Figure 3. 5: La variation des diamètres de fibres recyclées d'un échantillon de 2000 fibres.	80
Figure 3. 6: La variation des longueurs de fibres recyclées d'un échantillon de 2000 fibres.	81
Figure 3. 7: Les fibres métalliques à crochets Dramix.	82
Figure 3. 8: Séquence de malaxage du mortier [147].....	83
Figure 3. 9: Essai d'étalement pour Mortier.	84
Figure 3. 10: Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier	85
Figure 3. 11: Essai d'étalement.....	86
Figure 3. 12: Essai V-funnel.	87
Figure 3. 13: Essai de la boîte en L.	88
Figure 3. 14: Essai de stabilité au tamis.	88
Figure 3. 15: Rhéomètre Heidolph RZR 2102.	89
Figure 3. 16: Profil de vitesse utilisé.....	90
Figure 3. 17: Dispositif de l'essai de flexion à trois points.....	91
Figure 3. 18:Essai de retrait.....	92
Figure 3. 19: Essai de la mesure de conductivité thermique.....	92
Figure 3. 20: Mesure de la profondeur de pénétration de l'eau.	94
Figure 3. 21: Organigramme des différents essais d'optimisation sur mortier.	95
Figure 3. 22: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état frais.....	96
Figure 3. 23: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP caoutchouteux à l'état durci.....	96
Figure 3. 24: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP fibrés à l'état durci. ...	97

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DE CAOUTCOUC SUR LES PROPRIETES DU BAP

Figure 4. 1: Variation d'étalement en fonction de dosage en SP.	99
Figure 4. 2: Variation du temps d'écoulement en fonction de dosage en SP.....	100
Figure 4. 3: Effet de la teneur en caoutchouc sur la densité et la teneur en air du BAP.	102
Figure 4. 4: L'effet de la teneur en caoutchouc sur l'étalement et le rapport H2/H1 du BAP.	103
Figure 4. 5: L'effet de caoutchouc sur le diamètre d'étalement.....	103
Figure 4. 6: Effet de la teneur en caoutchouc sur le temps d'écoulement et T ₅₀	104

Figure 4.7: L'effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la ségrégation du BAP. ...	105
Figure 4. 8: Effet de la teneur en caoutchouc sur la viscosité plastique du BAP.....	106
Figure 4. 9: Corrélation entre la viscosité plastique et le diamètre d'étalement.	107
Figure 4. 10: Corrélation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement T_{vf}	107
Figure 4. 11: Effet de la teneur en caoutchouc sur la contrainte de cisaillement du BAP.	108
Figure 4. 12: Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la compression du BAP...	109
Figure 4. 13: Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la flexion du BAP.	109
Figure 4. 14: Effet de la teneur en caoutchouc sur la conductivité thermique du BAP.	111
Figure 4. 15: Corrélation entre la conductivité thermique et la densité.	111
Figure 4. 16: Effet de la teneur en caoutchouc sur le retrait total du BAP.....	112
Figure 4. 17: Effet de la teneur en caoutchouc sur l'absorption capillaire du BAP.	114
Figure 4. 18: Effet de la teneur en caoutchouc sur la profondeur de pénétration d'eau du BAP.	116
Figure 4. 19: Effet de la teneur en caoutchouc sur la pénétration des ions chlore du BAP. ..	118

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DES FIBRES METALLIQUES SUR LES PERFORMANCES DU BAP

Figure 5. 1: l'effet de la teneur en fibres sur l'air occlus des BAP fibrés.	123
Figure 5. 2: Effet de la teneur en fibres sur l'étalement du BAP.	125
Figure 5. 3: (a) Galette d'étalement pour le BAP fibré, (b - c) la formation des oursins.....	126
Figure 5. 4: Effet de la teneur en fibres sur l'étalement du BAP.	127
Figure 5. 5: Effet de la teneur en fibres sur le temps d'écoulement du BAP.....	129
Figure 5. 6: Effet de la teneur en fibres sur le rapport (H_2/H_1) du BAP.	131
Figure 5. 7: illustration du blocage pour les BAP avec ; (a) FMR, (b) FM.	132
Figure 5. 8: Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la ségrégation du BAP.	134
Figure 5. 9: Constatation visuelle sur ségrégation du BAP fibré ; (a) l'étalement, (b) l-box test.	134
Figure 5. 10: Effet des fibres sur le seuil de cisaillement du BAP.....	136
Figure 5. 11: Effet des fibres sur la viscosité plastique du BAP.....	136
Figure 5. 12: Effet des fibres sur la résistance à la compression des BAP fibrés.	138
Figure 5. 13: Effet de fibres sur la résistance à la flexion des BAP fibrés.....	141
Figure 5. 14: Effet des FMR sur le retrait total du BAP.	143
Figure 5. 15: Effet des FM sur le retrait total du BAP.	143

Figure 5. 16: Effet de fibres sur la profondeur de pénétration d'eau du BAP.	145
Figure 5. 17: Effet de fibres sur la charge passante en ions de chlorure du BAP.	146
Figure 5. 18: Les signes de corrosion des échantillons du BAP fibrés, (a) sur la surface, (b) à l'intérieure du béton.	147
Figure 5. 19: Effet des FMR sur l'absorption capillaire du BAP.	149
Figure 5. 20: Effet des FM sur l'absorption capillaire du BAP.	150

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DU LAITIER ET DES FIBRES HYBRIDES SUR LES PERFORMANCES DU BAP

Figure 6. 1: Effet des fibres sur la teneur en air occlus du BAP.	153
Figure 6. 2: Effet des fibres sur le diamètre d'étalement du BAP.	154
Figure 6. 3: Effet des fibres sur le temps T50 du BAP.	154
Figure 6. 4 : Effet des fibres sur le TV-Funnel du BAP.	157
Figure 6. 5: Effet des fibres sur le rapport H2/H1 du BAP.	158
Figure 6. 6: Effet des fibres sur la résistance à la ségrégation par tamisage du BAP.	160
Figure 6. 7: Effet des fibres sur le seuil de cisaillement du BAP.	160
Figure 6. 8: Effet des fibres sur la viscosité plastique du BAP.	161
Figure 6. 9: Effet du laitier sur le diamètre d'étalement des BAP fibrés.	162
Figure 6. 10 : Effet du laitier sur le temps T50 des BAP fibrés.	163
Figure 6. 11: Effet du laitier sur le TV-Funnel du BAP fibres.	164
Figure 6. 12: Effet du laitier sur le rapport H2/H1 des BAP fibrés.	166
Figure 6. 13: Effet du laitier sur la résistance à la ségrégation par tamisage des BAP fibrés.	167
Figure 6. 14: Effet du laitier sur le seuil de cisaillement des BAP fibrés.	168
Figure 6. 15 : Effet du laitier sur le seuil de cisaillement des BAP fibrés.	168
Figure 6. 16: Effet du laitier sur la résistance à la compression des BAP fibrés à 28 jours... ..	169
Figure 6. 17: Effet du laitier sur la résistance à la compression des BAP fibrés à 90 jours... ..	170
Figure 6. 18: Effet du laitier sur la résistance à la flexion des BAP fibrés à 28 jours.	171
Figure 6. 19: Effet du laitier sur la résistance à la flexion des BAP fibrés à 90 jours.	171
Figure 6. 20: Effet du type de fibres sur la résistance à la compression des BAP à 28 jours.	172
Figure 6. 21: Effet du type de fibres sur la résistance à la flexion du BAP à 28 jours.	174
Figure 6. 22: Effet des FHy sur le retrait du BAP.	176
Figure 6. 23: Effet du type de fibres sur la perméabilité à l'eau du BAP.	177
Figure 6. 24: Effet du type de fibres sur la perméabilité aux ions de chlorure du BAP.	178
Figure 6. 25: Effet des FHy sur l'absorption capillaire du BAP.	179

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE

Tableau 1. 1: Situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés [3].	12
Tableau 1. 2 : Composition moyenne d'un pneu de véhicule léger en Europe d'après [10].....	13
Tableau 1. 3: Classification des déchets pneumatiques en Europe, Post-Consumer tire Materials, CEN (2004), et aux Etats Unis, ASTM (1998) [17].	17

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES

Tableau 2. 1: Paramètres rhéologiques des pâtes ciments, mortier et béton [82].	52
Tableau 2. 2 : Applications de bétons renforcés de fibres [87].....	54
Tableau 2. 3 : Recommandation concernant l'espacement normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAP fibrés [110].	66

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

Tableau 3. 1: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable.	75
Tableau 3. 2: Propriétés des granulats.....	76
Tableau 3. 3: La composition chimique et minéralogique du ciment.	77
Tableau 3. 4 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	77
Tableau 3. 5: Composition chimique du laitier d'El Hadjar [52]	78
Tableau 3. 6: Caractéristiques techniques des fibres métalliques à crochets Dramix.....	81
Tableau 3. 7: Classes d'étalement des BAP selon l'EFNARC [119].	86
Tableau 3. 8: Limites recommandées pour les BAP à l'état frais [119].	89

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DE CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DU BAP

Tableau 4. 1: Compositions des mortiers obtenues en fonction du dosage en SP.	99
Tableau 4. 2: Composition des BAP caoutchoutés testés (kg/m ³).	101

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DES FIBRES METALLIQUES
SUR LES PERFORMANCES DU BAP

Tableau 5. 1: Composition des BAP fibrés testés (kg/m³). 122

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : EFFET DU LAITIER ET DES
FIBRES HYBRIDES SUR LES PERFORMANCES DU BAP

Tableau 6. 1: Composition des BAP fibrés avec les FHy à base de laitier (kg/m³). 152

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AbG	Coefficient d'absorption du gravier
Abs	Coefficient d'absorption du sable
A _f	La section de la fibre
BAP	Béton autoplaçant
BAPR	Béton autoplaçant de référence
BHP	Béton de Haute Performance
BO	Béton ordinaire
BV	Béton Vibré
C	Ciment
C+A	Ciment+Addition
Ca CO ₃	Carbonate de calcium
CEM I 42,5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
CEM II	Ciment Portland composé
CO ₂	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
CV	Cendres volantes
D _{max}	Diamètre maximal des Granulats
D	Diamètre du fil
dS	Surface élémentaire d'une couche cisailée
dF	Projection de la force de frottement tangentielle
E	Eau
E/(C+A)	Eau / (Ciment+Addition)
E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
E _{vol}	Le pourcentage d'eau en volume, (%)
FA	Fumée de silice
FM	Fibres métalliques industrielles
FMR	Fibres métalliques recyclées
FMR	Fibres métalliques hybrides
FS	Les fibres synthétiques
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
H ₂ /H ₁	Rapport de L-Box
HR	Humidité (%)
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Lg	Longueur de fibre
MBE	Mortier de Béton Equivalent
MK	Métakaolin
MOR	Mortier
OPC	Ordinary Portland cement
PC	Polycarboxylate
PZN	Pouzzolane naturelle
REF	Référence
R _m	Vitesse relative
R _{mt}	Résistance à la traction du fil
R ²	Coefficient de corrélation

S/M	Sable/Mortier
SCC	Self-Compacting Concrete
SF	Slump flow
SP	Superplastifiant
SP/L	Superplastifiant/Liant
SP/P	Superplastifiant/Poudre
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T	Température (°C)
T ₅₀	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec).
T _{VF}	Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec).
V	Volume, (m ³)
V _f	Le dosage volumique en fibres
V _{sable} /V _{mortier}	Volume du sable /volume du mortier
α	le facteur orientation.
α_1	Angle de crochet
γ	Le taux de cisaillement, (s ⁻¹)
η	La viscosité, (Pa.s)
η_P	la viscosité plastique, (Pa.s)
ρ_{abs}	Masse volumique absolue, (kg/m ³)
ρ_{app}	Masse volumique apparente, (kg/m ³)
ρ_C	Masse volumique du ciment, (kg/m ³)
ρ_E	Masse volumique d'eau, (kg/m ³)
ρ_G	Masse apparente du gravier, (kg/m ³)
ρ_S	Masse volumique du sable, (kg/m ³)
ρ_{SP}	Masse volumique du superplastifiant, (kg/m ³)
τ	Contrainte de cisaillement, (Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement, (Pa)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les déchets d'origine caoutchouteuse sont considérés comme encombrants et non respectueux de l'environnement. L'industrie automobile consomme un volume important de caoutchouc et, par conséquent, elle est la source principale des déchets de caoutchouc. Il est donc nécessaire, avec le nombre sans cesse croissant de véhicules dans le monde, de trouver des procédés innovants pour absorber une certaine quantité de ces déchets.

La gestion des déchets solides étant considérée comme un souci majeur pour tous les pays suite à leurs effets directs sur l'environnement et la santé de l'être humain, la valorisation des déchets et des sous-produits industriels d'origine caoutchouteuse dans les applications de Génie Civil a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières décennies, lesquelles s'inscrivent dans le cadre d'une politique environnementale

D'un autre côté, l'utilisation intensive des granulats naturels dans les domaines des travaux publics et du bâtiment, qui sont considérées parmi les plus grands consommateurs de granulats minéraux, peut engendrer des problèmes écologiques. Il est de ce fait nécessaire de rechercher de nouvelles sources de matériaux. Les déchets de caoutchouc ont été utilisés avec succès dans nombre d'applications de Génie Civil, dans les bétons et mortiers sous forme de granulats, en géotechnique pour les remblais légers et également dans les mélanges d'asphaltes.

Les études rapportées dans la littérature ont montré que le recyclage des pneumatiques usagés dans le domaine du Génie Civil, permet non seulement de réduire le coût, mais également d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton et du sol en bénéficiant de leur déformabilité, de leur étanchéité et de leur capacité d'absorption des chocs.

Le comportement des bétons à base de déchets de pneus usés a été étudié à grande échelle sur les propriétés du béton ordinaire, ce qui n'est pas le cas pour le béton autoplaçant (BAP), pour lequel peu d'études qui traitent les potentialités d'utiliser les déchets pneumatiques dans un béton auto plaçant, notamment, sur les paramètres rhéologiques du BAP, ainsi que sur leur capacité vis-à-vis les changements thermique et le retrait, ont été réalisées.

Le but principal de ce travail est de valoriser les déchets de pneus usés sous forme de granulats en caoutchouc et de fibres d'acier dans les mélanges de béton autoplaçant (BAP) afin de préserver l'environnement d'un côté, et de créer des nouvelles sources de matériaux d'autre côté. Pour cela, le premier paramètre de l'étude est l'influence de la substitution partielle du sable par des granulats de caoutchouc à différents pourcentages (5, 10, 15, 20 et 30%) sur les propriétés du BAP. Un deuxième objectif est d'incorporer séparément à des taux différents (0.5, 0.8, 1 et 1.5%) les fibres d'acier recyclées (FMR) et industrielles (FM) en volume total du béton. Le troisième objectif consiste à améliorer la faisabilité de l'utilisation de fibres recyclées non seulement par la combinaison entre les fibres recyclées et autres industrielles dans le but d'obtenir des fibres hybrides (FHy), mais aussi par la substitution du ciment en poids par le laitier à 0%, 15% et 25%. A cet effet, vingt-huit formulations ont été étudiées en totalité et leurs qualités à l'état frais ont été vérifiées par des essais d'ouvrabilité et de rhéologie. La résistance à la compression et à la flexion, le retrait et la conductivité thermique du BAP ont été étudiés à l'état durci. La durabilité a été aussi analysée sur la base des essais de perméabilité à l'eau, d'absorption capillaire et de diffusion des ions de chlorures.

Pour arriver aux objectifs fixés, nous avons structuré la thèse en six chapitres ; dont le premier présente une synthèse bibliographique sur le recyclage des déchets d'origine caoutchouteuse dans les bétons. Il sera focalisé sur les principales connaissances sur l'impact du caoutchouc sur les propriétés du BAP en termes d'ouvrabilité et de rhéologie à l'état frais, de propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci.

Le deuxième chapitre présente également une étude bibliographique sur le comportement des BAP avec l'addition de fibres métalliques. Il présente certaines notions fondamentales relatives aux caractéristiques du béton autoplaçant fibré et l'influence des additions minérales sur ses propriétés.

Le troisième chapitre décrit les résultats d'identification des matériaux employés pour la confection des mélanges. Les différentes étapes de formulation y seront également présentées. Il en sera de même pour les différents essais réalisés en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.

L'un des objectifs de ce travail est de mettre en évidence l'effet du caoutchouc sur le comportement du BAP. Pour cela, nous avons consacré le quatrième chapitre à l'analyse des

résultats des essais sur les BAP caoutchouteux à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Les propriétés analysées à l'état frais sont l'étalement, la boîte en L, le temps d'écoulement, la stabilité au tamis et la rhéologie par la détermination du seuil de cisaillement et la viscosité plastique. A l'état durci, la résistance à la compression et à la flexion, le retrait et la conductivité thermique ont été mesurés à 28 jours. Les indicateurs de durabilité (la perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire et la perméabilité aux ions de chlorure) ont été aussi analysés à 180 jours.

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats de l'effet des fibres d'acier (FMR et FM) sur les propriétés rhéologiques du BAP à l'état frais, ainsi que sur les propriétés mécaniques, le retrait et les paramètres de la durabilité à l'état durci.

Le dernier chapitre de cette thèse comporte une analyse des résultats de l'effet des fibres hybrides et du laitier sur les performances du BAP.

Enfin, des conclusions générales ainsi que des perspectives de cette étude sont proposées.

**CHAPITRE I : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE_ VALORISATION DES
DECHETS DE CAOUTCHOUC
DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE**

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE_VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE

1.1 Introduction

Le présent chapitre présente un état de l'art sur le recyclage des déchets d'origine caoutchouteuse dans les bétons. Une synthèse bibliographique sur les principales connaissances sur l'impact du caoutchouc sur les propriétés du béton est présentée.

1.2 Définition du caoutchouc

Le latex, résine naturelle, qui est extraite de certains arbres comme (l'hévéa, castilloas, guayule, maniçoba, mangabeira en Amérique, funtumia et lianes landolphia en Afrique) est à l'origine de la fabrication du caoutchouc. On récolte cette résine en pratiquant une encoche sur le tronc de l'arbre, d'où s'écoule alors un liquide de couleur blanchâtre. Au contact de l'air, ce liquide durcit et noircit, il craquelle et devient vite trop rigide. Cet état de fait limite son utilisation à l'état brut. Cependant, si on le fait bouillir à 110°C pendant plus d'une heure avec du soufre, ses caractéristiques changent : il devient dur et résistant mais il garde son élasticité. Mais les chimistes ont découvert le moyen de le synthétiser, vers le début du 20^{ème} siècle, grâce à (la synthèse du poly-isoprène par l'enchaînement ou la polymérisation de molécules d'isoprène), ainsi la fabrication du caoutchouc a-t-elle commencé. Ses caractéristiques techniques à savoir l'étanchéité, l'élasticité, la souplesse, l'absorption de chocs, l'isolation phonique et électrique en font un produit phare pour l'industrie. Faraday, quant à lui, a montré qu'on peut fabriquer du caoutchouc à partir du pétrole. Selon l'association des fabricants du caoutchouc aux états unis [1], le caoutchouc synthétique représente 60% de la production mondiale de caoutchouc.

1.3 Utilisation du caoutchouc

Les applications du caoutchouc sont très variées. Il est utilisé dans toutes les industries notamment l'industrie automobile. Le britannique Dunlop a eu l'idée d'utiliser le caoutchouc dit vulcaniser comme une enveloppe remplie d'air pour entourer les roues. Ainsi, prend-il son essor et est-il massivement utilisé dans les nouveaux moyens de transport. A partir de là, on invente les pneumatiques donnant le jour aux premières voitures sans chevaux ; c'est-à-dire, les voiture à vapeur et à pétrole qui étaient équipées de pneus pleins jusqu'à l'invention de Michelin qui fabriqua le pneu pour automobile [2].

Actuellement, le caoutchouc a sa place dans la fabrication de beaucoup de produits [3]. Il est employé principalement dans le domaine des applications dynamiques : pneumatiques, supports moteurs, flexibles de circuits hydrauliques, articulations élastiques etc..., mais aussi dans d'autres secteurs comme le bâtiment, les industries mécaniques, électriques, chimiques et nucléaires, les loisirs, l'habillement et les ponts et chaussées.

1.4 Déchet de caoutchouc

Dans la réglementation algérienne, la loi 01-19 du 12 Décembre 2001 définit le déchet comme un résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et de manière générale comme une substance, produit ou bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire ou qu'il est obligé de s'en défaire ou de l'éliminer.

Le secteur d'appareillage électroménager (chutes de fabrication, pièces usagées) et celui du transport (des pneumatiques usagés) dont le nombre de véhicule est en perpétuelle augmentation engendrent, chaque année, une quantité prépondérante de déchets de caoutchouc dans tous les pays [4]. Ainsi, le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations pour l'environnement. C'est pourquoi, il est nécessaire, de trouver des filières de valorisation complémentaire. L'article 5 du même décret suggère une classification des déchets comme suit:

- (I) déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux ;
- (II) déchets ménagers et assimilés ;
- (III) déchets inertes.

Plus tard, le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 classe le caoutchouc et les pneus comme déchets spéciaux.

Selon Batayneh et al. [5], plus de 275 millions de pneus usagés sont stockés à travers les Etats Unis. Le poids approximatif de pneus usagés génère chaque année aux USA environ 3.6 millions de tonnes [6]. Le nombre de pneumatiques augmente, en effet, plus de deux billions de pneus usagés sont stockés à travers les USA, selon un rapport récent de l'Agence Américaine de protection de l'environnement (U.S EPA), avec des difficultés d'exploitation de ces stocks à cause du coût élevé [3].

L'Algérie, quant à elle, importe chaque année depuis 2004, 50 000 tonnes de pneumatiques en caoutchouc, d'après l'Agence Nationale de Promotion du Commerce

Extérieur. L'Algérie se retrouve, chaque année, avec 46000 tonnes de pneus usagés vu que chaque pneu neuf génère un pneu usagé moins massif à cause de l'usure [4].

D'après Faten [7], les pneus usagés peuvent être classés en deux catégories :

- Les pneumatiques usagés réutilisables : les experts contrôlent l'état de solidité des pneus après une certaine durée de service et s'ils sont encore solides, ils peuvent être encore vendus au marché d'occasion. On les recharge avec une bande de roulement, ce qui permet de leur offrir un nouveau cycle de service.
- Les pneumatiques usagés non réutilisables : ceux-là ne peuvent pas être rechapés. Mais ils peuvent être valorisés énergétiquement (cimenteries, centrales thermiques), ou sous forme de matière première (granulats, fibres) ou simplement jetés dans les décharges.

1.5 Traitement des pneus usagés

Les pneus usagés peuvent être récupérés lors du démontage des pneumatiques sur les points de vente. Ensuite, les collecteurs transmettent ceux qui sont réutilisables aux centres de recharge ou au marché d'occasion. Quant aux pneus non réutilisables, une partie est valorisée énergétiquement (cimenteries, centrales thermiques) ou est utilisée après broyage, sous forme de granulats dans le domaine du génie civil [8].

Le tableau 1.2 présente la situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés. On constate que certains pays Européens et le Japon ont réussi à réduire la quantité de déchets pneumatiques placés dans les décharges grâce à certains modes de traitement.

Tableau 1. 1: Situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés [3].

Type de traitement	USA (%)	U.K (%)	Allemagne (%)	France (%)	Italie (%)	Belgique (%)	Pays Bas (%)	Japon (%)	Suède (%)
Décharge	58	23	9	45	40	10	-	12	5
Retraitement	19	31	18	20	22	20	60	24	12
Energie	11	27	45	15	23	30	28	39	64
Export	5	3	16	4	2	25	-	6	7
Recyclage	7	16	12	16	12	15	12	19	12

1.6 Les constituants

Le caoutchouc est un matériau essentiel dans la constitution d'un pneumatique : il représente environ 48% de son poids. De plus, les pneus sont non seulement renforcés par des armatures métalliques qui constituent 15% de leurs poids pour augmenter le niveau de performance, mais également par des fibres textiles qui constituent 5% de leur poids pour alléger le poids tout en conservant leurs propriétés d'endurance. Chaque pneu se compose de latex, matière de base du caoutchouc naturel, et de caoutchouc synthétique du pétrole. Cet alliage a permis d'améliorer les caractéristiques des pneus [9]. Le tableau 1.2 présente la composition moyenne d'un pneu de véhicule léger en Europe.

Tableau 1. 2 : Composition moyenne d'un pneu de véhicule léger en Europe d'après [10].

Matériau/ élément	Pourcentage massique (%)
caoutchouc	48
Noir de carbon	22
Acier	15
Textile	5
Oxyde de zinc	1
Soufre	1
Additifs	8

1.7 Nécessité de recyclage des pneumatiques

D'énormes quantités de déchets pneumatiques sont générées à cause du développement de l'industrie automobile et de l'utilisation croissante de la voiture comme moyen de transport principal. Pour remédier à cette situation, des travaux de recherches approfondis ont été réalisés dans le but de valoriser ces déchets. Etant donné que les déchets de caoutchouc ne se dégradent pas dans la nature, son accumulation engendre d'énormes stocks et de sérieux problèmes environnementaux.

De Brito et Saikia [11] ont souligné que le stockage de ces pneumatiques usagés nous oblige à rechercher de nouveaux espaces. En effet, les pneumatiques sont des produits volumineux (75% de l'espace occupé par un pneu représente des vides). C'est pourquoi de nombreux pays ont interdit la mise en décharge des pneus usagés d'où l'importance de recycler ce matériau en l'introduisant dans les cycles de fabrication d'autres produits.

L'utilisation des déchets de caoutchouc dans la production du béton est une voie prometteuse et peut fournir plusieurs options de gestion [11].

En outre, le processus de déchetage et de broyage des pneumatiques diminue considérablement le volume occupé, mais augmente le coût. En parallèle, il est de plus en plus difficile de trouver des sites pour stocker les pneus usagés ; ceux déjà existant étant saturés. Par exemple, la France, générant plus de 10 million de pneus usagés annuellement, a amorcé une tendance de diminution des décharges à partir de Juillet 2013, en réponse à une nouvelle loi interdisant la mise en place de nouvelle décharge [6].

Toutefois, en Europe, on constate une diminution spectaculaire de la mise en décharge des pneus usagés qui passe de 62% en 1994 à 4% en 2010 (Figure 1.1). Pour la même période, 96% des pneus usagés reprennent une nouvelle vie par rechapage, recyclage ou comme source d'énergie [12].

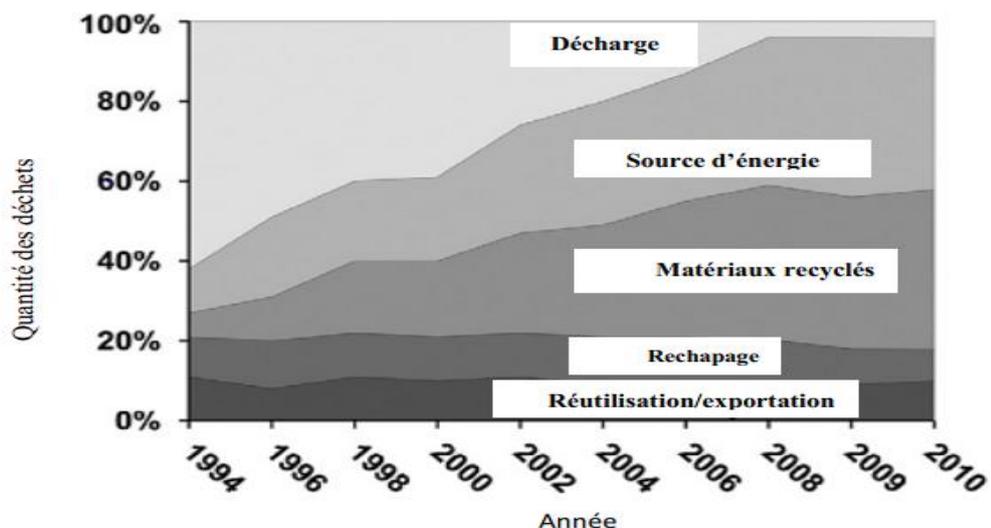


Figure 1. 1: Modes de traitement des déchets pneumatiques en Europe [12].

Sur le plan environnemental, la mise en décharge des déchets caoutchouteux constitue un véritable danger écologique en cas d'incendie non seulement à cause des fumées toxiques dégagées mais aussi à cause de la difficulté à éteindre l'incendie en présence du caoutchouc. D'autre part, le volume des vides élevés occupés par les pneus alimente le feu en oxygène et complique l'opération de lutte contre l'incendie. En effet, un grand incendie de pneumatiques risque de durer des semaines et voire des mois avec, parfois, des conséquences dramatiques sur l'environnement ; c'est le cas de la Virginie (Etats-Unis) où, en 1983, un

feu ayant consommé 7 millions de pneus a duré pendant près de neuf mois, polluant les sources d'eau situées à proximité [13,14].

1.8 Valorisation des pneus usagés :

Les pneumatiques usagés sont recyclés de différentes manières dans les applications industrielles à savoir les infrastructures routières (la construction des routes), le remplissage d'aire de jeux, en génie civil et dans d'autres produits. Pour les recycler, on utilise surtout le broyage et le granulage. Cependant, bon nombre d'études s'intéressent à la question de la faisabilité de l'utilisation du caoutchouc recyclé de pneus usagés dans la fabrication des amortissants et absorbants phoniques. Les pneumatiques peuvent être valorisés en entier ou sous forme de demi-produits. Actuellement, les pneumatiques sont valorisés de trois manières :

- la valorisation énergétique (incinération),
- la valorisation chimique (pyrolyse, dévulcanisation)
- la transformation mécanique (production de poudrettes ou granulés).

1.8.1 La valorisation énergétique : l'incinération

Vu son origine polymérique, le pneumatique apporte beaucoup d'énergie. Les déchets pneumatiques sont très compétitifs par rapport à d'autres types de combustible, notamment le charbon qui produit une grande énergie (18.6 à 27.9 MJ/kg) mais qui reste quand même nettement inférieure à celle du pneumatique qui peut produire jusqu'à 32 MJ/kg [12].

De plus, l'utilisation de pneumatiques dans la cuisson du clinker dans les fours à ciment émet moins de poussière, de dioxyde de carbone, d'oxydes d'azote et de métaux lourds (à l'exception du zinc) en comparaison au charbon. Donc, l'utilisation de ce matériau est plus respectueuse de l'environnement. En outre, l'incinération du charbon avec du caoutchouc broyé est plus bénéfique en termes d'efficacité thermique dans le fonctionnement des chaudières et des fours à vapeurs pour la production de vapeur, d'énergie électrique, du papier, de la chaux et de l'acier. Les quantités de gaz et les poussières émises ne dépassant pas les limites admissibles [12].

1.8.2 Le rechapage

Le rechapage consiste à substituer la couche de revêtement, c'est-à-dire la bande de roulement du pneu usagé pour prolonger sa durée de vie lorsqu'il aura atteint sa limite d'utilisation et le remettre en service. Cela est valable seulement pour les pneus usagés dont

la carcasse n'est pas endommagée. Ces derniers sont d'abord raclés puis brossés, ensuite une nouvelle bande de roulement est placée (Figure 1.2).



Figure 1. 2 : Pose d'une bande de roulement sur un pneu usagé [15].

Toutefois, ce traitement des pneus usagés produit des déchets sous forme de poudrette de caoutchouc. Le rechapage des pneus s'effectue selon deux procédures : à chaude ou à froid.

Dans le premier cas, le mélange de caoutchouc frais avec le volume requis est installé sur la carcasse, puis l'ensemble est vulcanisé dans des moules pour produire le motif de la bande de roulement, à une température allant de 150°C à 180°C. Pour produire de nouveaux pneus rechapés, on utilise 30% d'énergie et 25% de matière premières. C'est pourquoi, cette technique est économiquement rentable [12].

Dans le 2^{ème} cas (le procédé à froid), la carcasse nettoyée est enveloppée d'une couche d'un mélange de caoutchouc, agissant comme un liant et une bande de roulement ayant déjà été vulcanisée. L'ensemble est pressé sur la carcasse grâce à des enveloppes spéciales en caoutchouc ensuite vulcanisé dans un autoclave à environ 100°C pendant 4 à 5 heures.

1.8.3 Le broyage

Cette opération permet de déchiqeter le pneu en particules de tailles et de formes différentes. Actuellement, il est normal de broyer un pneu en grains de haute qualité de caoutchouc recyclé après lui avoir ôté les fils métalliques et les textiles. Ces derniers, eux

aussi, peuvent être recyclés. On retire l'acier à l'aide d'aimants et les fibres de tissu au moyen d'aspirateurs industriels. Grâce au développement des broyeurs de caoutchouc, on peut produire, aujourd'hui, des particules de caoutchouc contenant des quantités négligeables de fils métalliques à un taux résiduel inférieur à 0.05% [8].

On peut utiliser les copeaux de caoutchouc dans diverses applications comme voie de drainage dans les décharges, ou comme remblai léger ou pour maîtriser l'isolation thermique. Quant aux fibres métalliques extraites de pneumatiques usés, elles sont, elles, valorisées sous forme de fibres dans les bétons pour renforcer leur propriétés mécaniques [16].

Le tableau 1.3 et la figure 1.3 montrent la classification des déchets pneumatiques. Ces derniers sont classés selon les dimensions des particules obtenues par broyage. Mais, Flores-Medina et al. [16] ont proposé, dans une étude récente, une classification simple basée sur l'homogénéité des particules de caoutchouc résultant du déchiquetage. Ces dernières (granulats, poudrette) peuvent être valorisées sous forme de granulats dans les bétons destinés aux revêtements de salle de sport ou de salle de jeux pour enfant, ou des routes ; elles peuvent être aussi employées dans la fabrication des tapis et des semelles de chaussures etc....

Tableau 1. 3: Classification des déchets pneumatiques en Europe, Post-Consumer tire Materials, CEN (2004), et aux Etats Unis, ASTM (1998) [17].

prEN 14243:2004 (Europe)		ASTM D6270-98 (Etats Unis)	
Désignation	Dimension	Désignation	Dimension
poudre fine	< 500 µm	granulé	425 µm- 12mm
poudrette	< 1 mm	broyé	425 µm- 2mm
granulé	1-10 mm	copeaux	12-50 mm
copeaux	10-50 mm	déchiqueté	50- 305 mm
déchiquetât	50-300 mm	copeaux rugueux	50x50x50 < X < 762<50<100

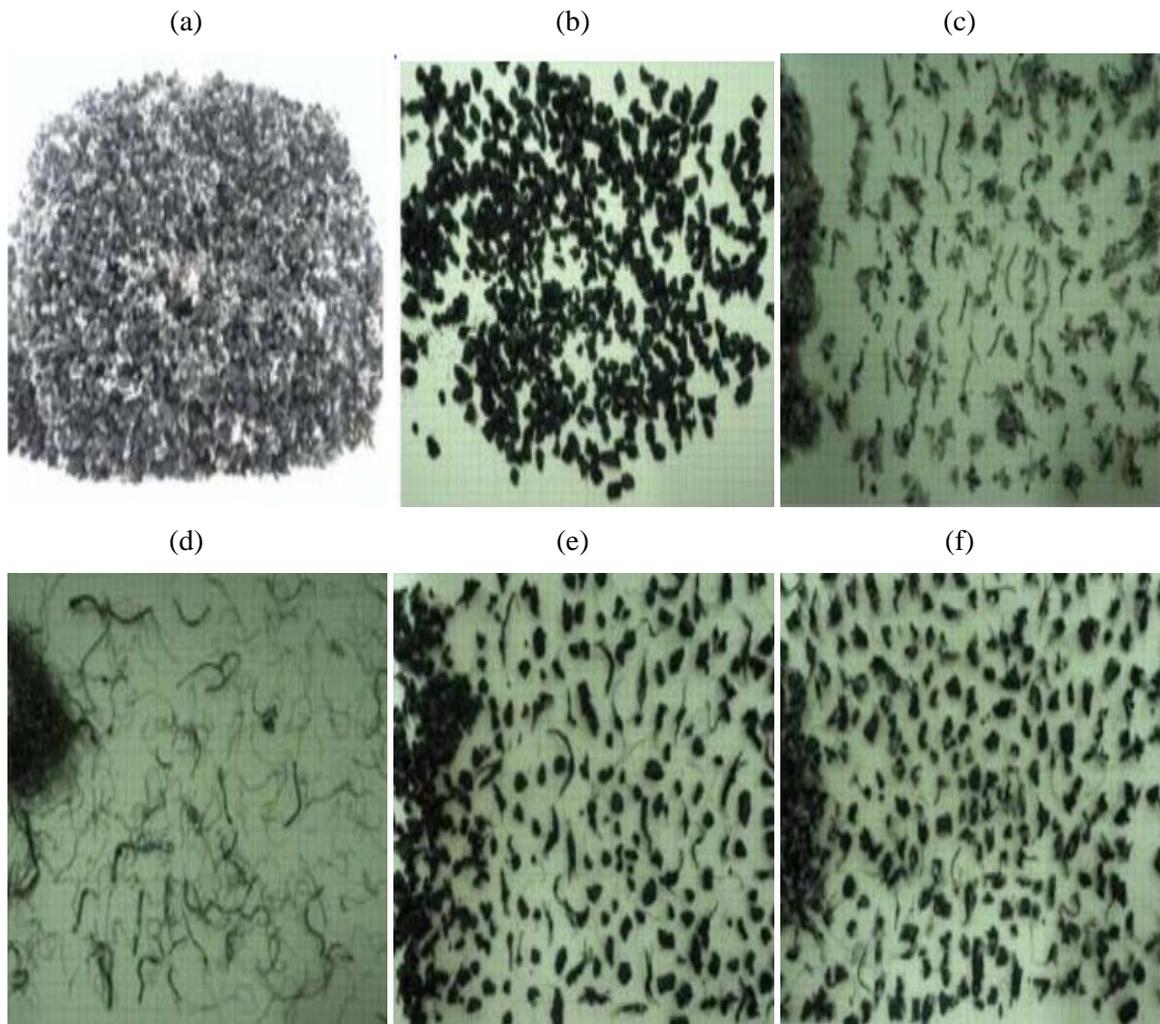


Figure 1. 3 : Formes de déchets pneumatiques [16]. a) déchet de pneu à l'état brut, b) particules de caoutchouc seul, c) textile +caoutchouc +fibres d'acier d) fibres d'acier, e)fibres d'acier +caoutchouc, e, f) fibres d'acier +caoutchouc.

Le processus de broyage des pneumatiques peut être réalisé selon l'une des techniques suivantes [12,14,18]:

1.8.3.1 Processus mécanique

La première technique permet de découper les pneus suivant un processus mécanique répété (le même processus mécanique) à une température ambiante normale, jusqu'à ce qu'on obtienne les dimensions souhaitées, mais la surface du produit obtenue est plus ou moins rugueuse, la limite de la taille inférieure est de 0.3 mm. Le broyage mécanique des pneus produisant d'importantes quantités de chaleur, il est donc nécessaire de doter les lignes de traitement d'un dispositif de refroidissement pour éviter le risque de combustion spontanée du caoutchouc broyé.

1.8.3.2 Déchiquetage cryogénique

Dans la seconde technique, on utilise l'azote liquide avec des températures inférieures à la température de transition vitreuse, pour découper le pneumatique, c'est ce qu'on appelle le déchiquetage cryogénique. Dans cette méthode, on refroidit les pneus déjà coupés jusqu'à une température inférieure à celle de la transition vitreuse avec de l'azote liquide. Le pneu, étant congelé à une température de -80°C , est ensuite envoyé dans des broyeurs à marteaux où il est écrasé en morceaux appropriés. Ainsi, on obtient des particules très fines (inférieures à $75\mu\text{m}$).

La figure 1.4 montre des vues microscopiques de caoutchouc broyé suivant les deux méthodes citées précédemment. On remarque que le broyage mécanique produit des particules de caoutchouc plus ou moins rugueuses alors que le déchiquetage, c'est-à-dire par le froid, génère des particules plus fines sous forme de poudrette à surface lisse. De plus, cette méthode est plus propre que le procédé mécanique mais vu le coût élevé de l'azote liquide, elle n'est pas économique.

Dans les deux méthodes le broyage, les cardons de textiles et les fibres d'acier sont respectivement séparés au moyen d'aspirateurs industriels et d'électro-aimants [12,14,16,18].

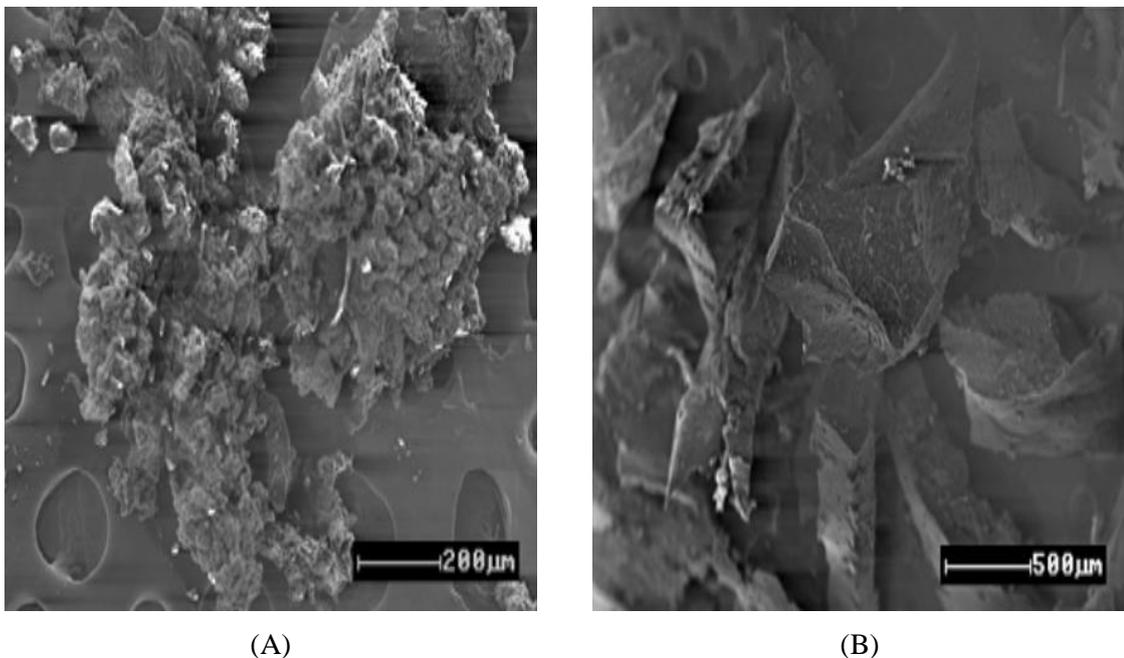


Figure 1. 4 : Etat de la surface des particules de caoutchouc broyé; A) à la température ambiante, B) cryogéniquement [12].

La figure 1.5 illustre un schéma typique des différentes étapes de granulation des pneus usagés.

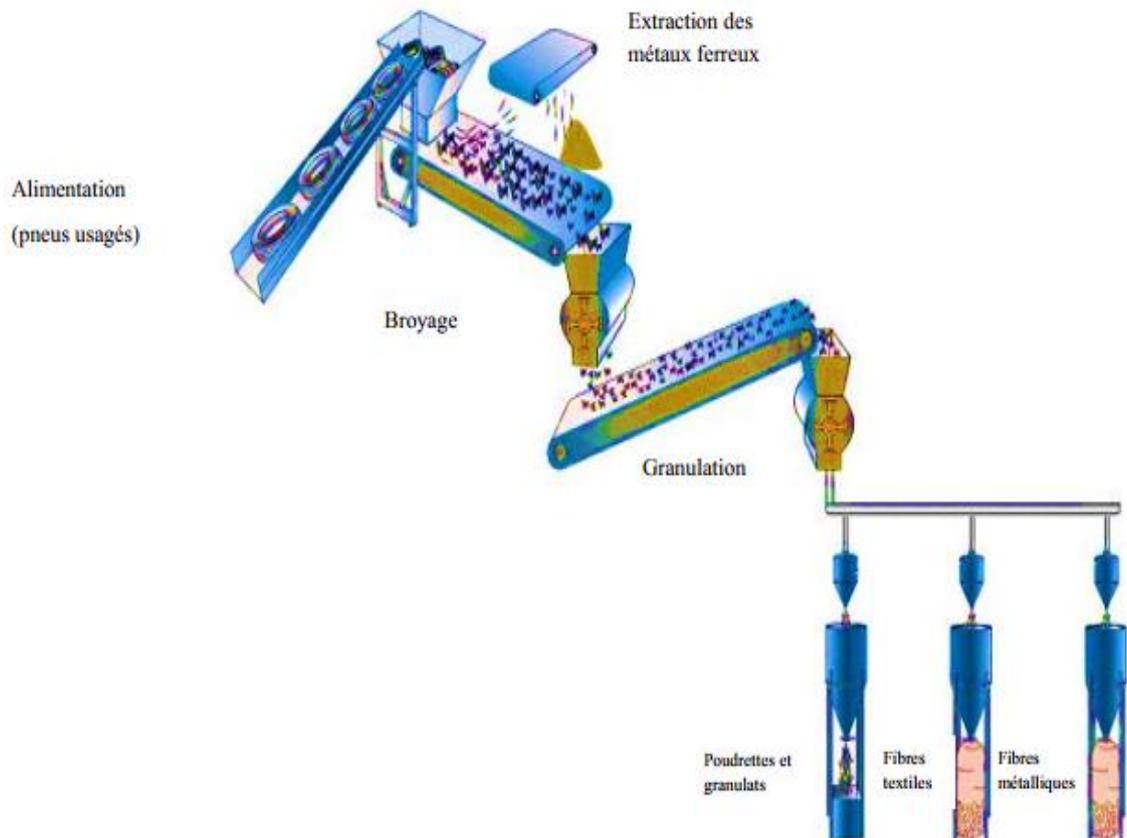


Figure 1. 5: Schéma du principe de granulation des pneus usagés [10].

1.9 Influence du caoutchouc sur les propriétés du béton à l'état frais

Dans cette partie, nous allons montrer l'influence des granulats de caoutchouc sur les propriétés du béton à l'état frais.

1.9.1 Ouvrabilité du béton vibré

Khatib et Bayomy [19], Albano et al.[20], Khaloo et al. [21], ont rapporté que la substitution des granulats naturels par des particules de caoutchouc permet de réduire l'affaissement de manière proportionnelle. Ils ont précisé, par ailleurs, que la taille des particules joue un rôle prépondérant dans l'ouvrabilité du béton : plus la particule est fine plus l'ouvrabilité est meilleure.

Dans le même cadre, Elchalakani [22] a ajouté une quantité suffisante d'une combinaison de poudre et de granulats de caoutchouc au béton. Cette combinaison lui a donné une bonne maniabilité par rapport au béton de référence.

De même, si les classes et le pourcentage de granulats de caoutchouc dans le béton frais augmentent, la maniabilité diminue. Cette baisse est probablement due à la friction de ces composants avec les granulats naturels [23].

Dans le même contexte Güneyisi et al. [24] ont analysé l'effet de la substitution partielle du volume total de granulats naturels (de 2.5 à 50%) par le caoutchouc sur les propriétés du béton. Ils ont constaté que plus on emploie de caoutchouc et plus l'affaissement est quasi nul avec un taux de remplacement de l'ordre de 50% (Figure 1.6). Youssf et al. [25] ont indiqué que l'on peut contrôler la maniabilité du béton caoutchouté par l'utilisation d'une part de superplastifiant de 1 à 3% en poids en ciment et d'autre part, par un agent colloïdal.

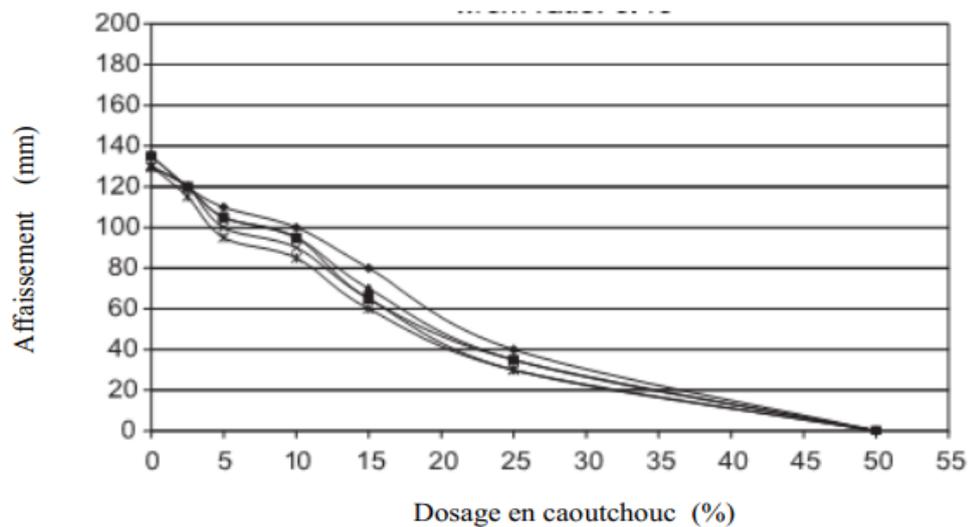


Figure 1. 6 : Variation de l'affaissement du béton en fonction en fonction du contenu en caoutchouc [24].

Par ailleurs, la méthode de broyage des pneus a un effet sur l'affaissement, selon Holmes et al. [23]. En effet, les mélanges de béton conçus à partir de granulats de pneus broyés mécaniquement présentent un affaissement inférieur à ceux conçus avec des caoutchoucs broyés cryogéniquement. Ils expliquent cette différence dans l'affaissement par la grande rugosité de la surface des particules obtenues mécaniquement.

Au contraire, Boudaoud et Beddar [26] ont constaté que l'ajout du caoutchouc dans le béton améliore légèrement sa maniabilité laquelle se traduit par un affaissement supérieur

par rapport au béton de référence (Figure. 1.7). Sachant que, F1 et F2 représente les mélanges qui contiennent des grains de caoutchouc de taille (10/12 mm) et (10/12mm et 16/20mm) respectivement.

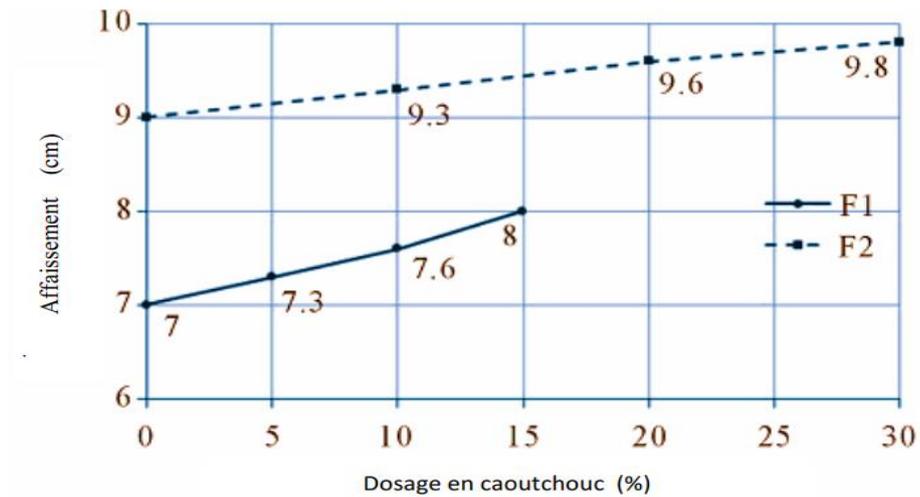


Figure 1.7 : Variation de l'affaissement du béton en fonction de la teneur en caoutchouc [26].

Dans le même contexte, Aiello et al. [27] ont aussi remarqué que la substitution partielle de gravillons ou de fines naturelles par des granulats de caoutchouc améliore légèrement l'ouvrabilité du béton. Selon eux, le béton contenant du caoutchouc a un comportement hyper fluide par rapport au béton témoin qui a quand même un comportement fluide.

D'autre part, Khaloo et al. [21] ont constaté que le béton caoutchouté présente une ouvrabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de mise en place et de finition (Figure 1-8). Toutefois, ces auteurs proposent de chercher d'autres méthodes pour quantifier correctement l'affaissement d'un béton caoutchouteux, étant donné que la méthode employée pour mesurer l'affaissement est inappropriée.

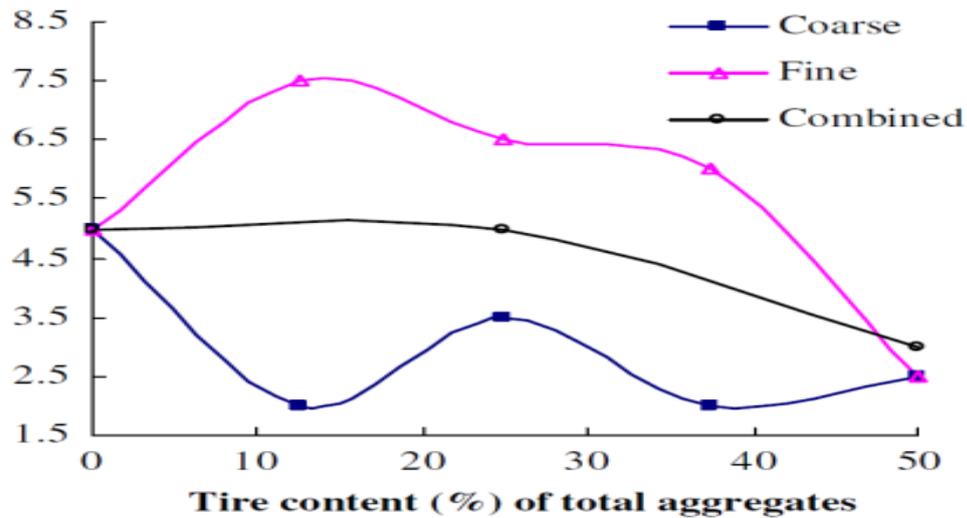


Figure 1. 8 : Influence de G.C. sur l'affaissement [21].

1.9.2 Ouvrabilité des BAP

Concernant l'effet de caoutchouc sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants, Gesoglu et al. [28] et Erdogan et al. [29] ont montré que les différentes formulations des bétons autoplaçants caoutchoutés sont conçues pour donner un étalement par le cône de $700 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. Ceci ne peut être atteint que par l'utilisation d'une quantité variable et croissante de superplastifiant et d'agent colloïdale en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc. Cependant, l'augmentation du taux de caoutchouc de 0 à 30% a augmenté le dosage en adjuvant de 2.8 à 3.6 kg/m^3 de béton frais. L'augmentation de la teneur en caoutchouc réduit le rapport des hauteurs de la boîte en L qui doit être supérieur ou égal à 0.8.

Garros [30] a montré que l'inclusion des granulats de caoutchouc dans les bétons autoplaçants entraîne des modifications des propriétés rhéologiques à l'état frais. La modification la plus importante est celle qui montre la chute de l'étalement en fonction de l'accroissement du taux de substitution. La conclusion de Garros focalise sur le fait que l'augmentation du taux de substitution en granulats de caoutchouc se fait au détriment de l'ensemble des paramètres rhéologiques considérés. Cette inclusion conduit à des mélanges plus visqueux et présentant des seuils de cisaillement plus importants. De même, Erdogan et al. [29] confirment les conclusions de Garros, mentionnant que le mélange d'un béton autoplaçant devient plus visqueux et que son étalement chute avec l'augmentation du taux de substitution en granulats de caoutchouc. Bignozzi et al. [31] ont montré que toutes les formulations des bétons autoplaçants incorporant des granulats de caoutchouc répondent aux critères caractérisant les bétons autoplaçants à l'état frais en augmentant progressivement la

quantité d'adjuvants. De plus, elles présentent une bonne stabilité en milieu confiné et non confiné et une bonne résistance au passage à travers les obstacles.

De plus, Ganesan et al. [32] ont décrit que la réduction de la fluidité est causée par l'incorporation du caoutchouc et peut être corrigée par l'augmentation du dosage de SP dans le mélange. Ils ont produit un béton autoplaçant avec un rapport H_2/H_1 supérieur à 80%, pour un taux de substitution du caoutchouc de 15 et 20 %. Cependant, Rahman et al. [33] ont rapporté l'inverse. L'augmentation du dosage de SP a un effet négatif sur la fluidité et provoque plus de blocage.

D'après les divers résultats rapportés dans la littérature, il semble que l'ouvrabilité du béton contenant du caoutchouc de pneus usagés dépend essentiellement de la taille, de l'origine et du taux de remplacement des particules utilisées.

1.9.3 Les masses volumiques et l'air occlus

La composition d'un béton frais principalement la densité des granulats utilisés intervient dans sa masse volumique. La masse de caoutchouc étant plus légère que celle des granulats naturels, le béton caoutchouté a, donc, une masse volumique inférieure à celle du béton de référence. D'après l'ACI comité 213 [34] qui a classifié les bétons légers, on peut penser à produire des bétons légers en y incorporant des granulats de caoutchouc.

La littérature rapporte que la présence de granulats de caoutchouc dans une matrice cimentaire rend le béton plus léger. Khatib et Bayomy [19], Siddique et Naik [6], ont justifié cette réduction de la densité par la faible densité du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels.

D'après Guneyisi et al. [24], lorsqu'on remplace les granulats naturels par 50% de granulats de caoutchouc la masse volumique peut diminuer de 25% par rapport au béton témoin. Dans le même sens, selon Kaloush et al. [35], pour chaque quantité égale à 22.7 kg de granulats de caoutchouc incorporé au béton, on obtient une réduction de masse volumique du béton frais de l'ordre de 102 kg/m³.

La chute de la masse volumique du béton caoutchouté peut être également liée à la teneur en air occlus [36,37]. Toujours selon ces auteurs, l'air emprisonné dans la surface rugueuse du caoutchouc permet d'alléger le béton. D'autres chercheurs sont arrivés à la même constatation [6,26].

D'après Khatib et al. [19], la figure 1.9 montre la tenue de l'air occlus dans le béton caoutchouté en fonction non seulement du taux de remplissage des granulats de caoutchouc mais aussi de la fraction substituée. Ils ont remarqué que lorsqu'on remplace le gravier par de gros granulats de caoutchouc, la teneur en air occlus est inférieure à celle obtenue avec des granulats fins, mais cette différence n'est remarquable qu'à partir de 30% de substitution. Ils expliquent cette différence pour le même volume de granulats par la compacité plus élevée des gros granulats de caoutchouc.

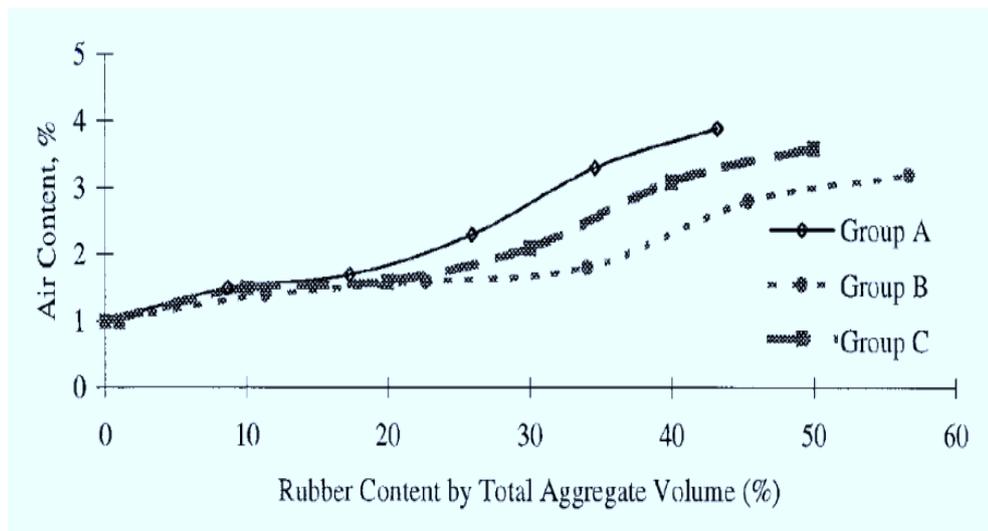


Figure 1. 9 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus [19].

Mais, Fedroff et al. [38] ont souligné que, même sans agent entraîneur d'air, la teneur en air occlus dans le béton caoutchouté est plus importante que dans le béton ordinaire. Pour ces chercheurs, l'élévation de la tenue en air occlus dans le béton incorporant des granulats de caoutchouc est due à la granulométrie ouverte et surtout à la surface rugueuse du caoutchouc qui retient des bulles d'air.

1.10 Influence du caoutchouc sur les propriétés à l'état durci

1.10.1 Résistance à la compression

La littérature a montré que la taille et le taux des particules de caoutchouc utilisés dans une matrice cimentaire pour remplacer les granulats naturels affectent la résistance à la compression. Cela est dû aux propriétés physiques et mécaniques du caoutchouc différentes de celles des granulats naturels.

D'après Eldin et Senouci [39], le béton conçu à base de granulats de caoutchouc se caractérise par une résistance plus faible que celle du béton de référence. En effet, ils ont

constaté que la résistance du béton diminue de 85% et de 65% lorsque la totalité des granulats grossiers et fins ont été respectivement remplacés par le caoutchouc. Quant à Khatib et al. [19], ils estiment qu'un béton incorporant plus de 60% de caoutchouc présente une chute de l'ordre de 90% de la résistance à la compression. Ils ont donc recommandé de limiter le taux de substitution à 20% du volume total du squelette granulaire (Figure 1.10).

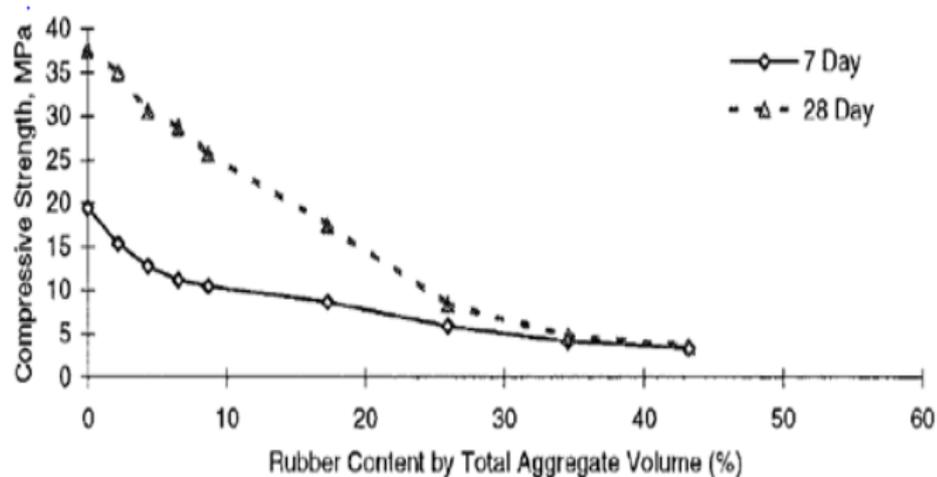


Figure 1. 10 : Influence de l'adjonction de GC sur la résistance en compression [19].

Blessen et al. [40] qui ont indiqué que le taux de substitution ne doit pas dépasser les 20%. Les auteurs ont souligné que l'utilisation du caoutchouc traité ou revêtu avec des agents de couplage permet d'éviter une forte chute de la résistance à la compression.

Topçu [41], quant à lui, s'est intéressé à d'autres paramètres à savoir la taille et le taux de particules du caoutchouc. En effet, il a utilisé le caoutchouc sous deux formes : la poudrette de (0/1 mm) et les particules de 1/4 mm. Il a, alors, constaté que les chutes maximales de la résistance à la compression correspondent à un taux de substitution de l'ordre de 45%. Il a remarqué, aussi, que l'utilisation de gros granulats a un effet plus significatif par rapport à l'utilisation de la poudrette sur la résistance du béton.

De leur côté, Youssef et al. [25] ont souligné que la substitution du caoutchouc granulaire par des agrégats minéraux de l'ordre de 3.5% n'influe pas d'une manière sensible sur la résistance à la compression. Par ailleurs, Ganjian et al. [42] ont expliqué la diminution de la résistance à la compression du béton caoutchouté par diverses raisons :

- a. La pâte de ciment contenant des particules de caoutchouc, qui est plus douce que celle sans caoutchouc, entourerait les agrégats. Lors du chargement de cette pâte, apparaissent rapidement des fissures qui induisent une défaillance de l'échantillon.
- b. La faible adhérence entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc génèrent des fissures à cause de la distribution non uniforme des charges appliquées.
- c. Les propriétés physiques et mécaniques des granulats du caoutchouc, qui sont différentes de celles des granulats naturels, diminuent la résistance à la compression.
- d. Lors de la vibration, le caoutchouc, en raison de sa faible densité et de son manque de liaison avec les autres constituants du béton, a tendance à se déplacer vers le haut créant une concentration de caoutchouc au niveau de la couche supérieure. Ainsi, ce béton non homogène présente une résistance réduite.

En ce qui concerne le béton autoplaçant, Garros [30] a montré l'impact du dosage et de la taille des granulats de caoutchouc sur les propriétés du BAP. Une chute de la résistance à la compression de l'ordre de 86% a été observée dans les BAP les plus dosées en granulats de caoutchouc. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

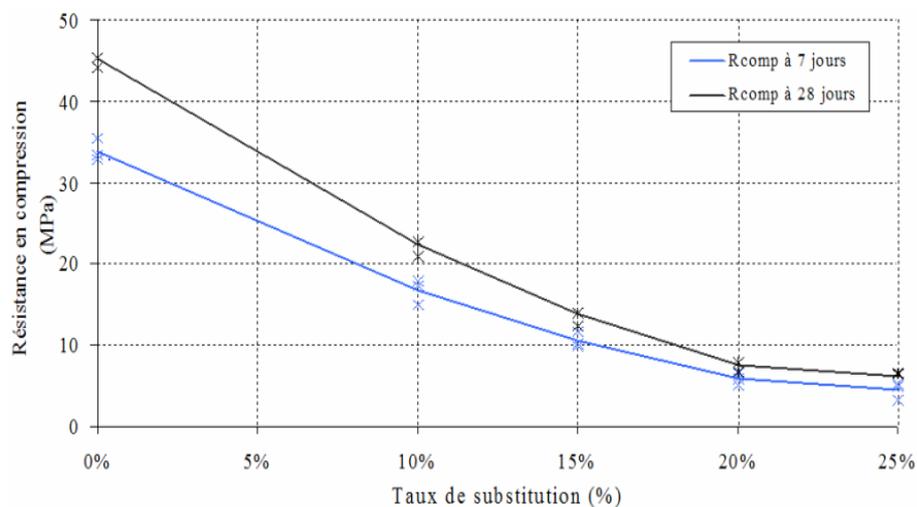


Figure 1. 11 : Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours [30].

Gesoglu et al. [28] ont confirmé la chute de la résistance à la compression du BAP contenant des granulats de caoutchouc. La variation passe de 16,8 à 71,3 MPa et de 20,8 à

86,7 MPa à 28 et 90 jours respectivement pour le béton de référence et pour celui de 20% de substitution.

Quant à Wang et al. [43], ils ont utilisé trois classes granulaires de caoutchouc. Ils ont constaté que, quelque soit la classe granulaire de caoutchouc utilisé, la diminution de la résistance à la compression est significative. Néanmoins, l'utilisation de 5% de la classe 30 engendre une résistance à la compression de l'ordre de 96% par rapport au béton de référence.

1.10.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton est faible par rapport à la résistance à la compression, mais on doit la connaître pour caractériser le béton. Généralement, des essais de traction par flexion ou par fendage dit brésilien permettent de déterminer indirectement la résistance à la traction du béton. L'ajout de granulats de caoutchouc au béton a un effet préjudiciable vis-à-vis de la résistance à la traction du béton.

Selon Su et al. [44], la substitution de 20% de granulats fins par des granulats de caoutchouc engendre une réduction de la résistance à la traction du béton de l'ordre de 20%. Ils ont souligné que plus les particules de caoutchouc sont petites et moins significative est la perte de la résistance à la traction. En effet, les petites particules, réduisant les vides internes, impliquent une amélioration de la compacité du béton d'où la diminution du risque de fissures.

Pour Oikonomou et Mavridou [45], la résistance à la traction par fendage et celle par flexion sont moins sensibles que la résistance à la compression. Au contraire, pour Batayneh et al. [5], l'influence du caoutchouc sur la réduction des différentes résistances est presque pareille (Figure 1.12). Par ailleurs, d'après Kaloush et al. [35], la résistance à la traction par fendage diminue de manière considérable quand l'augmentation du pourcentage de granulats de caoutchouc dans le composite augmente. Pour les auteurs, lors de l'écrasement, la déformation de l'éprouvette et la phase de ruine de l'échantillon sont plus importantes pour le béton incorporant des granulats de caoutchouc. Cela montre une meilleure capacité à la ductilité.

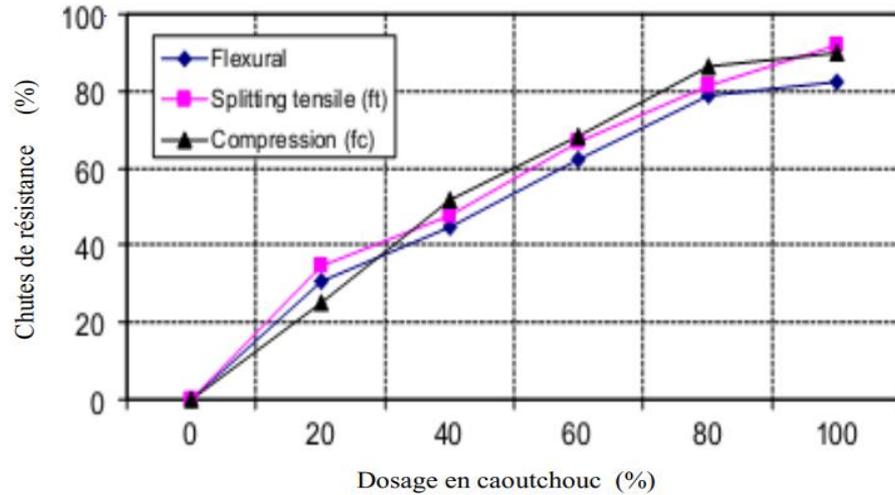


Figure 1. 12: Taux de réduction des résistances [5].

En outre, Blessen et al. [40] ont estimé que l'utilisation du caoutchouc sous formes de granulats ou de poudre diminue la résistance à la traction alors que l'incorporation du caoutchouc sous forme de fibres augmente la résistance à la traction par flexion.

Güneyisi et al. [24] ont observé une tendance baissière de la résistance en traction similaire à celle de la résistance en compression. Cependant, pour le même taux de granulats de caoutchouc, ils imputent la chute de la résistance à la traction du béton caoutchouté à deux raisons principales :

- La faible liaison entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc.
- La ségrégation de la surface entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment.

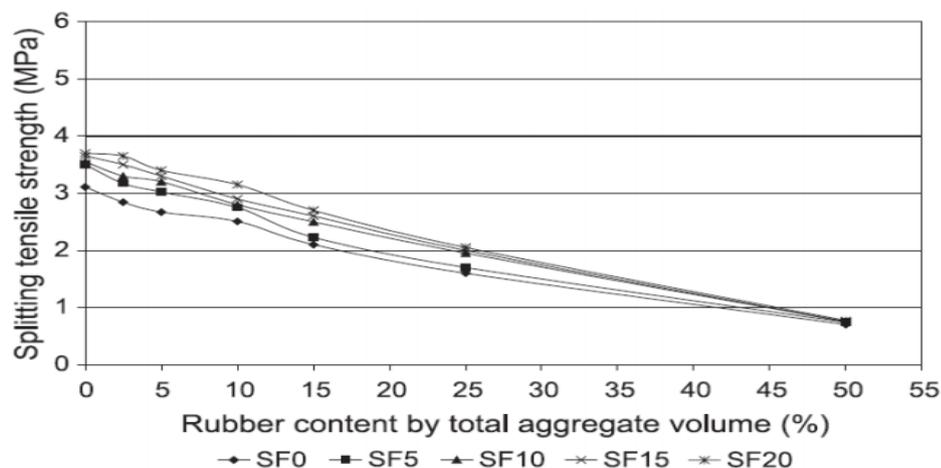


Figure 1. 13 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [24].

1.10.3 Module d'élasticité

De même que pour la résistance à la compression et celle à la traction, nombre de travaux ont confirmé que le module d'élasticité connaît une chute importante lors de l'incorporation du caoutchouc. En effet, Garros [30], Ganjian et al. [42] ont montré que la substitution en masse de gros granulats naturels de l'ordre de 10% par des granulats de caoutchouc de 25 mm, génère une diminution de 30% du module d'élasticité.

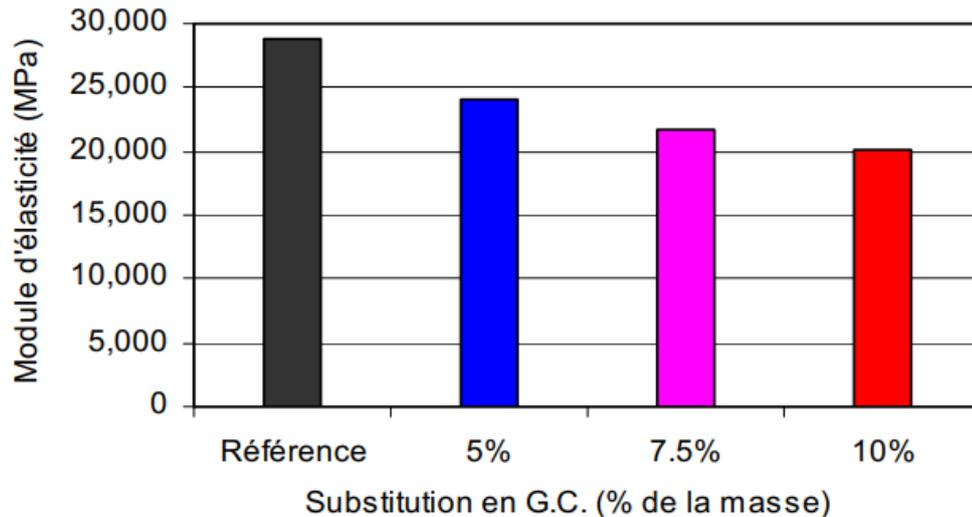


Figure 1. 14 : Influence des G.C. sur module d'élasticité [42].

En outre, selon Güneyisi et al. [24], le remplacement de la moitié du volume des granulats naturels par d'autres en caoutchouc donne naissance à une baisse du volume du module d'élasticité de l'ordre de 83% (Figure 1.15).

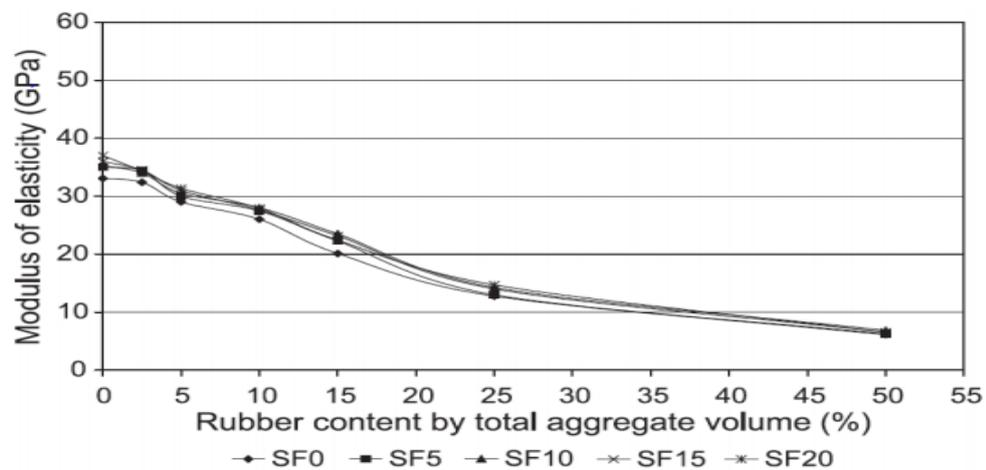


Figure 1. 15 Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice [24].

Najim et al. [46] ont montré qu'il existe une corrélation générale, mais non précise, entre le module d'élasticité et la résistance à la compression du béton. Cependant, le module d'élasticité dynamique est déterminé à l'aide un test non destructif avec zéro contrainte appliquée et, par conséquent, il n'existe ni micro fissure, ni fluage pendant le test. En conséquence, il apparaît que le module d'élasticité statique est presque égale à la tangente initiale du module d'élasticité, donc E_d est fortement influencé par le type et la quantité des agrégats.

1.10.4 Traitement de la surface des granulats de caoutchouc :

Pour de nombreux chercheurs, la chute des différentes résistances (à la compression et à la traction) du béton caoutchouté est due principalement à la faible adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc. Sous l'effet de la contrainte extérieure, l'interface entre la pâte de ciment et le caoutchouc, présentant une résistance faible, est sujette à l'apparition des premières microfissures lesquelles vont devenir des macro-fissures provoquant, par la suite, la rupture du béton. C'est pourquoi, certains auteurs ont cherché les possibilités pour améliorer la liaison entre la pâte de ciment et le caoutchouc. Parmi eux, Segre et Joekes [47] ont utilisé le MEB pour observer non seulement l'état de l'interface entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc brut, mais aussi celui avec le caoutchouc traité par NaOH avec un taux de remplacement de 10% pour les deux mélanges. Les images obtenues par MEB (Figure 1.16) ont montré une meilleure adhérence entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc traité.

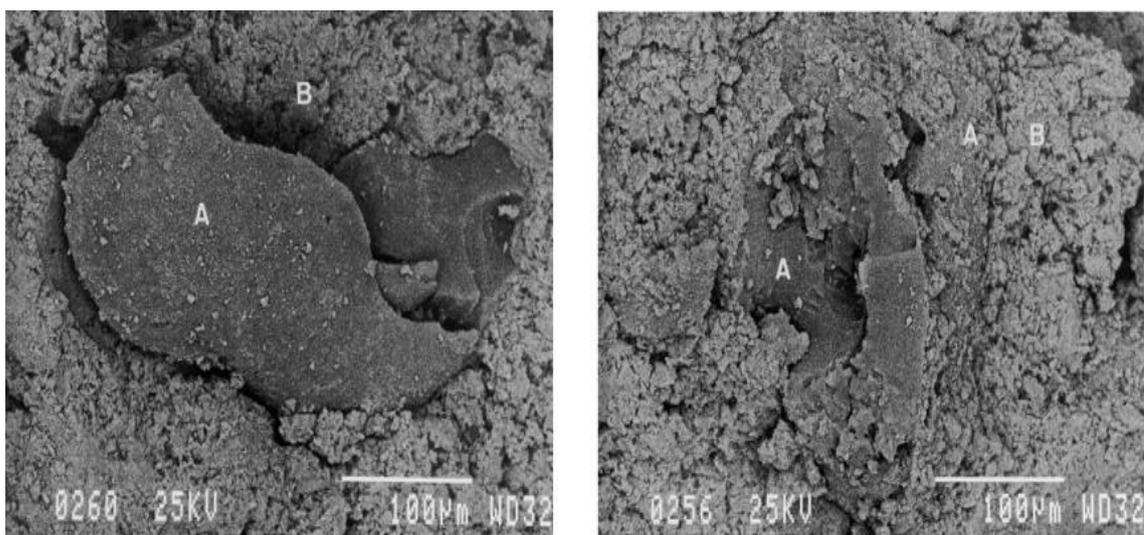


Figure 1. 16 : Surface de fracture de l'éprouvette ; dans le cas du caoutchouc à l'état brut (gauche), et dans le cas du traitement du caoutchouc dans la solution NaOH (droite) [47].

De leur côté, Xi et al. [48] ont utilisé des adjuvants c'est-à-dire le polymère acétate de vinyle (PVA) et le silane pour améliorer l'adhérence entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc. Ils ont observé que ces adjuvants améliorent la résistance du béton caoutchouté à la compression. Cependant, le PVA est plus efficace pour améliorer les performances du béton caoutchouté dans les applications en génie civil. Les auteurs recommandent de traiter la surface des granulats de caoutchouc en utilisant un adjuvant convenable.

Toutefois, Albano et al. [20] ont traité les granulats de caoutchouc avec une solution de NaOH et du silane A-174. En effet ils ont constaté que ces mesures n'avaient pas d'influence visible sur les résistances en compression et en traction. Ils n'ont pas remarqué d'effet sur l'adhérence entre la pâte de ciment et le caoutchouc.

Par ailleurs, Lee et al. [49] ont eu recours aux acides carboxyliques pour améliorer les propriétés de l'adhérence des adjuvants SBR (caoutchouc butadiène styrène). Ce dernier permet de renforcer la liaison en réduisant les écarts entre la pâte durcie et les particules de caoutchouc. Quant à Colom et al. [50], ils ont constaté que l'utilisation du caoutchouc traité avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) peut améliorer le module d'élasticité du béton caoutchouté.

1.10.5 Capacité de déformation

Sur le plan des propriétés mécaniques, toutes les analyses aboutissent à la même conclusion, à savoir que l'incorporation des granulats de caoutchouc au béton est défavorable à la capacité portante et ne présente que des inconvénients.

Mais, Turatsinze et al. [51] ont supposé que, même si le module d'élasticité des granulats de caoutchouc est plus faible que celui de la matrice cimentaire, ces inclusions fonctionnent comme des trous au moment où débouche une fissure à leur interface avec la matrice cimentaire. Ainsi, il en résulterait une relaxation des contraintes qui retarderait la coalescence des microfissures et leur transformation en macro-fissures qui permettrait d'atteindre une capacité de déformation améliorée en sachant que la capacité de déformation est la déformation atteinte avant de basculer dans le domaine post-pic que ce soit lors de la traction (directe ou non) ou de la compression. Pour vérifier leur hypothèse, les auteurs ont eu recours à une technique ancienne qui consiste à percer un trou à la pointe d'une fissure pour ralentir sa propagation. Pour valider leur hypothèse, ils ont utilisé un support de mortier dans lequel le sable a été remplacé en volume par des granulats de caoutchouc de l'ordre de

20 et 30%. Les résultats de ces mortiers caoutchouté et du mortier de référence à la traction directe sont présentés dans la figure 1.17 au moyen d'un diagramme force allongement. On constate, alors, une diminution dans le module d'élasticité (pente initiale plus faible) et dans la résistance à la traction mais un allongement nettement plus important avant le domaine post-pic dans les mortiers caoutchoutés. Les auteurs interprètent ce plateau important précédant le domaine post-pic comme une phase de multiplication des microfissures régulièrement stoppées aux interfaces des granulats de caoutchouc, retardant ainsi la coalescence de la macro-fissure.

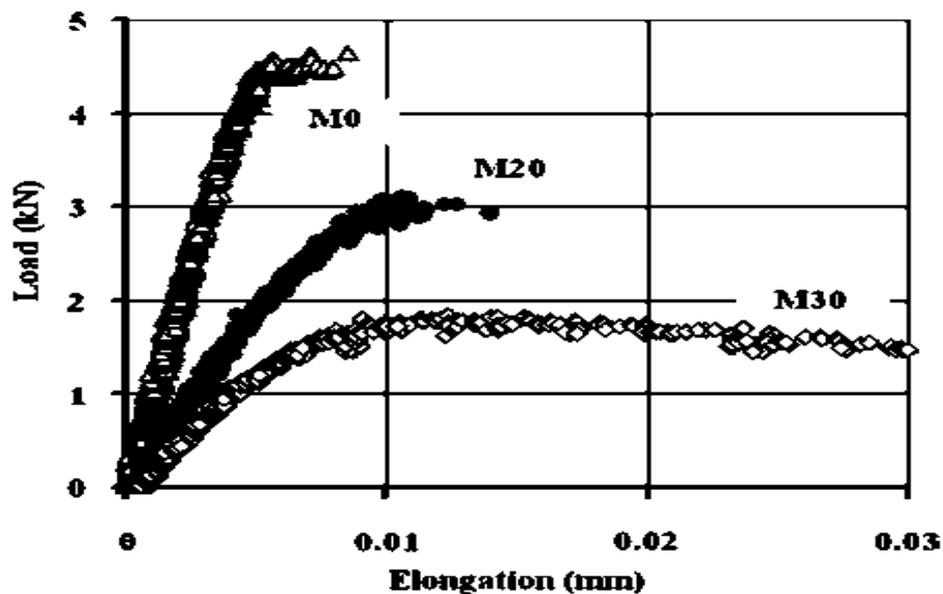


Figure 1. 17 : Influence de l'incorporation de caoutchouc sur la capacité de déformation en traction directe [51].

Une année plus tard, Sukontasukkul et Chaikaew [52] ont réalisé des essais de traction par flexion sur des blocs en béton caoutchouté ; ils ont constatés non seulement une chute de la capacité portante du béton mais aussi une augmentation significative de la flèche par rapport au béton de référence (Figure 1.18). Par ailleurs, Khatib et Bayomy [19] avaient déjà obtenu des résultats comparable. Pour eux, l'incorporation des granulats de caoutchoucs dans le béton diminue la résistance à la flexion mais permet d'atteindre des flèches plus importantes avant la ruine.

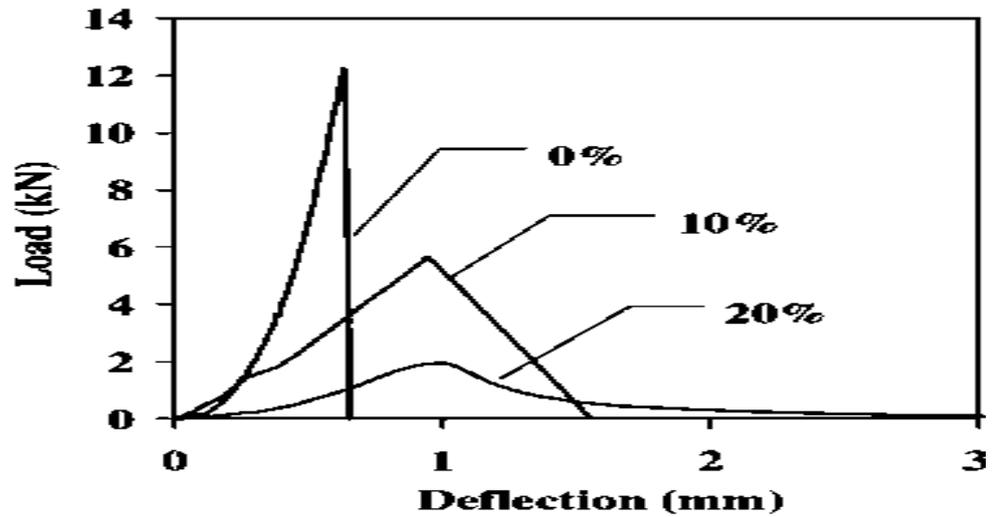


Figure 1. 18 : Comportement en flexion des blocs de béton caoutchouté [52].

Garros [30] a obtenu des résultats similaires sur le BAP et a montré que plus le taux de remplacement du sable par des granulats de caoutchouc est important (0, 30 et 50%) plus la flèche associée à la charge maximale en flexion est importante (Figure 1.19).

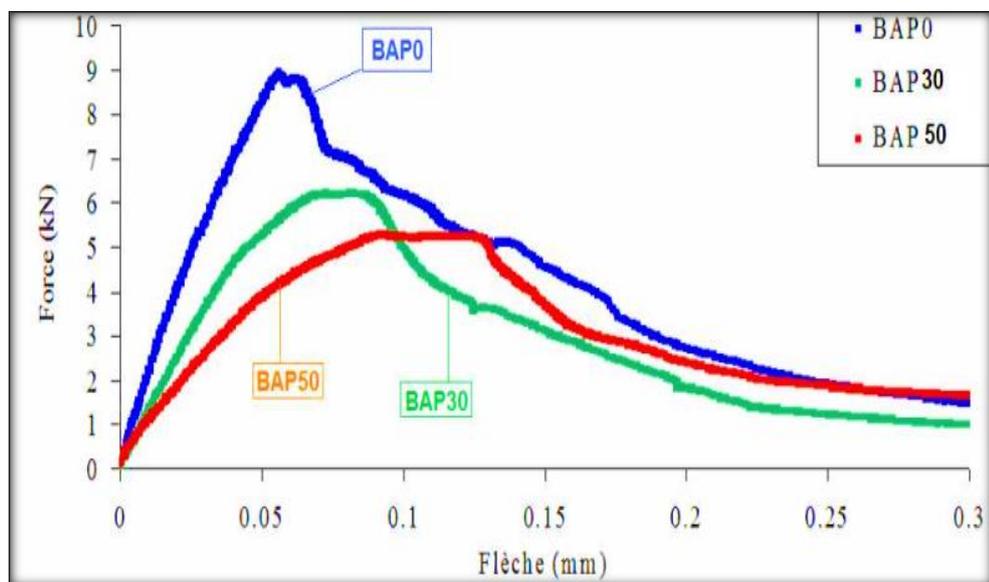


Figure 1. 19 : Courbes “force-flèche” en flexion – effet du remplacement partiel du sable par des granulats de caoutchouc dans un BAP [30].

1.10.6 Retrait

Le retrait, qui correspond à des variations dimensionnelles résultant des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons, est un facteur très important dans la pratique. Ces variations dimensionnelles peuvent provoquer souvent l'apparition de fissures précoces ou d'ouvertures conséquentes pouvant nuire à la durabilité du béton, si elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints.

Nombre de recherches ont été réalisées pour mettre en évidence l'influence des granulats de caoutchouc sur le retrait du béton. Certaines montrent que le retrait du béton caoutchouté est plus important que celui de référence. Ainsi, Turatsinze et al. [51] confirment l'augmentation du retrait du mortier caoutchouté par rapport au mortier de référence. Hobbs [53] explique essentiellement l'augmentation du retrait par la relation entre la rigidité des granulats et l'amplitude des variations dimensionnelles.

Dans le même contexte, Garros [30] en observant l'amplitude de retrait du béton caoutchouté, constate l'existence de deux phénomènes en compétition. Non seulement la présence de granulats de caoutchouc permet d'augmenter la capacité de déformation avant la localisation de la fissuration mais elle génère aussi une augmentation des variations dimensionnelles du retrait.

Pour confronter ces phénomènes, on a eu recours aux essais de retrait empêché à l'anneau qui ont permis de mettre en évidence la sensibilité des matériaux à base cimentaire à la fissuration en tenant compte des déformations dues au retrait et de la capacité de déformation du composite.

Garros [30] a utilisé un anneau en acier, équipé de jauges extensométriques autour duquel il a coulé du béton pour mesurer la déformation du coffrage intérieur sous l'étreinte du béton qui se rétracte avec le retrait. De plus, mis à part l'évolution de cette étreinte dans le temps, l'échéance de la fissuration provoque une relaxation de l'anneau en acier et permet ainsi de dater la fissuration de manière précise. Il a constaté que les mélanges de BAP contenant du caoutchouc présentent une fissuration retardée. Il a remarqué aussi que les fissures observées sur la surface du BAP caoutchouté sont plus nombreuses mais moins ouvertes par rapport au BAP témoin qui présente une fissure unique et très ouverte.

Wang et al. [43] estiment que, suite aux déformations imposées, la résistance à la fissuration est un avantage recherché. En effet, toujours d'après les auteurs, on peut

améliorer la durabilité d'un BAP en augmentant la résistance aux sulfates par l'incorporation de granulats de caoutchouc. Par ailleurs, la variation d'un retrait total à 28 jours pour les BAP caoutchoutés ou de référence est proportionnelle au taux de substitution des granulats fins naturels par la poudre de caoutchouc. Cette variation qui peut atteindre 95% pour un taux de substitution de 20%, est due à la faiblesse du module d'élasticité et à celle de la capacité de déformation du caoutchouc par rapport aux granulats naturels.

1.10.7 Mode de rupture :

Pour certains auteurs, l'incorporation des granulats de caoutchouc influe sur le mode de rupture des éprouvettes. Ces dernières présentent des déformations beaucoup plus élevées avant la rupture par rapport au béton témoin ; elles gardent plus longtemps leurs formes avant de se désagréger.

L'étude menée par Khaloo et al. [21] a permis d'analyser le comportement à la rupture du béton caoutchouté en observant l'aspect visuel et dimensionnel des éprouvettes (Figure 1-20). Les auteurs ont indiqué que l'incorporation de moins de 25% de caoutchouc dans le béton améliore son endurance, alors que l'ajout de plus de 25% peut lui nuire.



Béton de référence

Avec 25% caoutchouc

Avec 50% caoutchouc

Figure 1. 20 : Types de rupture [21].

Le temps de rupture qui est le temps de détérioration du béton est brutal et explosif pour le béton ordinaire alors qu'il est plus long pour le béton caoutchouté pour lequel la déformation à la rupture se fait graduellement. D'après Raghavan et al. [54], Khaloo et al.

[21], les granulats en caoutchouc augmentent la capacité du béton à supporter des charges supplémentaires au-delà de sa charge maximale, appelée aussi charge de rupture.

Par ailleurs, beaucoup de fissures apparaissent et celles déjà existantes s'élargissent avec l'application continue de la charge de compression. En effet, l'échantillon présente une capacité d'absorber une importante énergie plastique et de supporter de grandes déformations avant de se désagréger complètement jusqu'à ce que la charge imposée arrive au point de rupture de la liaison entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc [55].

Vu ses aspects positifs, il est conseillé d'utiliser le béton caoutchouté pour les éléments pare-chocs dans les applications de génie civil, en général, et routières en particulier.

1.10.8 Amortissement des vibrations

Pour nombre de chercheurs, le béton incorporant des granulats de caoutchouc est capable d'amortir les ondes. Khaloo et al. [21] qui considèrent que la vitesse de transfert des ondes à travers un matériau est le facteur le plus important dans la mécanique vibratoire, ont observé que la vitesse des ultrasons dans les bétons diminue de manière significative avec la présence des granulats de caoutchouc. Par conséquent, Khaloo a déduit que le composite caoutchouté est non seulement capable d'amortir une vibration mais surtout de servir d'isolant phonique.

Albano et al. [20] confirment également la constatation précédente. Ces auteurs ont, alors, comparé la vitesse des ondes ultrasoniques dans trois composites à 0%, 5% et 10% de granulats de caoutchouc. Ils ont constaté que la vitesse est inversement proportionnelle aux taux de substitution de caoutchouc. Ils ont attribué cette diminution de la vitesse ultrasonique à la faible densité du composite, ainsi qu'à la présence d'eau et de pores d'air dans le composite. Ils ont déduit que la taille des granulats de caoutchouc joue un rôle important sur la cinétique de la vitesse. En effet, plus la taille des granulats de caoutchouc est petite, plus la vitesse est réduite. (Figure 1-21).

Vu sa capacité à amortir les ondes en général, il est conseillé d'utiliser ce composite dans les applications comme les murs antibruit, les fondations des rails d'engins roulants et les assises des machines vibrantes etc...

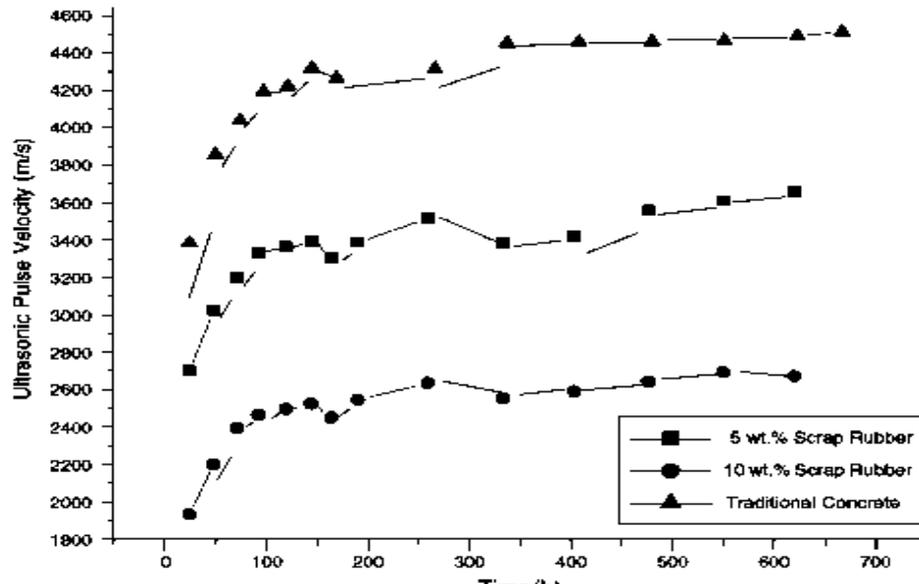


Figure 1. 21 : Influence des G.C. et du temps de conservation sur la vitesse des ondes ultrasoniques du béton [20].

1.10.9 La conductivité thermique

Pour Neville [56] les constituants de la matrice cimentaire jouent un rôle sur la conductivité, c'est-à-dire que leur nature minéralogique affecte la conductivité thermique du béton. Donc plus la conductivité thermique des granulats est faible et plus la conductivité thermique du béton est plus faible. De plus, le document Technique Unifié [57], qui stipule que le caoutchouc présente une structure amorphe et que sa conductivité thermique est faible en comparaison à celle des granulats naturels qui présentent une structure cristalline.

Par ailleurs, les travaux rapportés dans la littérature [35,58–60] indiquent que la porosité entre aussi en jeu, et qu'elle est plus importante avec l'incorporation des granulats en caoutchouc dans la formulation des matrices cimentaires, où l'air avec sa conductivité thermique beaucoup plus faible ($0,023 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$) remplit les pores à l'intérieur du béton limitant ainsi la conduction thermique. De plus, Benazzoug et al.[58], et Marie [59], ont rapporté que l'air entraîné par les particules de caoutchouc crée des zones à porosité fermée dans la matrice cimentaire, ce qui permet de réduire la conductivité thermique et d'améliorer par conséquent l'isolation du produit final.

1.10.10 Propriétés de transfert

L'absorption d'eau et la perméabilité aux fluides et aux gaz qui sont des indicateurs de durabilité des composites à base cimentaire font partie des propriétés de transfert.

1.10.10.1 L'absorption d'eau

Benazzouk et al. [61] ont étudié l'influence des deux types de granulat de caoutchouc, c'est-à-dire le caoutchouc expansif et le caoutchouc compact, sur l'absorption de l'eau dans le mélange ciment caoutchouc. Cette incorporation est de l'ordre de 0 à 40%. Ils ont constaté que la capacité d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du taux d'ajout de ces granulats. Ce comportement est expliqué par la non absorption de l'eau par le caoutchouc et que l'eau, doit contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une difficulté à se propager à l'intérieure du composite caoutchouté (Figure 1.22).

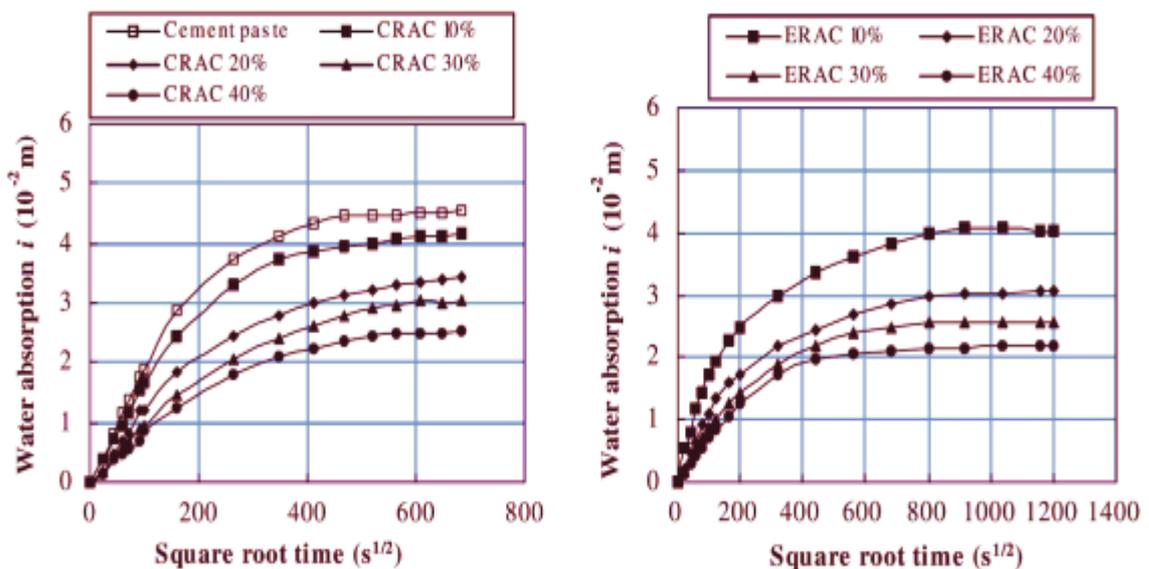


Figure 1. 22 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en caoutchouc [61].

Garros [30] qui aussi analysé les propriétés de transfert du BAP incorporant des granulats de caoutchouc arrivé aux mêmes résultats que Benazzouk et al. [61]. Les auteurs ont expliqué ce phénomène par la nature hydrophobe du caoutchouc et la dimension de l'auréole de transition qui n'est pas de taille à favoriser l'ascension capillaire.

En revanche, d'autres recherches, Hesami et al [62], Bignozzi and Sandrolini [31], ont montré le contraire, l'absorption capillaire augmente avec l'augmentation de caoutchouc. Cette augmentation est due non seulement à la porosité du béton caoutchouteux mais aussi à la quantité d'air piégé dans le béton lors du malaxage et, probablement, à la variation des tailles et celle de la forme des grains de caoutchouc par rapport au sable.

D'autre part, l'étude de Oikonomou et Mavrido [45], indique, eux aussi, que l'ajout des particules en caoutchouc dans la matrice cimentaire diminue l'absorption de l'eau par immersion sous vide. D'un autre côté, Skontaskule et Tiamlom [63] ont analysé l'effet de la taille des particules en caoutchouc sur l'absorption capillaire du béton. Leurs résultats indiquent une réduction de l'absorption des échantillons de béton contenant de grains caoutchouc dont la taille est inférieure à 2 mm. La réduction de l'absorption était de 30,77%, 15,38% et 11,54%, avec l'inclusion du caoutchouc de petite taille en volume de 10%, 20% et 30%, respectivement. Tandis que, pour les mêmes pourcentages, les échantillons contenant de grosses particules de caoutchouc, dont la taille est inférieure à 5mm, ont montré une augmentation de l'absorption d'environ 11.54%, 21.15% et 34.62%, respectivement.

1.10.10.2 Perméabilité à l'eau

Thomas et al. [64], ont indiqué, dans leur étude sur la faisabilité d'utiliser les déchets de caoutchouc dans le béton à haute performance comme une substitution partielle des granulats naturels, que la substitution du sable naturel par un mélange de caoutchouc (poudre de 300 μm , 0,8-2 mm et 2-4 mm) à des niveaux de 0 à 20% conduit à un accroissement dans la profondeur de pénétration d'eau à l'intérieur du béton. La valeur minimale de 4 mm a été observée pour les mélanges avec 0% et 2,5% de caoutchouc granulé et la valeur maximale de 13 mm a été observée pour le mélange avec 20%. De plus, Ganjian et al. [42], ont signalé aussi cette augmentation dans la profondeur de pénétration d'eau quel que soit le constituant remplacé. Les chercheurs ont substitué respectivement à des niveaux de 5%, 7.5% et 10% les gros granulats et le ciment par des particules de caoutchouc d'une taille de 2 à 25 mm et par de la poudre de caoutchouc qui passe à travers le tamis 600 μm . Les résultats ont montré que la profondeur de pénétration est beaucoup plus grande dans le cas où les gros granulats sont substitués. Les auteurs expliquent l'augmentation dans le deuxième cas par la réduction de la teneur en ciment dans le béton et une réduction ultérieure dans la liaison entre les particules dans ce mélange de béton.

D'autre part, selon Su et al.[44] la taille des granulats et leur distribution ont un effet également sur la perméabilité à l'eau. Trois groupes de particules de caoutchouc de taille séparé (3 mm, 0,5 mm et 0,3 mm) et un autre quatrième avec une distribution continu (mélange entre les trois tailles pour former la même courbe de distribution de particules de sable) ont été utilisés pour remplacer 20% en volume des granulats fins naturels. Ils ont mentionné que la résistance à la perméabilité à l'eau du béton est généralement affaiblie lorsque du caoutchouc est incorporé. Cependant, le béton confectionné avec une

combinaison de granulats de caoutchouc de différentes tailles a donné une résistance à la perméabilité d'eau plus élevée que celle du béton avec des différentes tailles de caoutchouc. La faible perméabilité à l'eau obtenue dans les mélanges avec la grande taille de caoutchouc de 3 mm, semble être dû au fait que lorsque le sable est partiellement remplacé par de gros particules, le béton résultant ne peut pas être aussi dense que des bétons contenant des particules de caoutchouc plus petites ou bien distribuées à cause des micro-conduits d'eau produits dans le béton. Par contre, les granulats fins peuvent combler les vides entre les gros granulats.

1.10.10.3 Pénétration aux ions chlorure

Bravo et de Brito [65] ont effectué un test de migration du chlorure sur le béton caoutchouté, une augmentation du coefficient de diffusion du chlorure a été observée pour une substitution de sable de 5%, 10% et 15% par le caoutchouc. Ils ont mentionné que l'augmentation de la taille des agrégats de caoutchouc entraîne un coefficient de diffusion du chlorure plus élevé. Ainsi que, le béton contenant des granulats de caoutchouc obtenus par la technique cryogénique offre une résistance à la pénétration des chlorures moindre que celles contenant des agrégats de pneus broyés mécaniquement. En outre, Gesoglu et Guneyisi [28] ont indiqué également qu'il y a une augmentation progressive de la pénétration du chlorure avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc broyé dans le béton auto-plaçant. Cependant, lorsque des cendres volantes ont été ajoutées au béton, il a été observé une résistance significative à la pénétration des ions chlorure à 90 jours de durcissement. Le béton contenant 20%, 40% et 60% de cendres volantes a présenté une réduction moyenne de 67%, 79% et 78% respectivement de la perméabilité aux ions chlorure.

Alors que, Thomas et al. [66], ont rapporté que l'utilisation des granulats de caoutchouc de 0 à 20% dans un béton conçu avec différents rapport E/C (0.4, 0.45 et 0.5) réduit le potentiel du transfert des ions de chlorures à 91 jours dans le béton si un faible pourcentage de caoutchouc est utilisé (inférieur à 7,5%). Mais si le pourcentage dépasse 7.5% on observe une augmentation progressive de la profondeur de pénétration des ions de chlorure. La raison de la réduction progressive de la profondeur de pénétration du chlorure dans les mélanges contenant de 0 à 7,5% de caoutchouc est due à l'imperméabilité des particules de caoutchouc qui n'absorbent pas l'eau et qui empêchent en même temps le passage des ions de chlorure. Plus le pourcentage de caoutchouc augmente, plus la profondeur de pénétration du chlorure diminue. Néanmoins, la pénétration du chlorure augmente au-delà de 7,5%, ce qui est

probablement dû au fait que les granulats de caoutchouc à l'intérieur du béton ne sont pas enveloppés par la pâte de ciment.

Au contraire, Onuaguluchi et Panesar [67] ont signalé, quant à eux, une réduction de la perméabilité aux chlorures pour les éprouvettes en béton avec un taux de substitution partielle de 5%, 10% et 15% des granulats fins naturels par du caoutchouc (taille 2,3 mm) en volume. Les auteurs indiquent que de petites charges ont été enregistrées dans les mélanges contenant la fumée de silice, et que cette dernière est la cause de l'amélioration de la microstructure. Par conséquent, la charge transmise dans ces mélanges a été réduite d'environ huit fois.

1.11 Conclusion

Tous les pays sont concernés par la gestion des déchets caoutchouteux à cause de leur effet direct sur l'environnement, d'où la nécessité de les recycler pour protéger l'environnement. En effet, l'utilisation du caoutchouc recyclé comme matériau de construction dans le domaine du génie civil apporte de grands avantages sur les plans économique et environnementale.

Nous avons posé, ainsi, dans ce chapitre la problématique des pneumatiques usagés et leur valorisation, notamment, sous forme de granulats dans les composites à base cimentaire. Cette incorporation dans une matrice cimentaire a un effet négatif sur l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques, d'une part. D'autre part, elle améliore certaines propriétés comme la ductilité, la résistance au développement des fissures et la conductivité thermique. Les effets de cette incorporation ont été étudiés à grande échelle sur les propriétés du béton ordinaire, ce qui n'est pas le cas pour le BAP pour lequel les résultats ne sont pas clairs, notamment, les paramètres rhéologiques ainsi que la conductivité thermique du BAP. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui porte sur les potentialités d'utiliser les déchets pneumatiques sous forme de granulats dans un béton auto-plaçant.

**CHAPITRE II : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE_BETONS
AUTOPLAÇANTS FIBRES**

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE_BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) avec l'addition de fibres métalliques. Il présente également les propriétés du béton autoplaçant fibré à l'état frais et à l'état durci ainsi que l'influence des additions minérales sur ces propriétés du BAP.

2.2 Définition et avantages et inconvénients du béton auto-plaçant

Le béton auto plaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable. Il se caractérise principalement par sa grande déformabilité et sa bonne capacité de remplissage sous l'effet de la pesanteur sans aucune vibration (la compaction s'effectue par le seul effet gravitaire). Ces caractéristiques lui permettent de se mettre en place dans des zones confinées ou très ferraiées et épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes avec une ségrégation minimale. L'utilisation des BAP a pour avantage de diminuer la main d'œuvre ainsi que la nuisance sonore causée par la vibration.

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Tous les coins des coffrages sont remplis et, surtout, il y a moins de problèmes d'hétérogénéité dans la dispersion du béton. Ils permettent donc des coffrages complexes et anguleux.
- Bétonnage en milieux fortement ferraiés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Meilleur enrobage des armatures.
- Réalisation de formes complexes et/ou de grande hauteur
- fluidité obtenue sans excès d'eau garantissant l'homogénéité du béton et l'obtention de résistances.
- Bonne qualité de remplissage (même en cas d'accès difficile).
- Bonne qualité de parement sous réserve de précautions de mise en œuvre.

- Suppression de la vibration : amélioration des conditions de travail des compagnons (santé et sécurité).

Le béton autoplaçant offre aussi des avantages socio-économiques :

- diminution de la main d'œuvre nécessaire,
- dispositifs de vibration non nécessaires,
- réduction du temps de bétonnage.

Toutefois, certains points restent à contrôler dans l'utilisation du BAP: la formulation des BAP implique un dosage délicat des matières premières tel que (ciment, adjuvant et des différentes additions minérales). Il faut aussi noter l'augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants. La fluidité des BAP nécessite des coffrages étanches, de plus, il y a risque de non compatibilité des matériaux.

2.3 Formulation des BAP

La formulation des BAP est un domaine de recherche très vaste. La fluidité qui est le paramètre le plus important dans le BAP est également son plus grand inconvénient. En effet, la dispersion des particules les plus fines (ciment, addition) lors, de l'utilisation d'un superplastifiant, donne une matrice très fluide si bien que les inclusions granulaires les plus grosses (sable, gravillon) se séparent [68]. Etant donné que chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux), et que l'écoulement du béton dépend essentiellement des matériaux utilisés, il est donc impossible d'établir une formulation universelle du béton autoplaçant, d'une part. D'autre part, la variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, durabilité).

Plusieurs approches ont été conçues pour optimiser la formulation des BAP. Parmi elles, l'approche japonaise d'Okamora (1999), l'approche française LCPC, l'approche suédoise du CBI par Peterson et al. [69] qui est basée sur le plan d'expérience et celle de d'OH et al. [70] qui repose sur la théorie de l'excès de pâte [71]. Cependant, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP et peuvent légèrement varier d'une approche à l'autre. La formulation des BAP repose sur trois critères :

- Fluidification de la pâte: elle est obtenue par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant sans ajout d'eau.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : elle résulte de la taille des granulats qui est généralement plus petite et du volume de pâte et la quantité de fines qui sont plus importants que dans le béton ordinaire.

- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice) [72].

Afin d'obtenir des bétons autoplaçants dont des résistances mécaniques sont égales à celles du béton ordinaire, les différentes approches élaborées dans le monde, pour établir la formulation du BAP ont eu recours à un volume de pâte plus important que pour le béton ordinaire. En effet, la pâte permet de remplir les vides et de disperser les granulats ce qui minimise les frictions et les frottements. D'autre part, les BAP contiennent une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de particules fines (inférieures à 80 microns). Cela engendre une meilleure ouvrabilité du béton. Les additions minérales de type filler calcaire, cendre volante, fumée de silice, pouzzolane naturelle et laitier, ont gardé leur rôle comme substituant partiel du ciment dans les BAP.

Comme il faut combiner un nombre plus élevé de matériaux, qui est une opération pouvant être accompagnée d'éventuels problèmes de compatibilité entre matériaux (ciment - adjuvants, adjuvant – adjuvant), la réalisation d'un BAP est donc devenue de ce fait une opération plus complexe que celle d'un béton ordinaire.

La formulation des BAP par l'approche Okamura qui a été développée à l'Université de Kochi en 1990, se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Le rôle principal des adjuvants dans la confection des BAP est de réduire le rapport eau/ciment (E/C) du béton. Les plastifiants ou les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment et agissent par effets stérique et électrostatique pour disperser les particules du ciment. En se fixant sur les grains de ce dernier, ils modifient la nature des charges électriques. Ce qui diminue d'une part le phénomène de floculation du ciment au contact de l'eau, et augmente d'autre part, la proportion d'eau libre dans la suspension. Les grains de ciment ayant tous la même charge ont tendance à s'éloigner les uns des autres et à s'entourer d'un film d'eau très mince [73]. Ces adjuvants confèrent, donc, au béton une grande fluidité.

2.4 Caractérisation des BAP à l'état frais

La formulation d'un béton autoplaçant est essentiellement focalisée sur l'obtention des propriétés à l'état frais dans le but d'atteindre les performances souhaitées. En effet, de

nombreuses recherches ont été élaborées pour développer des techniques de caractérisation du critère auto-plaçant. Il est aussi nécessaire d'identifier les matériaux locaux à travers plusieurs essais. Ainsi, un ensemble de tests combinés a-t-il été mis en place pour pouvoir satisfaire tous les essais de l'écoulement du béton. Diederich [68] rapporte dans sa thèse que la norme européenne EN 206-9, Règles complémentaires pour le béton autoplaçant datant de novembre 2014 (NF EN206-9) [74], est le résultats de nombreux essais développés et regroupés par l'AFGC sous forme de recommandations dans le cadre du Projet National Béton Autoplaçant [75].

L'ouvrabilité des BAP est basée sur trois caractéristiques principales:

- mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams),
- mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L),
- stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis) [75].

2.4.1 Essai d'étalement

Cet essai est utilisé pour évaluer la fluidité des BAP en milieu non confiné. Il est réalisé comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Le béton étant introduit dans le cône sans compaction, on relève la moyenne de deux diamètres orthogonaux de la galette de béton obtenue au bout d'une minute [75]. D'autre part, l'observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton. Pour un étalement supérieur à 700 mm, le béton risque de subir une ségrégation, et pour des étalements inférieurs à 500 mm, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement armées.

La mesure de la vitesse d'écoulement est effectuée lors de l'essai d'étalement. Elle consiste à mesurer le temps nécessaire pour obtenir une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau.

2.4.2 Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L consiste à évaluer la capacité du béton à s'écouler en milieu confiné et à vérifier si la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au niveau des armatures. La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On tire la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers l'espace entre les armatures. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 . Un béton autoplaçant possède

un taux de remplissage H_2/H_1 supérieur ou égal à 0,8. Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation [75].

2.4.3 L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »

Cet essai permet de mesurer le temps d'écoulement du BAP, il consiste à mettre une quantité de béton frais dans l'entonnoir en forme de « V ». Le temps est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton. Le temps d'écoulement du béton auto-plaçant à l'entonnoir, s'il est inférieur à 12 secondes la viscosité du béton est suffisante [76].

2.4.4 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à prélever un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes de repos, on verse ensuite une masse de 4.8 ± 0.2 kg de béton sur un tamis d'ouverture 5 mm et on laisse deux minutes. Après, on pèse la masse de la laitance ayant traversé le tamis. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0% < % Laitance < 15 %) Stabilité satisfaisante.
- 15% < % Laitance < 30 %) Stabilité critique.
- -% Laitance > 30%) Stabilité très mauvaise [75].

2.5 Rhéologie des bétons autoplaçants

La rhéologie est la science de l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées, variables au cours du temps [77]. La connaissance du comportement rhéologique permet de caractériser le comportement du béton au cours de la mise en œuvre et d'analyser l'écoulement en étudiant les contraintes et les déformations subies par le matériau. L'exploitation des paramètres rhéologiques conduit à l'élaboration des courbes d'écoulement qui relient la contrainte de cisaillement (τ) à la vitesse de cisaillement où le gradient de vitesse, notée ($\dot{\gamma}$). L'étude des propriétés rhéologiques fondamentales comme le seuil de cisaillement et la viscosité plastique permet, donc, de caractériser le béton à l'état frais [76].

2.5.1 Loi de comportements rhéologiques

Il existe plusieurs types de comportements rhéologiques se divisant en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non- newtoniens.

2.5.1.1 Fluides Newtoniens

Un fluide newtonien est un fluide dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire. La constante de proportionnalité est appelée viscosité. cette dernière est constante quelques soient les contraintes exercées [77,78], en d'autre termes, la viscosité ne dépend pas des contraintes appliquées. Donc, on peut écrire l'équation qui décrit son comportement rhéologique comme suit :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad 2.1$$

Avec :

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

μ : la viscosité [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s].

2.5.1.2 Les fluides non-Newtoniens

Un fluide est dit non Newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire du tenseur des taux de déformation. Les trois fluides non-newtoniens les plus fréquemment recommandés sont : les fluides Binghamien, les rhéofluidifiants, les fluides rhéoépaississants, etc.

Le corps non Newtonien regroupe des corps complexes exclusivement visqueux ou viscoplastiques. Ils ont des lois de comportement non linéaires est nécessitent une contrainte minimale pour s'écouler.

2.5.1.2.1 Fluide Binghamien

Tout comportement non-newtonien se caractérise par l'existence d'une contrainte (seuil d'écoulement). Si la contrainte appliquée au fluide est inférieure à cette contrainte seuil, il n'y a pas de déformation et le fluide ne coule pas. La viscosité des fluides non Newtoniens est variable, elle dépend de la contrainte de cisaillement exercée [76,78]. Ces fluides sont représentés par la loi suivante:

$$\tau = \tau^0 + \mu \dot{\gamma} \quad 2.2$$

τ : Contrainte de cisaillement (Pa) ;

τ^0 : Contrainte de cisaillement (Pa) ;

$\dot{\gamma}$: Le gradient de vitesse (s-1) ;

μ : viscosité plastique de Bingham (Pa.s).

2.5.1.2.2 Fluide rhéofluidifiant :

Ce type de fluide est représenté sur la figure 2.1. La courbe traduit la diminution de la viscosité de ces fluides avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement ou celle de la vitesse de déformation [79,80]. Plusieurs chercheurs ont étudié les modèles rhéologiques, aussi existe-t-il plusieurs lois de comportement rhéologique des différents matériaux.

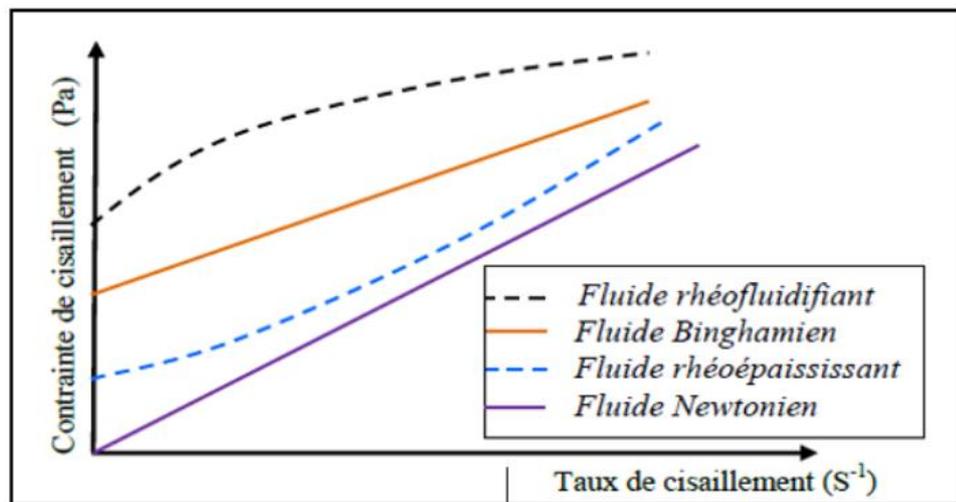


Figure 2. 1 : Les différents comportements rhéologiques des fluides [78].

2.5.2 Paramètres rhéologiques

2.5.2.1 Viscosité

On appelle viscosité la mesure des frictions internes d'un fluide lors du déplacement d'une de ses couches moléculaires par rapport à celle qui est en-dessous. Cette friction est occasionnée par le frottement permanent des molécules de la première couche sur les molécules de la seconde couche lors de leur glissement. Elle se traduit par la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle (Figure 2.2).

La viscosité est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad 2.3$$

τ : Contrainte de cisaillement (Pa) ;

$\dot{\gamma}$: Le gradient de vitesse (s⁻¹) ;

μ : viscosité plastique de Bingham (Pa.s).

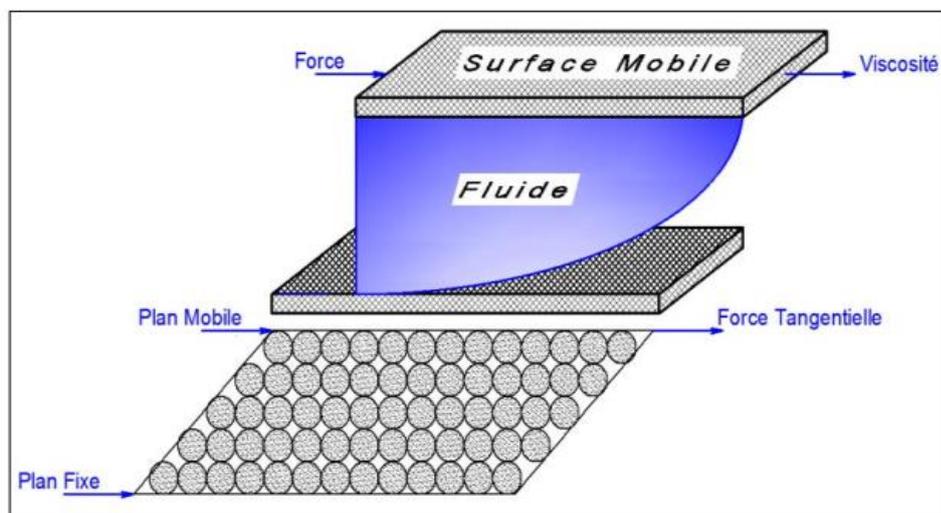


Figure 2. 2 : Schéma du glissement des couches [77].

2.5.2.2 Contrainte de cisaillement

Au contraire des contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire, la contrainte de cisaillement τ , elle, est une contrainte mécanique appliquée soit parallèlement soit tangentiellement à une des faces d'un matériau [77,81]. Ainsi, la contrainte de cisaillement c'est le rapport d'une force par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad 2.4$$

Avec :

τ : Contrainte de cisaillement [Pa],

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée,

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

2.5.2.3 Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement appelée « gradient de vitesse » ou « taux de cisaillement », sert à mesurer le cisaillement appliqué au sein d'un fluide. Le gradient de vitesse est la vitesse de déformation de deux couches successives d'un fluide cisailé. Elle varie selon la contrainte de cisaillement et la nature du fluide.

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole $\dot{\gamma}$ suivant la relation :

$$\dot{\gamma} = \frac{dx}{dz} \quad 2.5$$

La vitesse de cisaillement est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [79].

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad 2.6$$

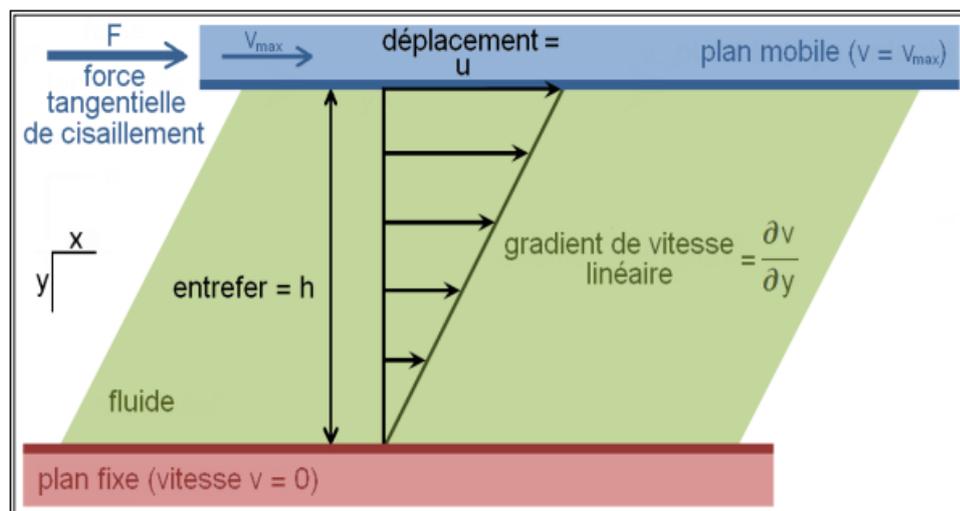


Figure 2. 3 : Schéma de la vitesse de cisaillement [79].

2.5.2.4 Seuil de cisaillement

On appelle seuil de cisaillement la contrainte minimum appliquée sur un matériau pour le faire écouler. Lorsque cette contrainte appliquée est inférieure au seuil de cisaillement, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas.

Différentes méthodes permettent de mesurer le seuil de cisaillement, parmi lesquelles des méthodes nécessitant la connaissance des notions physique du matériau [77]. Le tableau 2.2 présente les plages des caractéristiques rhéologiques des matériaux cimentaires [82].

Tableau 2. 1: Paramètres rhéologiques des pâtes ciments, mortier et béton [82].

Matériaux	Pate de ciment, coulis	mortier	Béton fluide	Béton autoplaçant	Béton ordinaire
Seuil de cisaillement (N/m ²)	10-100	80-400	400	50-200	500-2000
Viscosité (Ns/m ²)	0.01-1	1-3	20	20-100	50-100

2.5.3 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

L'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique, comme dit précédemment, permet la caractérisation du béton frais.

La rhéologie établit les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, tout en tenant compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, appelées de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes appliquées. Le comportement rhéologique d'un matériau (Figure 2.4) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà du seuil de cisaillement τ_0 . Le fluide est considéré comme Binghamien si la courbe d'écoulement est une droite [83].

Quant aux bétons auto-plaçants, des auteurs [84] ont souligné que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b \quad 2.7$$

Où : a et b sont des constantes de comportement.

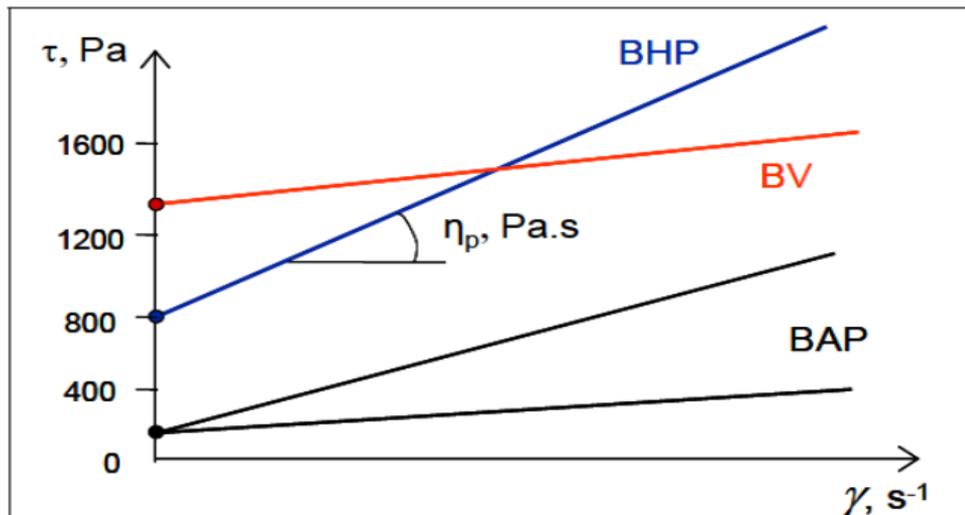


Figure 2. 4 : Comportements rhéologiques pour différents types de béton [83].

Toutefois, le model Herschel-Bulkley est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite l'identification d'un paramètre supplémentaire. Des appareils appelés rhéomètres nous permettent de quantifier les grandeurs rhéologiques c'est-à-dire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique qui servent à définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place. En effet, pour effectuer des mesures sur le béton frais, on utilise des dispositifs expérimentaux dont les principaux sont :

- Le rhéomètre coaxial BTRhéom (employé en France [84]),
- Le viscosimètre à plaque parallèle BML (utilisé en Islande [85]),
- Le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG (utilisé en France [77,78]).

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons des résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes [83].

2.6. Les bétons fibrés

2.6.1 Historique

L'utilisation de fibres métalliques dans le béton a été suggérée pour la première fois par Porter, en 1910, afin d'améliorer les performances mécaniques du béton. Les fibres étaient ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance du béton à la traction par flexion, mais plutôt dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher et ralentir la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres métalliques en cousant les fissures. Néanmoins, le béton renforcé de fibres métalliques en tant que matériau dans les applications industrielles n'a vu le jour aux USA qu'au début des années 60 suite aux travaux de Romuald et Baston [86] qui ont utilisé pour cela du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et des fibres. Ce travail a conduit au dépôt d'un brevet. On peut également ajouter un superplastifiant au mélange afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton fibré. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais plutôt comme un matériau de type différent.

2.6.2. Applications actuelles et potentielles des BFM

Le domaine des travaux publics et celui du bâtiment utilisent de plus en plus les bétons de fibres métalliques, BFM. En effet, on distingue deux grands groupes d'application: la préfabrication et le coulage in-situ sur ouvrage. Le tableau 2.1 illustre quelques applications de bétons renforcés de fibres et leurs intérêts.

Tableau 2. 2 : Applications de bétons renforcés de fibres [87].

APPLICATIONS	INTERETS APPORTES PAR L'AJOUT DES FIBRES DANS LE BETON
Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et éléments structuraux soumis à la flexion	- Diminution de 40% de l'ouverture de 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, ..)	- Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Energie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts	- Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	- Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels, et galeries souterrains	- Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus

2.7 Les fibres

2.7.1 Différents types de fibres

On ajoute les fibres dans la confection des matériaux cimentaires pour améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Ces fibres sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques[87]:

- fibres minérales : verre, carbone,
- fibres métalliques : acier, inox, fonte,
- fibres organiques : polypropylène, acrylique,
- fibres naturelles : Hévéa, Sisal ...

Chaque type de fibres est différent des autres par ses caractéristiques et ses propriétés : dimensions (diamètre, longueur), formes (lisse, rugueuse,...), résistance à la traction et l'adhérence au béton. Elles procurent un comportement mécanique spécifique aux structures.

2.7.2 Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont voulu augmenter les caractéristiques mécaniques du béton telles que la résistance à la compression et à la flexion en ajoutant les fibres, toutefois le résultat obtenu n'était pas gratifiant [88]. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut être apprécié pour deux aspects :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la figure 2.5.a.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure 2.5.b).

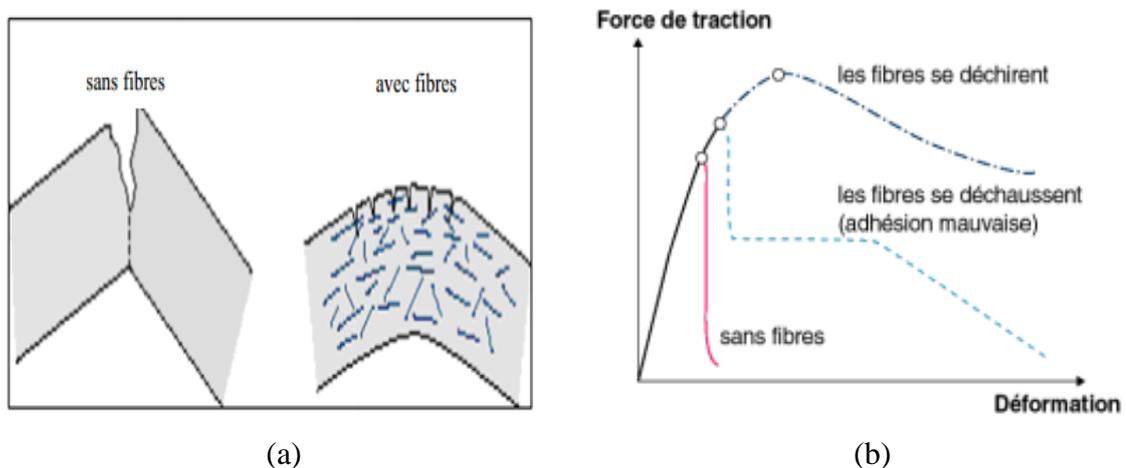


Figure 2. 5 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres [89].

Les fibres servent généralement à renforcer la structure en stoppant le développement des fissures et leur propagation. Aussi, selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont incorporées, les fibres permettent :

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; ainsi, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire,
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration,
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge,
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur),
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion,
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue et à l'abrasion.

En réalité, les fibres agissent sur les performances mécaniques des bétons quel que soit le mode de rupture [90]. Le comportement d'un béton renforcé de fibres peut être modifié par les facteurs suivants :

- Distribution des fibres et leur orientation.
- Forme de la section dont dépend la surface adhérente.
- Nature des fibres (métallique, synthétique ...).
- Forme de la fibre (ondulée, droite, plate ...).
- Longueur de la fibre L_f et élancement L_f/D_f (D_f diamètre).
- Fraction volumique des fibres dans la matrice.

Le nombre de paramètres influant sur le comportement du béton renforcé de fibres étant considérable, il est donc extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire.

2.7.3 Principe d'action des fibres

Rossi et al. [91], ont indiqué que le principe d'action des fibres se manifeste à deux échelles: le matériau et la structure. Considérons le comportement d'une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction. Ce comportement est traduit par 3 phases sur la courbe contrainte - déformation (Figure 2.6).

- Une première phase où l'on observe la formation de microfissures généralement dans des zones de moindre résistance mécanique telles que l'interface entre les granulats et la matrice. La longueur de ces fissures, qui se développent très tôt et qui sont

inactives, est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur étant de l'ordre du micron.

- Dans la deuxième phase les macro-fissures résultant de la coalescence des microfissures se développent. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à freiner la propagation des fissures en les cousant. C'est ce qu'on appelle le principe de couture de fibres.
- Dans la troisième phase, la propagation d'une macro-fissure continue jusqu'à ce que l'éprouvette se sépare en deux blocs provoquant la ruine totale [92].

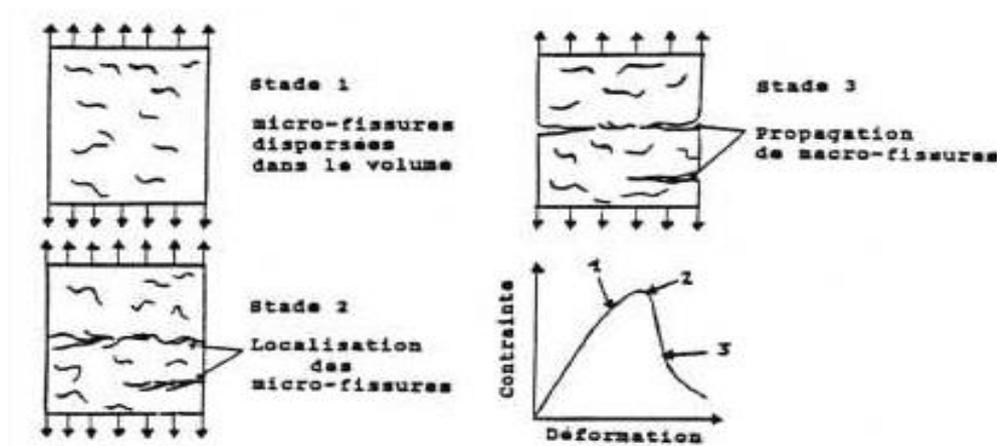


Figure 2. 6 : Processus de fissuration du béton [93].

La figure 2.7 illustre le principe de couture des fibres à travers une fissure dans la matrice [94] :

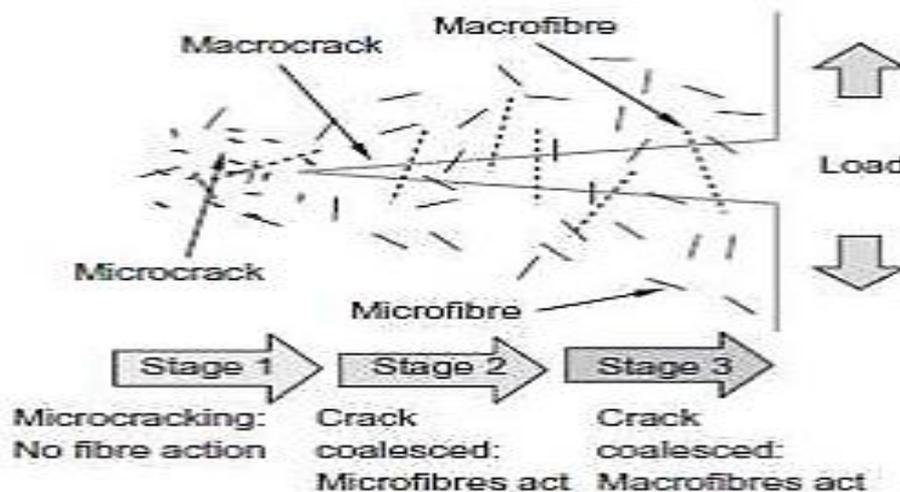


Figure 2. 7 : Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures [94].

Le mécanisme de couture des fibres permet de redistribuer de manière uniforme les contraintes dans la matrice, de contribuer à l'amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures et de conférer une ductilité au béton [95].

2.7.4 Action des fibres métalliques dans les bétons ordinaires à l'état frais

L'addition de fibres affecte de manière significative la maniabilité des bétons : plus le volume de fibres est important et plus la porosité du squelette granulaire est plus grande [96]. Il est recommandé de choisir des fibres plus longues, de 2 à 4 fois, que la taille du plus gros granulats (voir Figure 2.8) pour une efficacité maximale à l'état durci [97]. Pour le béton pompé, il est préconisé de réduire le volume de granulats bruts de 10% par rapport au béton ordinaire pour faciliter l'opération de pompage. L'ajout d'un superplastifiant est fortement conseillé pour remédier à la perte de l'ouvrabilité du béton fibré, étant donné que l'introduction de fibres entraînent une diminution de l'affaissement estimé entre 50 et 75 mm [97].

Rossi [98] a réussi à mettre au point une procédure afin d'optimiser la composition des bétons renforcés de fibres métalliques destinés aux structures en béton armé. Elle est basée aussi sur la démarche de Baron-Lesage [99] et a été réalisé avec le maniabilimètre, qui permet de déterminer le temps d'écoulement en appliquant une vibration externe, au contraire de Rossi [100] qui a utilisé le cône d'Abrams. La figure 2.9 montre l'effet général du rapport sable/gravier sur le temps d'écoulement, la teneur et la composition de la pâte ayant été maintenues constantes.

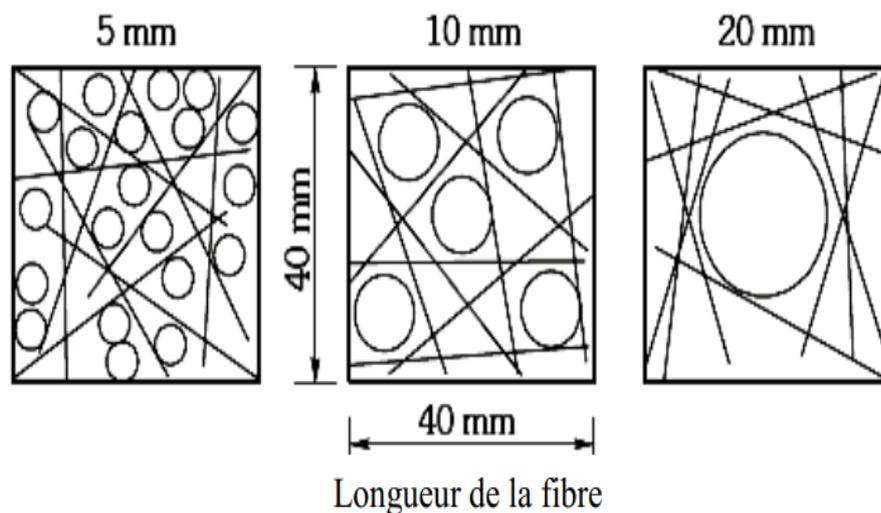


Figure 2. 8 : Effet de la taille des granulats sur la distribution de fibres [97].

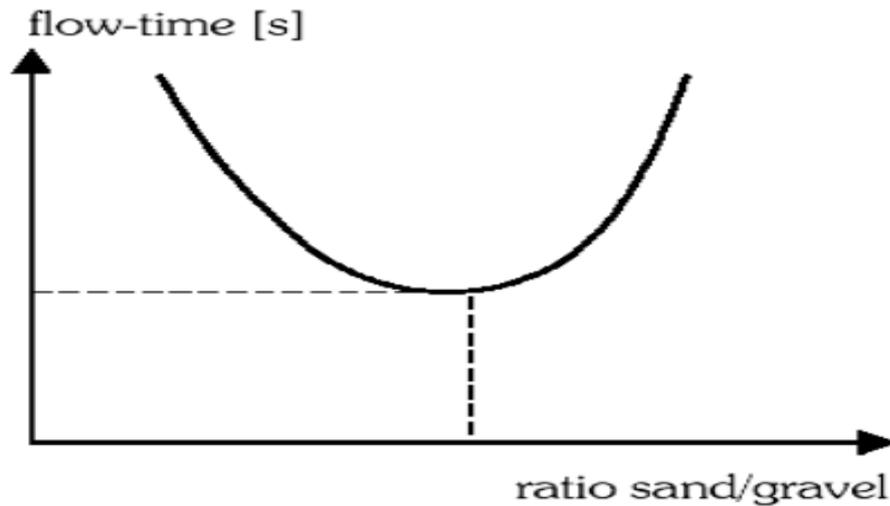


Figure 2. 9 : Effet du rapport sable/gravier sur la maniabilité du béton renforcé par des fibres [101].

2.7.5 Comportement mécanique des bétons renforcés de fibres

L'efficacité des fibres apparaît essentiellement dans la phase post-fissuration. Elles assurent le transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements. Avant fissuration, les fibres interviennent peu ou pas du tout sur le comportement mécanique qu'il soit compressé ou tracté. Dès l'apparition de la première fissure, les fibres commencent à agir pour retarder la propagation de la fissure. La figure 2.10 montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe.

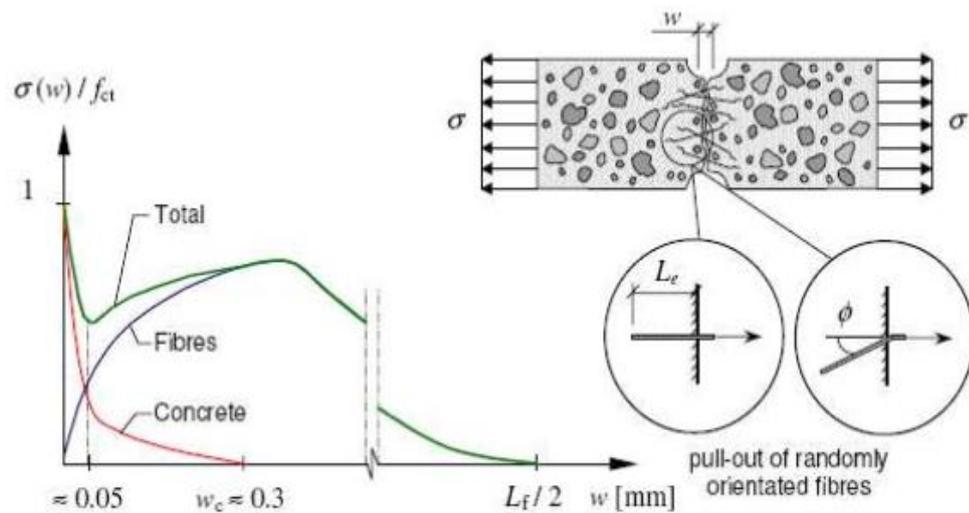


Figure 2. 10 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction [102].

Pour noter l'apport des fibres dans le comportement post-fissuration par rapport à un béton ordinaire : en première approximation, il est évalué en faisant la différence entre la réponse du béton fibré et celle du béton de référence.

Mis à part la nature et la géométrie de la fibre, l'efficacité des fibres dépend du nombre de fibres par unité de surface de la fracture, N_1 , qui définit leur espacement moyen dans la matrice, et qui gère ainsi le comportement post fissuration.

La littérature [103] propose quelques outils pour accéder à N_1 , en particulier une des équations les plus utilisées :

$$N_1 = \alpha \cdot V_f / A_f \quad 2.8$$

Où

- V_f est le dosage volumique en fibres,
- A_f est la section de la fibre
- α est le facteur orientation.

Par ailleurs, le facteur d'orientation α , qui correspond au rapport entre la longueur de la fibre projetée suivant la direction du chargement et la longueur réelle de cette même fibre, permet d'évaluer les effets de l'orientation préférentielle des fibres. Ce rapport est le rapport moyen obtenu en balayant toutes les orientations possibles de la fibre. Ce facteur orientation est compris entre 0,41 et 0,82 selon Kooiman [104].

2.7.6 Processus de couture des fissures

Evidemment la composition du béton influence largement les performances structurales, et cela est particulièrement vrai pour les bétons renforcés de fibres métalliques. Cependant, on relève des contradictions entre chercheurs quant aux objectifs visés par le renfort par les fibres. Le but principal du renfort par les fibres pour Markovic et al. [105], est d'augmenter la résistance à la traction et la ductilité du béton, tandis que, pour Kawamata et al. [106] les fibres servent essentiellement à contrôler la fissuration et à changer le comportement du matériau fissuré en cousant les fissures. Sous un effort de traction, les fibres peuvent souder les fissures qui se sont développées dans la matrice et augmenter non seulement la résistance à l'ouverture des fissures, mais aussi retarder leur propagation. Les fibres vont plus ou moins se déformer ou glisser, pendant l'ouverture des fissures, et ce, selon leur nature et leur capacité d'adhérence avec la matrice. Pour Li et Leung [107] qui

ont utilisé des fibres synthétiques dans leurs compositions les fibres doivent être assez longues et résistantes pour être correctement ancrées dans la matrice.

2.7.7 Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres

Les caractéristiques géométriques et mécaniques des fibres diffèrent selon leur nature. Chaque type de fibre peut influencer de manière différente le comportement mécanique du béton, donnant ainsi lieu à des applications spécifiques. Le choix du type de fibres utilisées dépend donc du domaine d'utilisation et des performances souhaitées. Vu sa nature, la fibre métallique est la plus utilisée.

Si on utilise deux types de fibres métalliques dans la même composition et à même dosage, les fibres courtes qui sont plus nombreuses, peuvent être actives en pontant les microfissures lesquelles se développent aux premiers stades du chargement. Cela peut augmenter la résistance à la traction. Au fur et à mesure que la charge augmente, l'ouverture des fissures augmente aussi, provoquant l'arrachement des fibres courtes, alors que les fibres longues peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et par conséquent à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité [105].

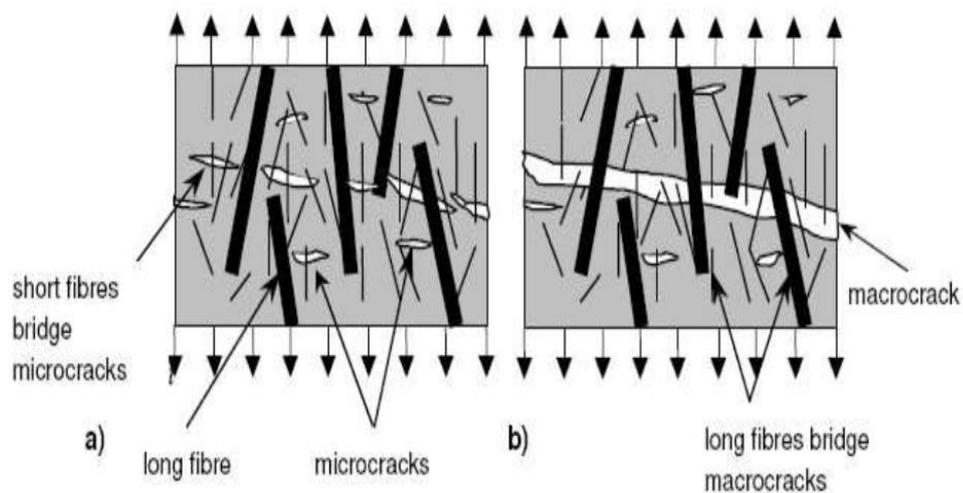


Figure 2. 11 : Processus de couture [105].

Kawamata et al. [108] ont indiqué qu'un renfort par des fibres métalliques ne peut pas remédier à la fragilité du béton. En effet, l'utilisation de fibres métalliques très adhérentes, à forte rigidité en flexion et à faible élancement, n'a pas permis d'éviter la rupture fragile

des éprouvettes sollicitées en flexion. Les auteurs ont donc incorporé des fibres synthétiques de type polyéthylène afin d'améliorer ce mode de rupture.

2.7.8 Orientation préférentielle des fibres

L'orientation préférentielle des fibres est essentiellement relative à la mise en place du béton dans les moules ou les coffrages. Lorsque le béton est coulé, les fibres s'orientent d'abord selon l'axe d'écoulement puis parallèlement aux parois au fur et à mesure du remplissage du coffrage. On ne peut donc pas éviter l'orientation préférentielle au voisinage des parois (effet de paroi).

La maniabilité du béton fibré, étant généralement différente de celle des bétons ordinaires, nous oblige à étudier sa mise en œuvre et son compactage. La vibration interne peut, elle aussi, engendrer non seulement une orientation préférentielle des fibres suivant l'axe de vibration, mais également une ségrégation.

Casanova [109] a analysé l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique en traction des éprouvettes en béton renforcé de fibres métalliques. Il a prélevé des carottes selon trois directions sur un bloc de béton coulé à la verticale. La figure 2.12 résume les résultats des essais de traction directe effectués sur ces carottes relatives aux trois directions.

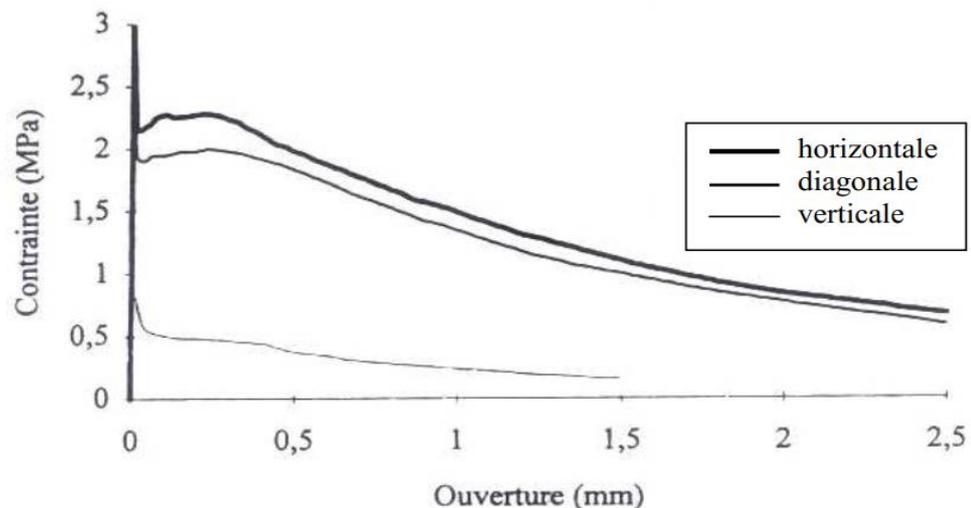


Figure 2. 12 : Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [109].

Les résultats de l'étude de Casanova [109] indiquent qu'il y a, pour les trois directions, une parfaite corrélation entre l'orientation préférentielle des fibres et le comportement

mécanique en traction. En effet, Lorsque les fibres sont orientées parallèlement au plan de la fissure (carottes verticales), les éprouvettes présentent un comportement est semblable à celui d'un béton sans aucun renfort de fibres. Par contre, lorsqu'elles sont orientées perpendiculairement au plan de la fissure (carottes horizontales), les éprouvettes présentent un bon comportement à la traction, avec une meilleure résistance résiduelle, les fibres assurant un transfert optimal des contraintes à travers la fissure. Enfin, pour les carottes diagonales, le comportement post-pic est amélioré mais de façon limitée à cause de l'orientation des fibres intermédiaires.

2.8 Bétons autoplaçants fibrés

L'addition des fibres dans le béton pose un problème sur le plan de l'ouvrabilité et la distribution homogène des fibres, même si les améliorations obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons sont appréciables. Pour y remédier, on pourrait ajouter des fibres au béton autoplaçant (BAP). En effet, le BAP de dernière génération possède une excellente maniabilité facilitant sa mise en place sous l'effet de son propre poids, l'absence de vibration dans ce béton évitant une répartition hétérogène des fibres dans la matrice.

Des chercheurs ont montré que, pour contrôler la fissuration dans les éléments en béton fortement ferrailés, le BAP renforcé de fibres – même s'il est peu utilisé actuellement- peut être une solution adéquate pour les applications sur poutres en I en béton précontraint [95]. L'ajout de fibres affecte directement la rhéologie des bétons à l'état frais et de la même manière l'ouvrabilité des BAP, cette influence dépend du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement selon Groth [110].

2.9 Influence des fibres sur les propriétés du BAP à l'état frais

2.9.1 Effet sur l'étalement

Grünewald et Walraven [96,111] ont analysé les propriétés des BAP fibrés en fonction de leur teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat. Le rapport massique utilisé dans le béton de référence était de 40%, en effet, il est considéré comme optimal pour la compacité du béton. L'analyse des résultats montre que l'étalement est inversement proportionnel à la teneur en fibres, sachant que le taux de diminution dépend de la teneur en sable. L'introduction de fibres métalliques de grande surface spécifique (ex : Dramix 80/30 PB) conduit à une galette d'étalement ovale ; cela prouve que les fibres contrecarrent l'étalement. En outre, lorsque les fibres sont plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), il se produit une

ségrégation de granulats et de fibres au centre de la galette (Figure 2.13.b). Si les fibres ajoutées sont de longueur moyenne (ex : Dramix 65/40 BN), on obtient une galette ovale avec accumulation des particules au milieu (Figure 2.13.c).

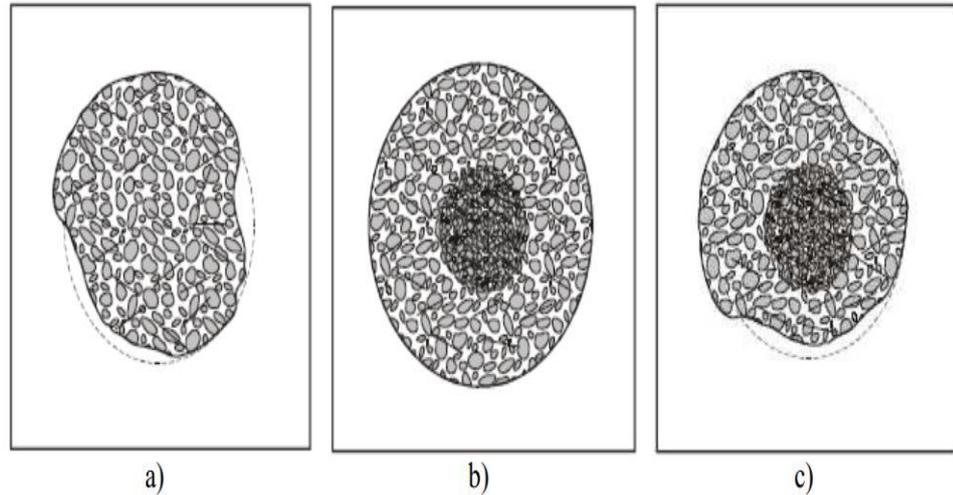


Figure 2. 13 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP [96].

L'élanement (L_f/D_f) et le dosage en fibres étant les facteurs principaux affectant l'ouvrabilité du béton, Grünewald et Walraven [111] ont basé leur étude sur le facteur fibre défini comme étant le produit de la teneur volumique en fibres V_f et de l'élanement. La Figure 2.14 décrit l'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres. On ne constate aucune différence entre l'étalement mesuré directement après malaxage et celui mesuré une heure après malaxage. Cependant, l'augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

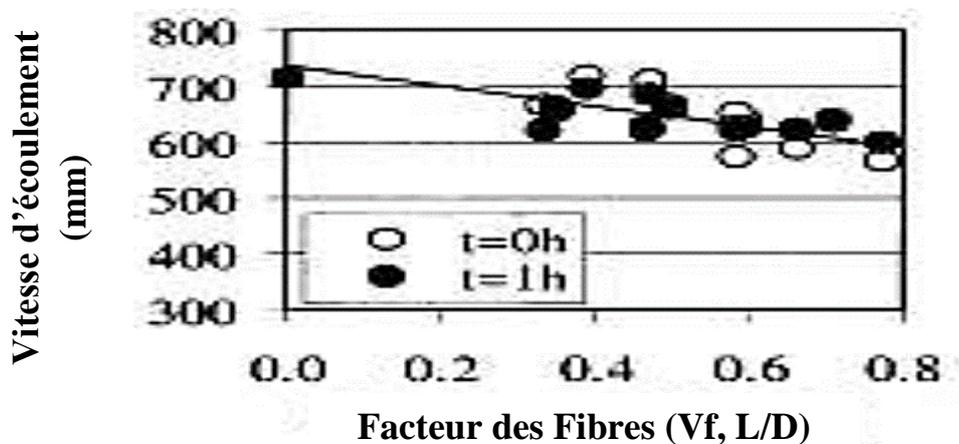


Figure 2. 14 : Evolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [111].

De plus, Khaloo et al. [112], ont rapporté que les BAP conçus à deux classes 40 MPa et 60 MPa avec l'addition de fibres industrielles à extrémités crochues de 0,5% à 2% présentent une chute d'étalement avec l'augmentation du taux des fibres.

Le potentiel de fibres d'acier recyclées sur le béton a été examiné par Meddah et Bencheikh [113], ils ont signalé que le béton contenant des déchets de fibres métalliques collectées dans un atelier de tournage, montre certaines difficultés lors du processus de malaxage. En fait, ce type de fibres se caractérise par des formes différentes et aléatoires telles que: formes droites, courbes, câblées, ondulées, frisées et parfois complexes. De plus, il a été observé que lorsque ces fibres sont plus longues que 30 mm, il devient difficile d'obtenir un béton ouvrable.

2.9.2 Effet sur le temps d'écoulement V-funnel

Grünewald et Walraven [111] ont mesuré le temps d'écoulement à travers l'entonnoir (V-funnel) pour les différentes compositions du BAP directement après malaxage. Ils ont constaté que le temps varie entre 4,5s et 5,7s. En effet, la figure 2.15 montre une augmentation linéaire du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres, les temps de passage à travers l'entonnoir à $t=1h$ étant nettement plus élevés qu'à $t=0h$.

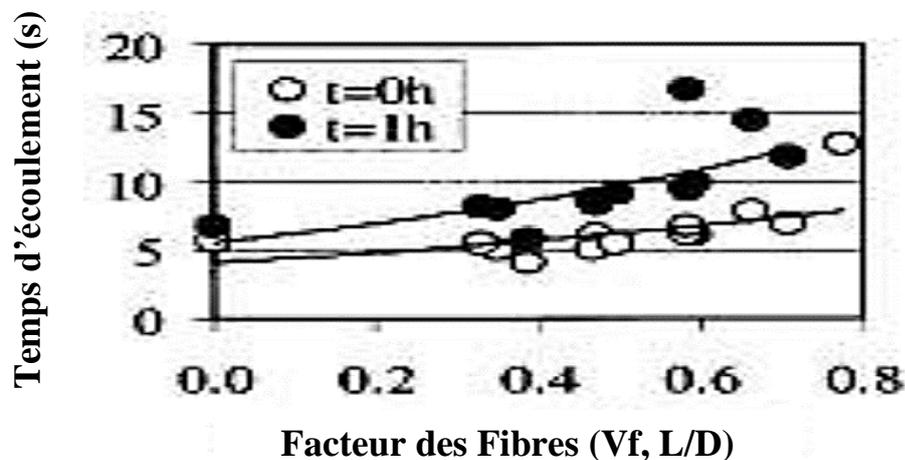


Figure 2. 15 : L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres [111].

Zamri et al. [114], ont analysé l'influence des fibres industrielles de 35 mm de longueur à extrémités crochues sur les performances des BAP conçus avec la substitution de 30% de ciment par les cendres volantes. Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en fibres dans le mélange affecte inversement les propriétés du BAP frais. Ils ont rapporté que

l'addition des fibres industrielles dans le BAP et l'augmentation de leurs dosages conduisent à une augmentation de la viscosité du BAP.

En outre, Gülsan et al. [115], ont examiné l'effet simultané de la nano-silice et des fibres métalliques sur les performances à l'état frais et durci des bétons géo-polymères autoplaçants. À cet effet, des mélanges de béton géo-polymère autoplaçant sans et avec nano-silice (0, 1% et 2%), ainsi que sans et avec les fibres (0, 0,5% et 1%) ont été conçus. Les fibres métalliques à extrémités crochues ont été utilisées avec une longueur de 30 mm et un rapport d'élanement de 40. Ils ont signalé que le temps à l'entonnoir en v mesuré est de l'ordre de 10,84 s, 12,83 s et 13,76 s pour des bétons géo-polymères autoplaçants fibrés de 0%, 0,5% et 1%, respectivement.

Par ailleurs, dans une étude récente, Mastali et al. [116] ont analysé l'effet de la fumée de silice et des fibres recyclées obtenues à partir de pneus usagés sur les performances du BAP. L'utilisation des fibres métalliques recyclées affectent aussi le temps d'écoulement à l'entonnoir en V, l'augmentation atteint 0,85% lorsqu'on a utilisé 14% et 0,75 % de fumée de silice et des fibres respectivement.

2.9.3 Effet sur la capacité de passage (boite en L et J-RING)

Dhonde et al. [95] ont étudié le comportement des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques à l'état frais et ont conclu que l'écoulement dans l'essai J-Ring est obstrué par les barres, ce qui crée une différence de niveau entre le béton restant à l'intérieur de l'anneau et celui passé à travers. D'autres facteurs affectent également l'écoulement dans les zones ferrillées à savoir : l'élanement de la fibre, la teneur des granulats et les caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment. Groth [110] a suggéré des propositions illustrée dans le tableau 2.3 pour éviter le blocage des fibres métalliques à crochets de différents élanements.

Tableau 2. 3 : Recommandation concernant l'espacement normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAP fibrés [110].

c/Lf	Lf/df	Max. mf [kg/m³]
≥ 3	80	30
	65	60
≥ 2	65	30
	45	60
≥ 1,5	45	30

Avec c : espacement entre les barres.

m_f : dosage en fibres (kg/m^3 de béton).

Gülsan et al.[115] ont indiqué que les valeurs du rapport de blocage à la boîte en L des échantillons diminuent en fonction du dosage en fibres. La variation était respectivement de l'ordre de 0.96, 0.92 et 0.9 pour les mélanges contenant des fibres d'acier à 0%, 0.5% et 1%. Cependant, ils ont noté également que tous les mélanges ont une capacité de passage adéquate. D'autre part, Zamir et al. [114] ont indiqué qu'uniquement le mélange du BAP avec 1.25% FM a échoué dans le test de L-box et que les fibres ont tendance à provoquer un blocage au coin de la boîte en L. Pour cela R. Hameed et.al [117], ont recommandé d'utiliser des fibres d'acier d'une taille 2 à 3 fois supérieure à la taille maximale des granulats pour une meilleure efficacité. Par conséquent, un espacement plus important des barres est nécessaire car la taille de la fibre est supérieure à celle des agrégats pour éviter tout blocage.

En revanche, Rafat et al. [118], ont trouvé l'inverse, l'augmentation du taux de fibres d'acier à extrémité crochue de 30mm de longueur dans le BAP, n'affecte pas de manière significative le rapport de blocage, les mélanges du BAP présente une légère diminution du rapport de blocage avec l'augmentation du taux d'incorporation, mais tous les rapports (H_2 / H_1) était entre 0,8 à 0,98 et dans les limites de EFNARC [119]. Les auteurs ont noté qu'aucun signe de blocage n'a été observé et que chaque BAP étudié présente une capacité de remplissage et de passage suffisante.

2.10 Influence des fibres sur les propriétés du BAP à l'état durci

2.10.1 Comportement à la flexion

Les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion sont les propriétés mécaniques qui permettent de caractériser un BAP fibré à l'état durci. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration.

L'amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des BAP fibrés dépend de l'augmentation de la quantité de fibres selon Groth [110]. Alcantara et al. [120,121] ont analysé le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres, l'une métallique (Fibraflex FM 30 x 1,6 x 0,03 mm) et l'autre synthétique (polypropylène FS 50 x 1,6 x 0,4 mm). Les dosages utilisés étaient de $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ pour FM, $9 \text{ kg}/\text{m}^3$ pour FS et $(10 \text{ FM} + 4,5 \text{ FS}) \text{ kg}/\text{m}^3$ pour un mélange de fibres. Les résultats obtenus montrent :

- Les fibres métalliques «FM» réputées très adhérentes à la matrice ont conduit à une augmentation de la capacité portante néanmoins la résistance résiduelle chute rapidement pour des flèches imposées plus élevées.
- Les fibres synthétiques «FS», elles, n'ont pas permis d'augmenter la capacité portante, mais elles confèrent au système une résistance résiduelle post-pic qui sera maintenue jusqu'à des ouvertures des fissures très larges.
- L'association des deux types de fibres peut donc constituer un compromis efficace pour améliorer la résistance à la flexion des BAP et prolonger le plateau de la capacité portante résiduelle des structures jusqu'aux larges ouvertures des fissures.
- Les BAP se caractérisent par une adhérence fibre-matrice supérieure par rapport au béton vibré, que ce soit avec des fibres métalliques ou synthétiques.

La figure 2.16 illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en termes de courbe force-flèche.

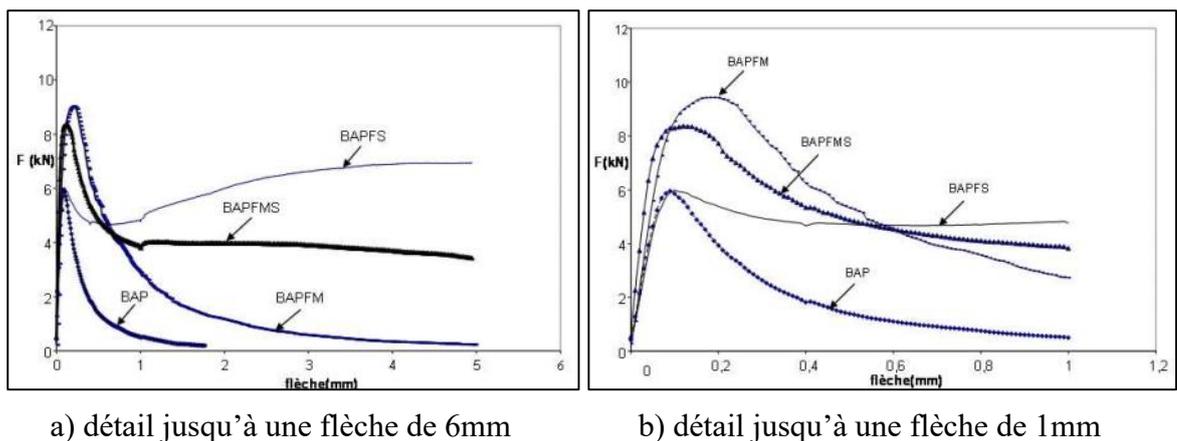


Figure 2. 16: Courbe effort-flèche pour différentes compositions [120].

Kawamata et al. [106] ayant utilisé des fibres métalliques de longueurs différentes 8, 16, 24 et 32 mm et un dosage volumique maximal en fibres de 1%, conclue que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliore le comportement à la flexion des bétons.

2.10.2. Comportement à la compression et à la traction

Dans son étude Alcantara et al. [120] a conclu que l'adjonction de fibres dans un BAP n'affecte pas de manière significative sa résistance à la compression. Cette dernière est légèrement faible au jeune âge à cause, peut-être, d'un effet de retard de

l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, liée aux adjuvants. Cependant, la résistance atteint celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L, à long terme.

Pons et al. [122] ont effectué des essais de traction directe sur les compositions des bétons fibrés et ils en ont tiré les principales conclusions suivantes :

- Les fibres métalliques étant très adhérentes confèrent au matériau une résistance apparente en traction améliorée en agissant dès la microfissuration, c'est-à-dire dès les plus faibles ouvertures de fissures.
- Les fibres synthétiques, quant à elles glissantes, vont ponter les macro-fissures en faveur d'une résistance résiduelle à la traction maintenue, n'étant mises en tension que progressivement.
- les deux types de fibres ont des effets complémentaires en agissant sur des niveaux d'ouverture de fissure différents.

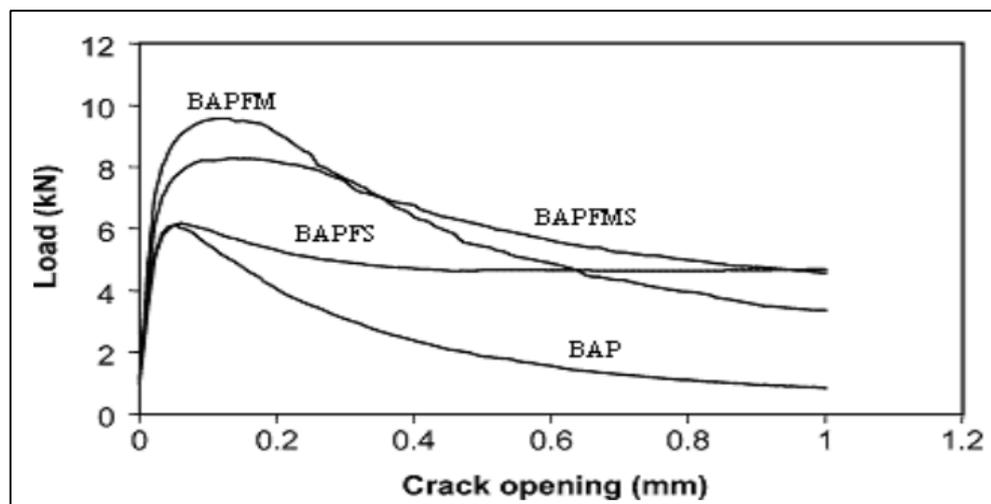


Figure 2. 17 : Comportement à la traction de différentes compositions [122].

2.10.3 Retrait

Negin et al. [123] ont évalué le potentiel d'utilisation des différentes fibres pour réduire le retrait de séchage du béton. Ils ont indiqué que l'utilisation des fibres de polypropylène, de polyoléfine et d'autres en acier conduit à une diminution de la déformation provoquée par le retrait de séchage pour les échantillons de béton renforcé par les fibres par rapport au béton témoin. D'après la comparaison des performances des fibres, ils ont signalé que les fibres d'acier ont contribué de manière significative à la réduction du retrait (29% à l'âge de 28 jours). Tandis que pour les fibres de polyoléfine et de polypropylène la diminution du retrait de séchage final est respectivement de 13% et 12%. Pour les auteurs, l'impact des

fibres de polypropylène sur la réduction du retrait, qui est le plus faible, est expliqué par la faible longueur des fibres et de leur faible module d'élasticité.

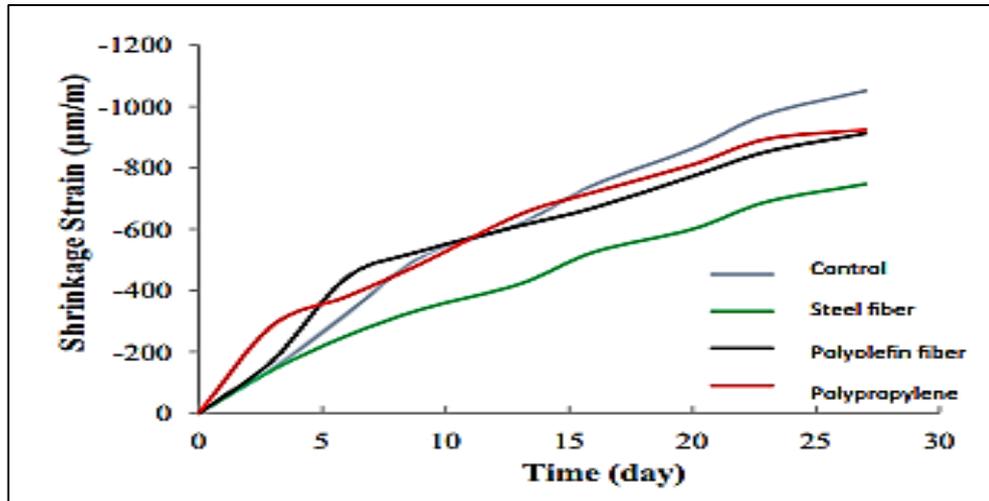


Figure 2. 18 : Effet des différents types de fibres sur la contrainte de retrait [123].

2.10.4 La perméabilité à l'eau

Bolooki et al. [124], ont examiné l'effet des fibres synthétique sur les paramètres de la durabilité du béton. Ils ont rapporté que l'addition de macro fibres synthétiques polyoléfine a des effets positifs sur la réduction de la perméabilité à l'eau du béton parce qu'elles limitent l'initiation et la propagation de fissures. Les fibres distribuées aléatoirement empêchent les microfissures de se développer en macro-fissures. De plus, les fibres peuvent jouer un rôle positif dans le colmatage de la connectivité des pores perméables à grande échelle. Pour cette raison, l'eau ne peut pas passer facilement dans le béton. Les fibres synthétiques avec réseau de fibrillation ont moins de performances en termes de réduction de la perméabilité à l'eau en raison d'un blocage moindre du chemin d'eau.

D'autre part, Zhang et Li [125] ont mentionné une tendance à la diminution de la profondeur de la perméabilité à l'eau avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres. Lorsque la fraction de fibres de polypropylène augmente de 0% à 0,12%, la longueur de la perméabilité à l'eau diminue de 20% à 8,7 mm et à 7 mm. Cela est attribué à un grand nombre de fibres de polypropylène qui se répartissent uniformément dans le composite de béton pour former une structure en grille qui exerce un effet de soutien sur le granulats et réduit le ressuage et la ségrégation du mélange de béton frais. Ainsi, les fibres de polypropylène réduisent le nombre de microfissures dans le béton qui peuvent être considérées comme des

canaux d'infiltration d'eau dans le béton. Par conséquent, la perméabilité du béton à l'eau peut être améliorée avec l'ajout de fibres de polypropylène.

2.10.5 Pénétration aux ions chlorure

Selon El-Dieb [126], une augmentation de la charge totale passante avec l'augmentation de la fraction volumique de fibres d'acier dans le BAP a été enregistrée. Ce qui pourrait être attribué à la conductivité électrique des fibres. De plus, toutes les valeurs de perméabilité aux ions chlorure enregistrées indiquent une très faible perméabilité selon la classification ASTM C1202. Ils ont noté également que les valeurs de résistivité enregistrées pour tous les mélanges sont très élevées, et constituent, par conséquent, une très bonne protection des armatures en acier contre la corrosion.

D'autre côté, Frazão et al. [127], ont indiqué qu'il est possible d'observer au cours de l'essai de diffusion des ions de chlorure par migration en régime non stabilisé, la formation de matière corrodée dans la solution cathodique et l'accumulation d'ions de chlorure dans l'interface fibre-pâte détériorent le film d'oxyde protecteur des fibres d'acier, les rendant plus vulnérables à la corrosion.

Yehia et al. [128], ont montré que de la résistance à la pénétration des ions de chlorure des BAP fibrés sont très bas. Cependant, ils ont montré une pénétration de chlorure supérieure à celle du mélange témoin, soulevant des préoccupations concernant l'application des fibres d'acier dans le béton en raison de leur potentiel de corrosion qui est élevé. Les auteurs attribuent ce comportement à la plus grande section transversale et au frottement accru des fibres d'acier. Des observations similaires concernant les signes de corrosion sont également indiquées par les auteurs, mais ils ont mentionné qu'une telle corrosion ne peut se produire que localement c'est-à-dire à la surface du béton et que rien ne permet de penser qu'elle peut se propager plus profondément dans le béton. Quelque soit la maniabilité du béton, les fibres se maintiennent toujours à la surface du béton et peuvent se corroder en créant des taches brunâtres.

2.10.6 Absorption capillaire

L'incorporation des fibres d'acier augmente l'absorption d'eau de 9% par rapport aux échantillons non fibrés. Les fibres augmentent la connectivité entre les pores et les micro-canaux qui facilitent la pénétration d'eau à l'intérieur du béton, ce qui entraîne une absorption plus élevée selon Koushkbaghi et al. [129]. D'autre côté, Farazo et al. [127], ont indiqué que la quantité totale d'eau absorbée est plus grande dans le BAP non renforcé que

dans le BAP fibré, mais le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est similaire dans les deux compositions, ce qui signifie que la présence de fibres n'a pas provoqué de modification substantielle de la porosité capillaire de la surface du BAP fibrés, afin de faciliter la pénétration d'agents détériorant.

Alors que, Afroughsabet et al. [130], ont rapporté que les fibres d'acier à extrémités crochues à un effet significatif sur l'absorption d'eau du béton. L'absorption d'eau par capillarité du béton avec les granulats naturels est réduite de 29% avec l'inclusion de 1% de fibres d'acier. De même, l'absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés contenant des fibres d'acier était jusqu'à 23% inférieure à celle des mélanges sans fibres. Cela est attribué à l'inclusion des fibres qui limitent la formation et la propagation des fissures dans le béton, réduisant ainsi sa perméabilité.

2.12 Effet des additions minérales sur les performances des BAP

Pour lutter contre les changements climatiques et améliorer certaines caractéristiques du béton, il est plus efficace d'avoir recours aux ajouts cimentaires qui sont essentiellement des résidus d'autres industries ou des produits naturels comme les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle...etc. Grâce à l'introduction des ajouts, la consommation en clinker baisse dans la confection du ciment, ce qui est un facteur bénéfique, la dépense en énergie étant moins importante.

Il est possible d'ajouter une addition minérale ou de la substituer au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou bien l'ajouter directement dans le malaxeur lors de la confection du béton. Cela permet d'améliorer certaines propriétés ou de conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'ajout: les ajouts inertes et les ajouts réactifs [131]. L'addition des ajouts cimentaire telles que les cendres volantes et le laitier dans la formulation du béton affecte positivement ces propriétés à l'état frais. La composition du ciment, la concentration du C_3A , le rapport C_2S/C_3A , la finesse du ciment et le type de superplastifiant utilisé peuvent gérer l'écoulement du béton à l'état frais [132].

2.12.1 Effet des additions minérales sur les performances des BAP à l'état frais

L'introduction des additions minérales à savoir les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et le calcaire améliorent la fluidité et la cohésion, limite la chaleur d'hydratation et permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des pâtes de ciment [133]. Ramanathan et al. [134] ont montré dans leur étude que, pour obtenir une fluidité donnée, on peut réduire la quantité de superplastifiant nécessaire par l'utilisation des

ajouts cimentaires. La viscosité varie sensiblement d'une addition minérale à l'autre et dépend de propriétés de chacune et de son interaction avec le superplastifiant et les grains du ciment. La pouzzolane naturelle augmente la viscosité des mortiers. Alors que, le laitier et le calcaire la diminuent même sans utilisation de superplastifiant. Par ailleurs, l'effet du laitier est le plus efficace jusqu'à un taux de substitution égal à 20% [33].

Pour Boukendakdji et al. [135], l'utilisation de matériaux locaux comme le laitier peuvent produire un bon béton autoplaçant. Substituer le laitier au ciment permet d'améliorer les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais. Il a été, alors, observé une amélioration de l'ouvrabilité jusqu'à 20% de substitution de laitier avec un optimum de 15%. La contrainte de cisaillement et la viscosité plastique ont connu des valeurs décroissantes.

Par ailleurs, Dinakar et al. [136], ont montré que le temps d'écoulement V-funnel est inversement proportionnel à la teneur en cendres volantes. En effet, jusqu'à 50% de substitution, on constate une diminution du temps T_{vf} . Le T_{50} et V-funnel sont considérés comme indicateurs de la viscosité des bétons très fluides, les mélanges ayant des propriétés acceptables à l'état frais [137]. En outre, Gesoglu et al. [138] ont montré que le temps d'écoulement du BAP à travers l'entonnoir en V suite à l'utilisation du ciment ternaire (ciment portland, fumée de silice et laitier) figure dans la plage recommandée par l'EFNARC [119].

D'autre part, l'addition des quantités la poudre de marbre et filler calcaire ont augmenté la viscosité. Au contraire, l'ajout de fumée de silice dans les systèmes ternaires diminue les viscosités des mélanges par rapport aux mélanges binaires, augmentant le temps de prise des mélanges du BAP par rapport à celui du béton de référence [139]. Par ailleurs, les propriétés rhéologiques des BAP à haute performances déterminent leur teneur en air. En effet, il y a corrélation entre les paramètres rhéologiques d'un béton frais et l'air entraîné. D'autre part, la diminution de l'air occlus dans le béton frais résulte de la diminution de son taux de cisaillement [140].

2.12.2 Effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP

Les comportements mécaniques des BAP peuvent être affectés par une modification de la cinétique d'hydratation suite à l'introduction d'ajouts cimentaires. En effet, Saric-Coric [141] a montré que les résistances des bétons à base de laitier restent toujours inférieures à celle du béton de référence et quelle sont inversement proportionnelle. Menendez et al. [142], ont constaté que les fillers calcaires et le laitier de haut fourneau sont complémentaires ; les

fillers calcaires améliorant la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme par la réaction pouzzolanique qui raffine les systèmes de pores. Ils ont indiqué également que le mélange de ciment ternaire est plus avantageux que celui des ciments binaires et des ciments Portland sans ajouts. Ils ont réussi à établir une combinaison optimale renfermant 70% de ciment Portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire. La résistance à la compression des BAP est augmentée par l'introduction de la fumée de silice, la résistance à la compression est d'autant plus grande que le taux de substitution est grand [143].

2.13 Conclusions

L'étude bibliographique dans ce chapitre a été menée dans le but de faire le point sur l'effet des fibres sur les performances des bétons autoplaçants à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. De plus, nous nous sommes intéressés aussi à l'influence du laitier sur les caractéristiques des BAP.

Nous avons vu que les bétons renforcés de fibres métalliques ou synthétiques permettaient d'améliorer, sous certaines réserves, les capacités mécaniques du matériau initial béton. Ainsi, les fibres améliorent le comportement du béton vis-à-vis de la fissuration. Cette fissuration se propage mais avec des ouvertures plus fines. Le béton fibré gagne en ductilité d'autant plus que l'énergie pour atteindre la ruine finale est importante. Toutefois, la synthèse bibliographique a montré également que l'incorporation des fibres dans la formulation du BAP a des effets négatifs sur les propriétés rhéologiques du BAP. D'autre part, l'addition d'ajouts minéraux, comme le laitier, peut améliorer les propriétés des BAP aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Les études rapportées portent essentiellement sur les connaissances relatives aux caractéristiques des bétons autoplaçants fibrés, par des fibres industrielles ou synthétiques, à l'état frais et à l'état durci, et se sont concentrées beaucoup plus sur leurs effets sur les capacités mécaniques du BAP fibré. Cependant, la performance des BAP fibrés avec des fibres issues du recyclage de pneus usés est peu étudiée, particulièrement les propriétés physiques et celles de la durabilité du BAP fibré

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

3.1 Introduction

Le présent chapitre présente, dans sa première partie, les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation des différents mélanges du BAP. La formulation et la méthodologie suivie pour déterminer les différentes performances des mélanges font l'objet de la deuxième partie.

3.2 Caractérisation des matériaux

3.2.1 Le sable

Un sable dunaire a été utilisé dans cette étude, il provient de la région d'Oued Souf. Il est largement utilisé dans les hauts plateaux et au Sud de l'Algérie dans le domaine du bâtiment. La distribution granulométrique du sable est montrée sur la figure 3.1 et les caractéristiques physiques du sable sont regroupées dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable.

Granulats	Sable
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1650
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	2580
Module de finesse (Mf)	2.53
Equivalent de sable visuel (%)	80.33
Equivalent de sable au piston (%)	77.33
Coefficient d'absorption	1%

3.2.2 Le gravier

Nous avons utilisé des granulats concassés, provenant d'un gisement de calcaire (carrière de Sétif), composé de deux classes granulaires ; la classe 3/8 et la classe 8/15. Les propriétés physiques des granulats utilisés sont présentées dans le tableau 3.2. La figure 3.2 présente les courbes granulométriques des graviers.

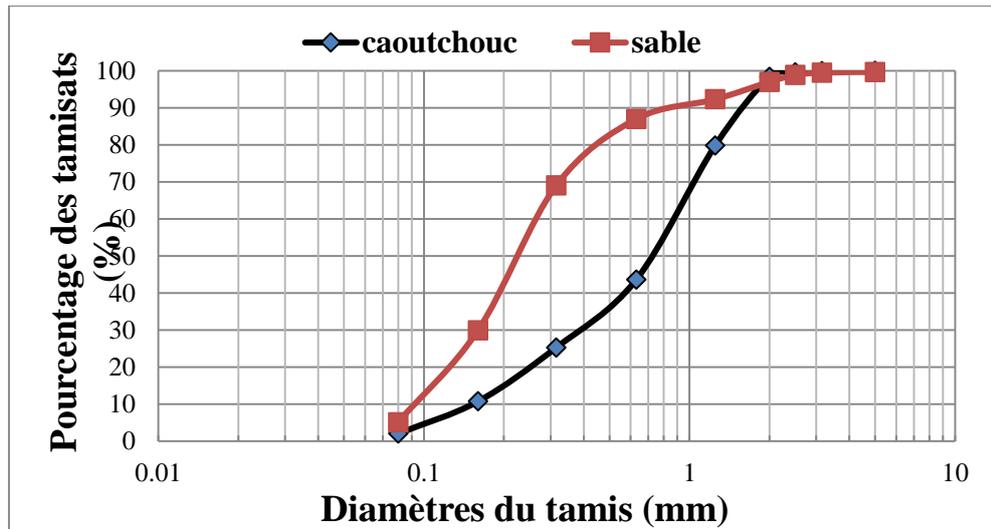


Figure 3. 1: Courbes granulométriques du sable et du caoutchouc.

Tableau 3. 2: Propriétés des granulats

Granulats	Classe granulaire (mm)	Densité absolue	Densité apparente	Coefficient d'absorption
Gravier	3/8	2.57	1.44	0.8%
	8/15	2.53	1.47	0.59%

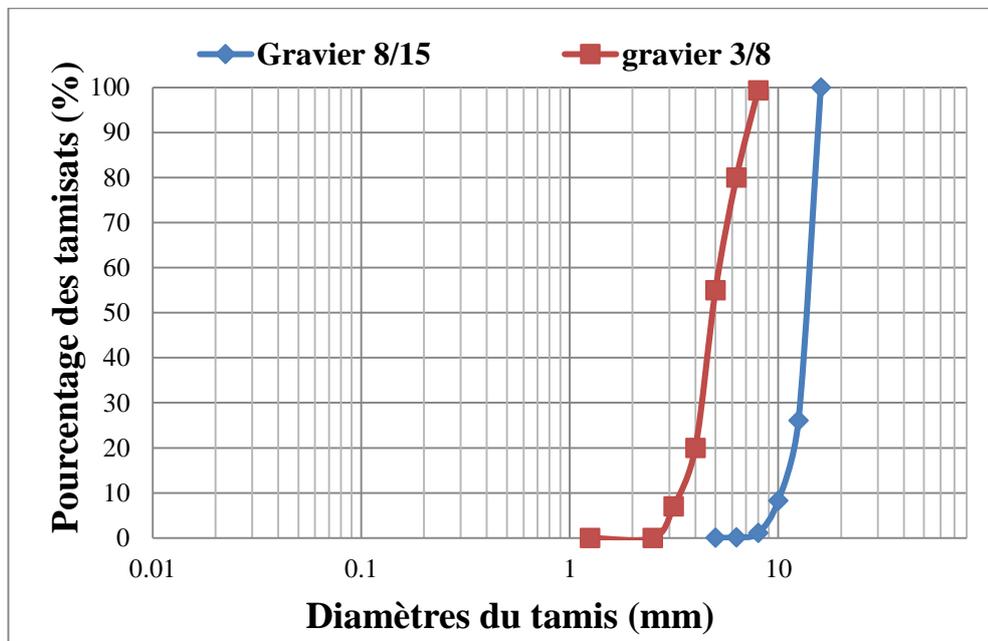


Figure 3. 2: Courbe granulométrique des graviers

3.2.3 Le ciment

Un seul type de ciment a été utilisé dans notre étude. Le ciment CEM II/B 42,5 N issu de l'usine de Lafarge à M'sila en Algérie. Le choix de ce ciment est justifié par l'étude des performances des bétons autoplaçants avec les matériaux les plus disponibles au marché. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5 MPa et une résistance à la compression à 28 jours de 45,55 MPa. La résistance à la compression a été réalisée sur un mortier normalisé conforme à la norme [EN 196-1], [144]. La composition chimique et minéralogique du ciment est présentée dans le tableau 3.3 et leurs caractéristiques physiques et mécaniques dans le tableau 3.4.

Tableau 3. 3: La composition chimique et minéralogique du ciment.

Composition chimique (%)										
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	P₂O₅	TiO₂
61,59	18,66	4.51	2.15	1.58	2.06	0.15	0.61	7,81	0.15	0.22
Composition minéralogique (%)										
C₃S		C₂S			C₃A		C₄AF			
67.85		12.29			7.33		8.67			

Tableau 3. 4 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

	ρ_{app} (kg/m³)	ρ_{abs} (kg/m³)	SSB (cm²/g)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
CEM II/42,5	1052	3145	4642	90	285

3.2.4 Le laitier

Dans cette étude, un laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba) a été utilisé comme addition. Ce laitier est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm de couleur jaune clair (Figure 3.1). Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans certaines compositions du BAP,

nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à 50 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter ainsi son broyage. Ensuite, un broyage total a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg. Enfin, la quantité finale de laitier obtenue après le broyage a été mélangée dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Dans notre étude, une seule finesse du laitier de 3500 μm est utilisée. La masse volumique apparente du laitier est de 956 kg/m^3 et sa masse volumique absolue est 2850 kg/m^3 . L'analyse chimique du laitier est donnée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3. 5: Composition chimique du laitier d'El Hadjar [52]

Elément	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Ca O	Mg O	Mn O	K₂ O	SO₃	Ti O₂
%	40,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1.20

3.2.5. Caoutchouc

Afin d'atteindre les objectifs de la thèse, des granulats en caoutchouc livrés par une société de recyclage de pneus usagés située à Oued Semar, wilaya d'Alger, ont été utilisés. Cette société est dotée d'une unité de recyclage de pneus usagés.

Les nouvelles technologies de broyage des pneus permettent de séparer le caoutchouc d'autres composantes (fils métalliques, fibres textiles), générant ainsi des particules en caoutchouc pratiquement pures (avec un taux résiduel inférieur à 0,05%).

Les particules en caoutchouc ont été utilisées comme substitution partielle du sable en volume. Ces granulats (G. C) ont les dimensions des grains sont comprises entre 0 et 2mm (Figure 3.3.) Nous signalons que ces particules ne présentent pas une distribution granulométrique similaire à celle du sable naturel. La densité des granulats de caoutchouc est de 0.77, donc très inférieure à celle des granulats naturels et que leur coefficient d'absorption d'eau est presque négligeable 0,24. Leur distribution granulométrique est présentée dans la figure 3.1.



Figure 3. 3: Particules en caoutchouc utilisées dans le programme expérimental.

3.2.6 Les fibres métalliques recyclées (FMR)

Les fibres métalliques recyclées (FMR) utilisées dans cette étude sont des fibres issues du recyclage de pneus usés (Figure 3.6) provenant d'une unité de recyclage de pneus usagés située à Hammadi wilaya de Boumerdès (Algérie).

Les FMR ont été utilisées à l'état brut avec une masse volumique de 3.6 kg/m^3 ; ces fibres ont une forme irrégulière, leurs caractéristiques géométriques (longueur, diamètre) ne sont pas uniforme, de plus, elles contiennent une certaine quantité de grains de caoutchouc.

Dans le but d'identifier la géométrie des FMR c'est-à-dire la longueur et le diamètre de la fibre qui sont les paramètres les plus importants pour caractériser les fibres, et vu la variété de leurs géométries (Figure 3.4-a), nous avons utilisé un pied à coulisse pour évaluer la géométrie d'un échantillon de 2000 fibres choisies aléatoirement comme il est illustré dans la figure 3.4-b.

Les résultats de la mesure à l'aide d'un pied à coulisse montrent que les diamètres des fibres variaient entre 0.1 et 1.60 mm. La classe qui comprenait le plus grand nombre de valeurs de diamètre était de 0.2 mm (30%), suivie par les classes 0.3 et 0.1 mm qui présentent des fréquences de 16.2% et 16.05% respectivement, comme le montre la figure 3.5. La valeur moyenne du diamètre était de 0,25 mm.

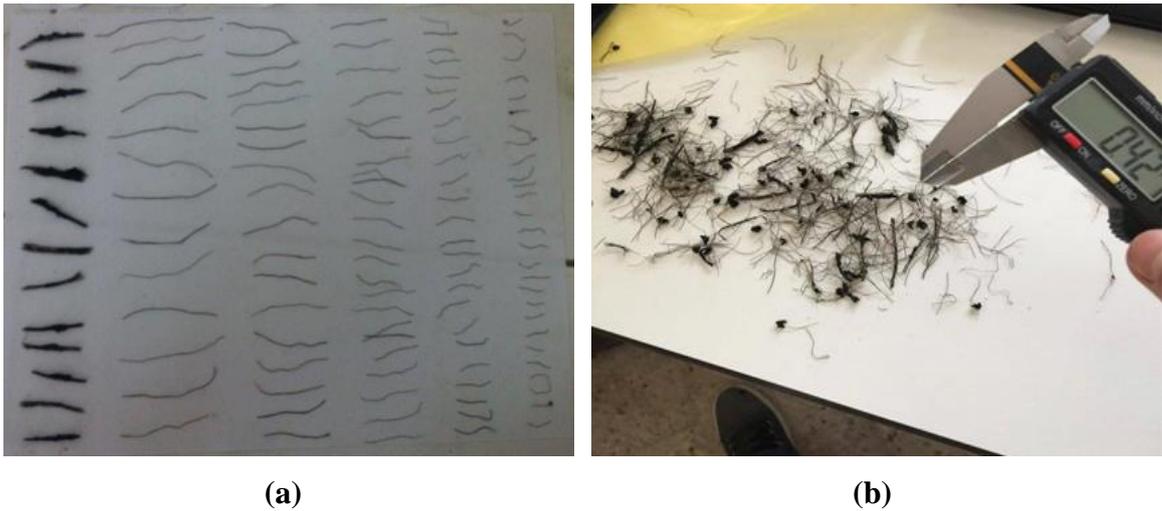


Figure 3. 4: (a) Mesure des longueurs des fibres FMR. (b) Mesure de géométrie des fibres à l'aide d'un pied à coulisse.

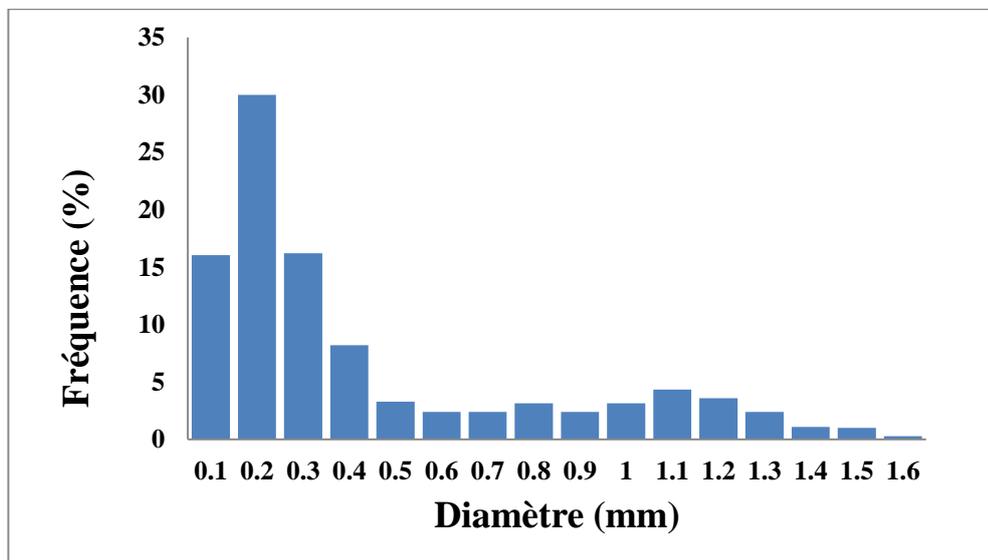


Figure 3. 5: La variation des diamètres de fibres recyclées d'un échantillon de 2000 fibres.

En outre, la longueur des fibres variait entre 5 et 100 mm. La classe principale comprenant des fibres de longueurs allant de 30 à 35 mm (22.5%), suivie par la classe 25-30 mm avec une fréquence de 21.35%, comme le montre la figure 3.6. La longueur moyenne des fibres était de 27.5 mm.

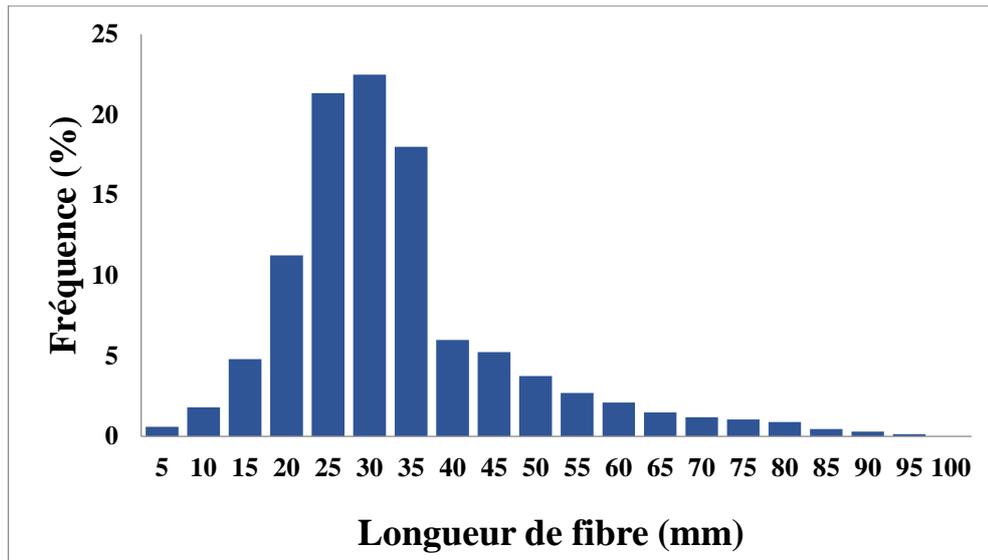


Figure 3. 6: La variation des longueurs de fibres recyclées d'un échantillon de 2000 fibres.

Le taux de caoutchouc dans les FMR a été évalué en procédant de la manière suivante : tout d'abord, nous avons pesé une quantité de fibres d'environ 100 g, ensuite nous les avons séparées du caoutchouc et enfin nous avons pesé la quantité du caoutchouc obtenue. La formule suivante relatant le taux :

$$\% \text{ caoutchouc} = \frac{M_{\text{caoutchouc}}}{M_{\text{caoutchouc+ fibre}}} \times 100 \quad 3.1$$

Le taux de caoutchouc dans les fibres a été évalué approximativement à 10% du poids des FMR.

3.2.7 Les fibres industrielles Dramix (FM) :

Les fibres industrielles Dramix (FM) dont la longueur est de 50 mm et diamètre de 0,5 mm, comportent à chacune de leurs extrémités un façonnage en forme de baïonnette appelé « crochet » destiné à favoriser son ancrage dans le béton (Figure 3.7). Les caractéristiques détaillées concernant ces fibres sont présentées dans le tableau 3.6.

Tableau 3. 6: Caractéristiques techniques des fibres métalliques à crochets Dramix.

Longueur de fibre	Lg = 50mm (± 3 mm)
Diamètre du fil	D = 0.62 mm (± 0.02 mm)
Longueur des extrémités des crochets L	1.5 ≤ / ≤ 4 mm
Angle de crochet	α ₁ ≥ 20°
Résistance à la traction du fil	R _m ≥ 1050 N/mm ²



Figure 3. 7: Les fibres métalliques à crochets Dramix.

3.2.8 Les adjuvants

Pour avoir une fluidité parfaite et une homogénéité nécessaire d'un béton auto-plaçant (BAP), l'utilisation d'un adjuvant est donc indispensable. Pour cela l'adjuvant retenu dans notre travail est un super-plastifiant haut réducteur d'eau à base de poly-carboxylates. Ces derniers sont des molécules ayant un double effet sur la dispersion des particules [68] qui permet la fabrication d'un béton auto-plaçant transporté sur de longues distances et pompé, il améliore la stabilité et limite la ségrégation. Le super-plastifiant choisi commercialisé sous le nom MEDAFLOW 30 de la société Granitex, se présente sous forme d'un liquide avec une plage de dosage comprise entre 0.5% à 2% en masse de poudre. Sa densité est de 1,06, sa teneur en ions de chlorure est inférieure à 0,1% et possède entre 28.0 et 31.0 % d'extraits secs.

3.3 Formulations adoptées

La méthode de la formulation adoptée dans notre travail est la formulation Japonaise d'Okamora c'est à dire la méthode basée sur l'optimisation des mortiers [145,146]. Cette méthode est fortement dosée en liant et conduit à des volumes de pâtes importants. De ce fait, pour atteindre un béton auto-plaçant avec des propriétés désirées, on détermine avec précision la quantité nécessaire pour chaque matériau. Le rapport Eau/Liant étant considéré comme le paramètre le plus important dans la formulation, nous avons fixé le rapport à 0.42. Ensuite, le dosage en superplastifiant a été optimisé par des essais sur mortier

afin d'obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable, puis nous passons directement à la confection du BAP.

3.3.1 Formulation du mortier autoplaçant

L'objectif de la formulation du mortier autoplaçant est d'optimiser le dosage en superplastifiant, parce qu'il serait vain de vouloir comprendre le comportement du béton sans connaître celui de la pâte qui le compose. Celle-ci est constituée de ciment, de sable, d'eau et d'adjuvants, ainsi la formulation du mortier va nous permettre d'optimiser le dosage optimal en superplastifiant. La formulation des mortiers autoplaçants est déterminée à partir d'un programme Excel d'aide à la formulation Annexe A [147]. La seule variable étant le dosage en superplastifiant, nous gardons un rapport constant entre l'eau et le liant dans tous les mélanges. Des essais expérimentaux sur mortier frais vont nous permettre de choisir le dosage en superplastifiant afin d'obtenir un MAP ayant un étalement entre 270 et 330 mm et un temps d'écoulement V-funnel entre 2 et 6 secs [148].

Afin de concevoir des mortiers autoplaçants (MAP), la composition du mortier donné à l'annexe A [147] nous permet de calculer et de déterminer les quantités des ingrédients (ciment, sable, eau et superplastifiant) pour un volume donné d'un MAP. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit (Figure 3.8) :

- Pour avoir un mélange homogène, on a utilisé un malaxeur à mortier pendant une minute pour malaxer à sec le ciment et le sable.
- Malaxage du mélange homogène avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) pendant une (1) minute,
- Malaxage pendant une (1) minute avec le mélange de superplastifiant et le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- Malaxage du mélange pendant 3 minutes.

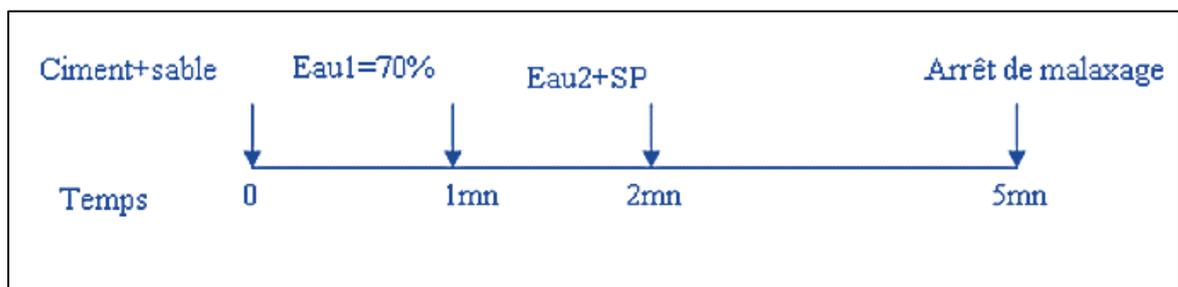


Figure 3. 8: Séquence de malaxage du mortier [147].

3.3.2 Essais réalisés sur MAP

3.3.2.1 Essai d'étalement au Mini-Cône

L'étalement au Mini-Cône est évalué par utilisation d'un moule tronconique de dimensions suivantes : 40 mm de hauteur, avec un diamètre de 70 mm en haut et de 80 mm en bas [148]. L'essai d'étalement consiste à placer le moule tronconique rempli de mortier au centre d'une surface horizontale lisse, le cône est ensuite soulevé laissant la pâte s'écouler sur la table. Le diamètre d'étalement du mortier est la moyenne (D_{moyen}) entre le diamètre de deux directions perpendiculaires. Le (D_{moyen}) est calculé comme suit :

$$D_{\text{moyen}} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad 3.2$$

La figure 3.9 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



Figure 3. 9: Essai d'étalement pour Mortier.

3.3.2.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans le but d'évaluer la vitesse d'écoulement du MAP, un essai à l'entonnoir en V a été effectué. Le principe de cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du mortier entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir rempli par 1.1 litre de mortier et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. La figure 3.10 montre le dispositif de l'essai à l'entonnoir en V.



Figure 3. 10: Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier

3.3.3 Formulation du béton autoplaçant (BAP)

Nous avons adopté une formulation basée sur la méthode Japonaise (la méthode générale) et les proportions de chaque constituant du béton autoplaçant ont été déterminées à l'aide d'un programme Excel Annexe B [147], sachant que nous prenons en considération les différentes données relatives aux matériaux utilisés. En outre, pour tous les mélanges du BAP formulés, les mêmes constituants, le même squelette granulaire et un rapport E/L constant ont été utilisés. Des essais d'ouvrabilité sur le béton frais ont été réalisés afin de vérifier le dosage en superplastifiant.

Un mélange de béton autoplaçant a été conçu comme un béton de référence, puis quatre séries du BAP ont été étudiées. La première série représente des mélanges de béton autoplaçant contenant des proportions de granulats de caoutchouc. Ce dernier est utilisé comme une substitution partielle du sable par volume de 0 à 30% ; la deuxième, la troisième et la quatrième série sont des mélanges de BAP fibrés avec 0.5, 0.8, 1 et 1.5% de fibres métalliques recyclées (FMR), industrielles (FM) et hybrides (FHy mélange entre recyclées (50%) et industrielles (50%)) respectivement. La série avec les FHy est répétée avec la substitution du ciment par 0%, 15% et 25% de laitier. Donc, en totalité, vingt-huit formulations ont été étudiées et leurs qualités à l'état frais ont été vérifiées par des essais d'ouvrabilité. Une fois le béton prêt, la densité fraîche, la teneur en air, l'essai d'étalement au cône d'Abrams, l'essai de l'entonnoir (V-Funnel), l'essai de la boîte en L, l'essai de stabilité au tamis et des essais au rhéomètre ont été réalisés.

3.3.4. Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état frais

3.3.4.1 Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement a été réalisé suivant le mode opératoire du guide Européen du béton autoplaçant [119]. Cet essai consiste à mesurer les deux diamètres orthogonaux de la galette de béton frais afin de déterminer sa fluidité. Cependant, cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement, le paramètre T_{50} (béton passant le diamètre 50 cm) donne une indication sur la capacité de son remplissage.



Figure 3. 11: Essai d'étalement.

Une constatation visuelle lors de cet essai d'étalement a été faite pour vérifier que les mélanges du BAP ne présentent aucun signe de ségrégation au milieu de la galette ou ressuage (excès d'eau). On peut répartir les BAP en trois classes selon la recommandation d'AFGC [75] (Tableau 3.7).

Tableau 3. 7: Classes d'étalement des BAP selon l'EFNARC [119].

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

3.3.4.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai V-funnel est utilisé pour évaluer la viscosité et la capacité de remplissage du béton autoplaçant en milieu confiné. On remplit l'entonnoir de béton, puis on le laisse reposer pendant une minute, ensuite on mesure le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit la lumière par l'orifice, les mesures et les valeurs minimales et maximales acceptables devraient être conformes à l'EFNARC [119].



Figure 3. 12: Essai V-funnel.

3.3.4.3 Essai de la boîte en L

Le test de la boîte en L est utilisé pour évaluer la capacité de passage du béton autoplaçant à travers les milieux confinés et les espaces entre les barres des armatures et autres obstacles sans ségrégation ou blocage. La partie verticale de la boîte est remplie de béton, puis on laisse reposer pendant une minute pour voir s'il y a ségrégation. Ensuite on retire la trappe, ce qui provoque l'écoulement du béton dans la partie horizontale à travers une série d'armatures formée de trois barres d'armatures $\Phi 16\text{mm}$ avec un espacement de 37.5 mm. Enfin, quand le béton s'arrête de s'écouler, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 .



Figure 3. 13: Essai de la boîte en L.

3.3.4.4 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

L'essai de la résistance à la ségrégation consiste à déterminer le pourcentage en poids de laitance passé par le tamis 5mm dans le but de quantifier et d'évaluer la résistance à la ségrégation du béton autoplaçant, en conservant, pendant 15 minutes, une quantité de 10 litres de BAP dans un sceau que l'on couvre pour éviter la dessiccation. 15 minutes plus tard, il faut verser $4.8 \text{ kg} \pm 0.2 \text{ kg}$ de béton sur le tamis à une hauteur de chute de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ et relever la masse de béton traversant le tamis. Le but est de déterminer la quantité de laitance dans le fond.

$$\% \text{ laitance} = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{echantillon}}} \times 100 \quad 3.3$$

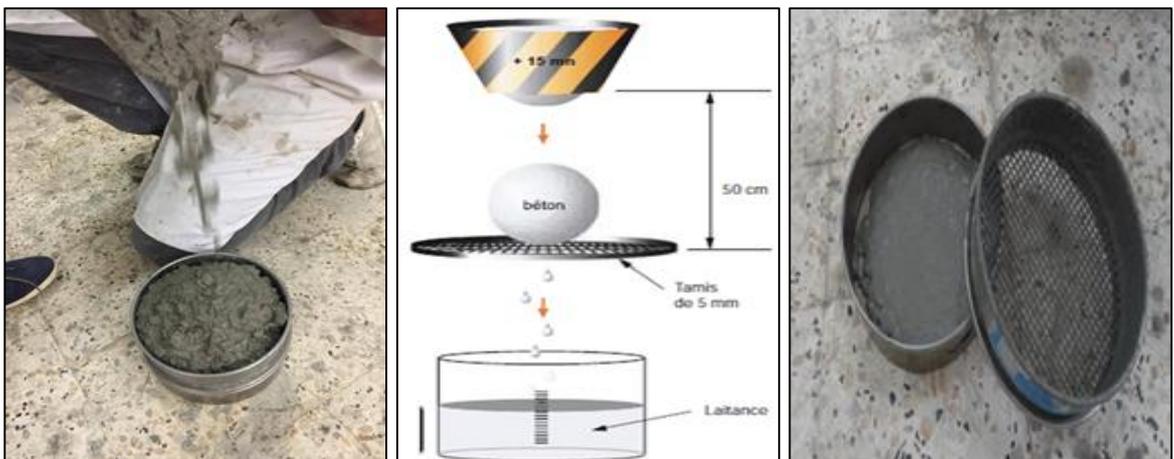


Figure 3. 14: Essai de stabilité au tamis.

Selon les recommandations de l'EFNARC [119], un béton autoplaçant doit satisfaire les différents essais de caractérisation pour être qualifié autoplaçant, le tableau 3.8 représente les valeurs préconisées pour un BAP.

Tableau 3. 8: Limites recommandées pour les BAP à l'état frais [119].

Essai	Recommandation AFGC
Essai d'étalement SF (mm)	$550 \leq SF \leq 850$
T50 (sec)	$2 \leq T50 \leq 6$
V-funnel (sec)	$6 \leq Tv \leq 12$
L-Box	$\frac{H2}{H1} \geq 80\%$
Stabilité au tamis (%)	$0 \leq \pi (\%) \leq 15$

3.3.4.5 Essai rhéologique

Pour mieux comprendre le comportement du béton autoplaçant à l'état frais, les propriétés rhéologiques ont été déterminées pour chacun des mélanges étudiés à l'aide d'un rhéomètre à béton. Le rhéomètre à béton Heidolph- RZR 2102 Control Z est utilisé pour identifier la viscosité plastique et la contrainte de cisaillement des différents mélanges de BAP.



Figure 3. 15: Rhéomètre Heidolph RZR 2102.

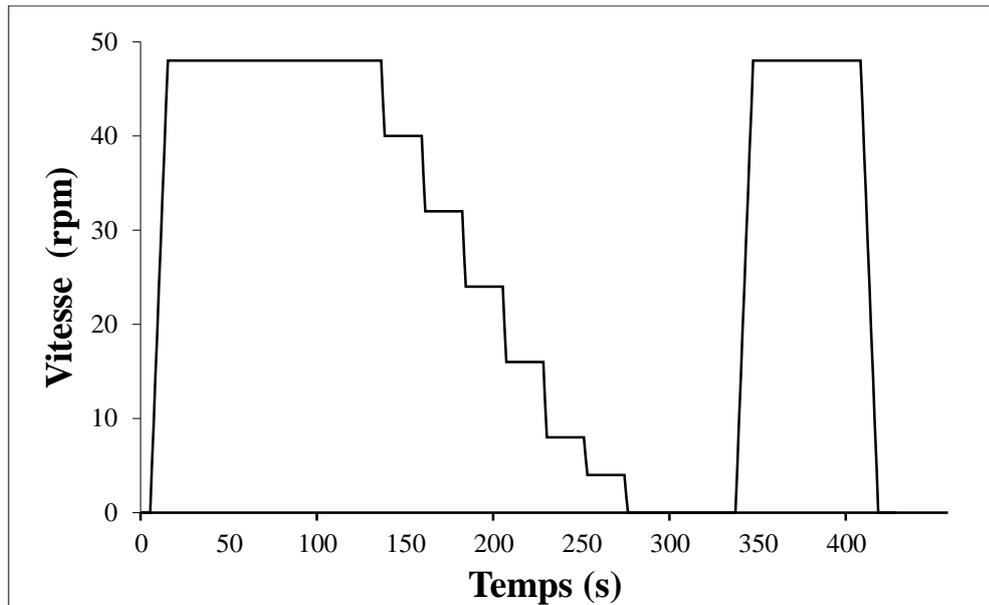


Figure 3. 16: Profil de vitesse utilisé.

Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon vane à quatre pales de 15 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 30 x 30 cm. Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses (Figure 3. 16), un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de BAP frais et de mesurer le couple appliqué. La vitesse de rotation de l'outil est imposée et les contraintes résultantes sont mesurées. Les données sont directement exportées vers une feuille de calcul Excel [77].

3.3.5 Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état durci

Après les tests sur les bétons frais, le béton frais a été versé dans les moules et recouvert de feuilles de plastique puis ils ont été stockés dans les conditions de laboratoire 75 HR et 20 °C pendant 24h ; au bout de 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau.

3.3.5.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton autoplaçant pour les différents mélanges a été examinée à l'âge de 28 et 90 jours selon la norme NF EN 12390-3 [149] sur des éprouvettes cubiques 100×100×100 mm à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de 3000 kN, la vitesse de chargement étant de 0.5 kN/s. L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire

d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance en compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque mélange.

3.3.5.2 Résistance à la flexion

Conformément à la norme ASTM C78-07 [150], l'essai de résistance à la flexion en trois points a été réalisé sur les BAP à l'âge de 28 et 90 jours. La réalisation de cet essai se faisait sur une éprouvette prismatique de BAP, de 280 mm de longueur et 70 mm de hauteur et de largeur. La résistance à la flexion est la moyenne de la résistance des trois éprouvettes.

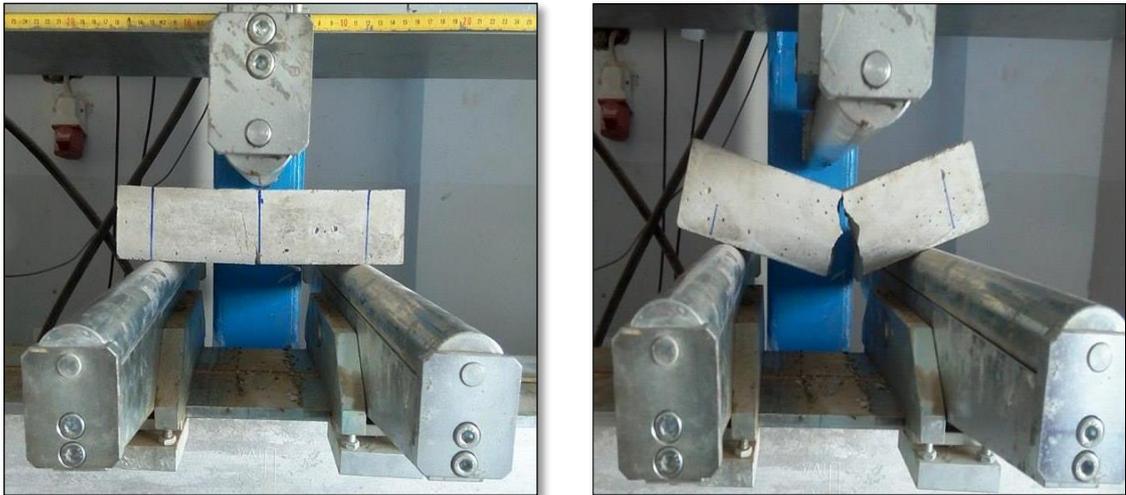


Figure 3. 17: Dispositif de l'essai de flexion à trois points.

3.3.5.3. Retrait total

L'essai du retrait s'effectue conformément à la norme ASTM C157 [151] sur éprouvette prismatique de dimensions (70×70×280) mm. Les éprouvettes, équipées de plots métalliques à chaque extrémité, sont démoulées 24 heures après le coulage et sont conservées sans aucune protection dans les conditions de laboratoire 75 HR et 20 °C. L'éprouvette est placée verticalement entre une bille métallique et un capteur qui permet le suivi de sa longueur. Les mesures se font pendant les 180 jours.



Figure 3. 18:Essai de retrait.

3.3.5.4 La conductivité thermique

Le CT-mètre développé par le CSTB a été utilisé pour déterminer les valeurs du coefficient de conductivité thermique conforme à la norme NF EN 993-15 [152], les échantillons de forme cubique $100 \times 100 \times 100$ mm ont été utilisés. Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les échantillons sont ensuite séchés grâce à une étuve à $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ jusqu'à une masse constante. Puis, on a eu recours à la méthode du fil chaud qui permet d'estimer la conductivité thermique et la chaleur spécifique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif.



Figure 3. 19: Essai de la mesure de conductivité thermique.

3.3.5.5 Absorption capillaire

L'essai de l'absorption capillaire consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau des éprouvettes de béton sans pression hydraulique, mais avec succion capillaire des éprouvettes. L'absorption capillaire s'effectue selon la norme ASTM C1585 – 11 [153] sur des éprouvettes cubiques de 100 mm de côté conservées dans l'eau pendant 180 jours de durcissement, les éprouvettes sont séchées à l'aide d'une étuve à (50 ± 2) °C jusqu'à une masse constante. Ensuite, les faces latérales sont recouvertes de résine, la face inférieure est mise en contact avec l'eau pour assurer un écoulement d'eau unidirectionnel. Puis les éprouvettes sont immergées dans un récipient d'eau à une hauteur de 5 mm durant l'essai. Ensuite, les mesures du poids de l'éprouvette lors de l'essai se font comme suit ; les éprouvettes sont retirées du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis relancer dans le récipient. Les mesures sont effectuées selon la norme ASTM C1585 –11. Enfin le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{M_t}{a \times d} [mm] \quad 3.4$$

Où :

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm),

M_t : la différence de masse de l'éprouvette à un temps donnée (g),

a : section de l'éprouvette (mm^2),

d : densité de l'eau (g/mm^3).

3.3.5.6 Perméabilité à l'eau

L'essai de perméabilité à l'eau consiste à mesurer la profondeur de pénétration de l'eau dans des éprouvettes cubiques de 150 mm de côté à l'âge de 180 jours de durcissement dans l'eau sous une pression constante de 5 bars pendant 72 heures selon la norme allemande DIN 1048 [154]. A la fin de la période de l'essai, les éprouvettes sont ensuite divisées en deux parties par l'essai Brésilien. Ensuite, à l'aide d'un pied à coulisse, nous mesurons la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur.

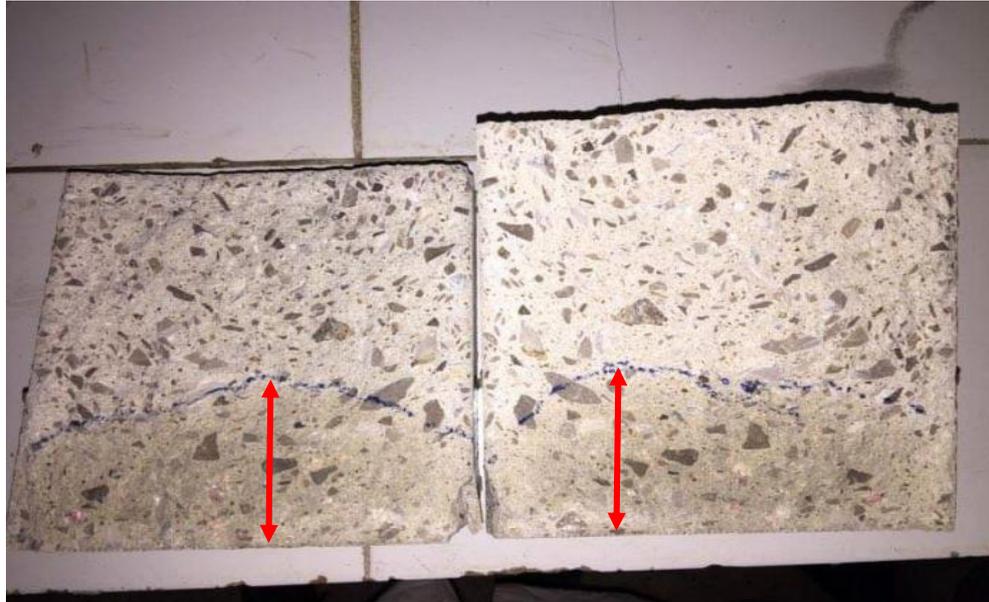


Figure 3. 20: Mesure de la profondeur de pénétration de l'eau.

3.3.5.7 La pénétration aux ions de chlorure

La résistance à la pénétration des ions de chlorure a été examinée par des essais de diffusion ou migration sous un champ électrique. Conformément à la norme ASTM C1202 – 12 [155], à l'âge de 180 jours, des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur, dont les côtés sont protégés par une résine pour éviter toute fuite durant l'essai. Par ailleurs, pour éliminer l'air à l'intérieur des éprouvettes, l'échantillon est placé dans une enceinte fermée, sous une pression constante pendant 3 heures, ensuite l'eau est progressivement ajoutée jusqu'à saturation de l'enceinte. Nous gardons encore les éprouvettes sous pression pendant 18 heures pour assurer la saturation sous vide, les éprouvettes sont nettoyées pour éviter l'excès d'eau et soumises à l'essai. L'éprouvette placée entre les deux cellules du dispositif expérimental dont la première contient la solution de chlorure de sodium et la seconde l'hydroxyde de sodium. L'essai consiste à appliquer une différence de potentiel (60V) pendant 6 heures afin de pénétrer les ions par migration ensuite mesurer la charge passante (en Coulombs) à travers l'échantillon.

3.6 Récapitulatif des essais réalisés

Le programme expérimental suivi dans notre travail est divisé en quatre parties. La première partie a été consacrée essentiellement à la formulation d'un BAP de référence. Tout d'abord, des essais sur mortier ont été menés dans l'objectif d'optimiser le dosage en superplastifiant ensuite nous avons réalisé des essais rhéologiques sur le BAP qui répondent aux spécifications requises, et pour bien comprendre le comportement rhéologique du BAP

à l'état frais, des essais au rhéomètre ont été réalisés également. La deuxième partie a été consacrée à l'analyse des effets des granulats de caoutchouc utilisés comme substitution du sable en volume sur les propriétés du BAP à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Les pourcentages de caoutchouc utilisés sont de 0, 5, 10, 15, 20 et 30%. La troisième partie est destinée à étudier l'effet de l'ajout des fibres métalliques recyclées (FMR), de pneus usagés de 0.5%, 0.8%, 1% et 1.5%, en volume totale de béton sur les propriétés du BAP. D'autre part, pour voir l'effet réel de ce type de fibres, nous avons réalisé le même programme expérimental avec les mêmes pourcentages, mais avec des fibres métalliques industrielles pour comparer entre les deux types de fibres. Enfin, la quatrième partie est faite pour améliorer l'utilisation des fibres métalliques dans la formulation du BAP par l'addition de fibres hybrides (cocktail entre fibres recyclées et l'industrielles) et d'un ajout cimentaire (le laitier) utilisé avec deux pourcentage 15 et 25% en poids de ciment, dans le but d'améliorer le comportement du BAP à l'état frais.

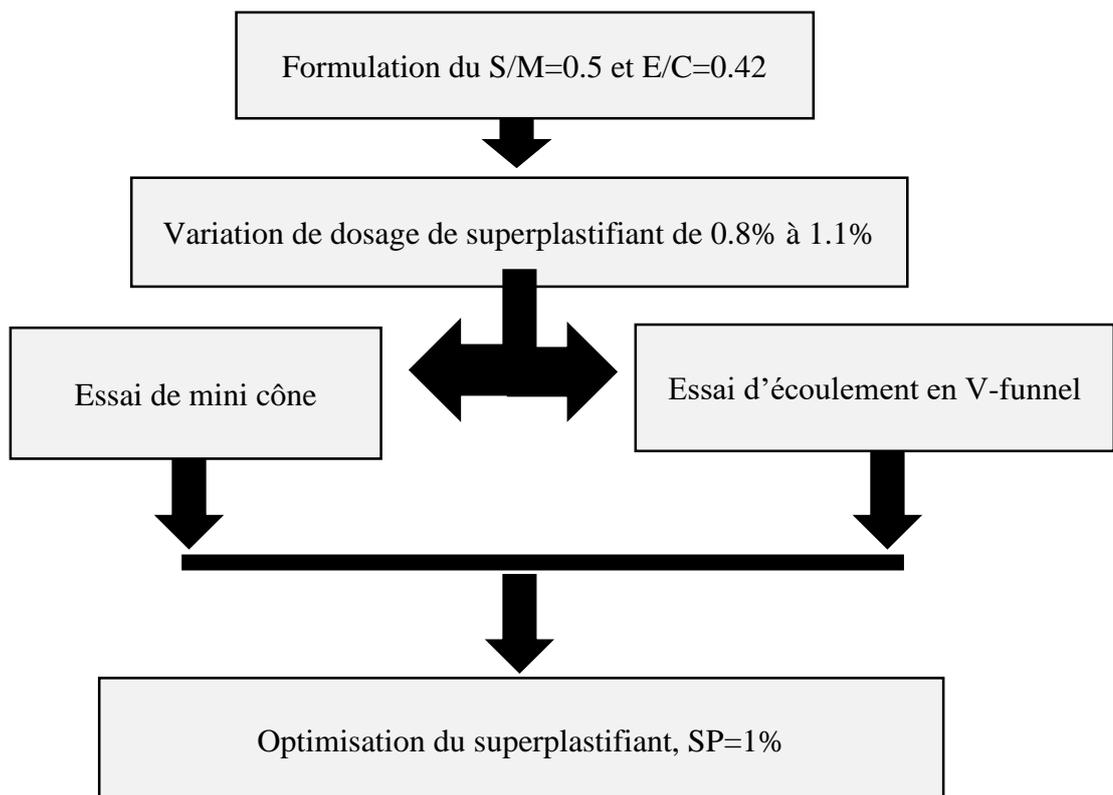


Figure 3. 21: Organigramme des différents essais d'optimisation sur mortier.

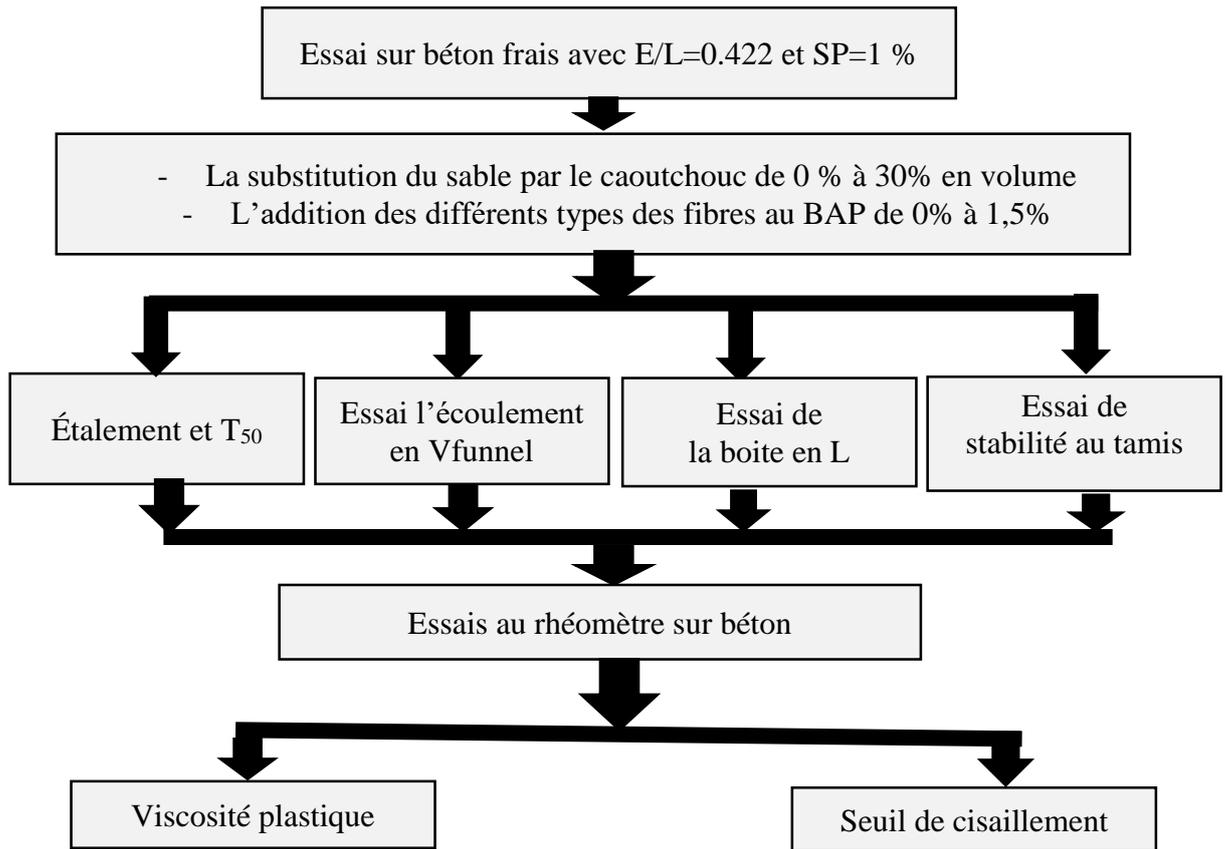


Figure 3. 22: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état frais.

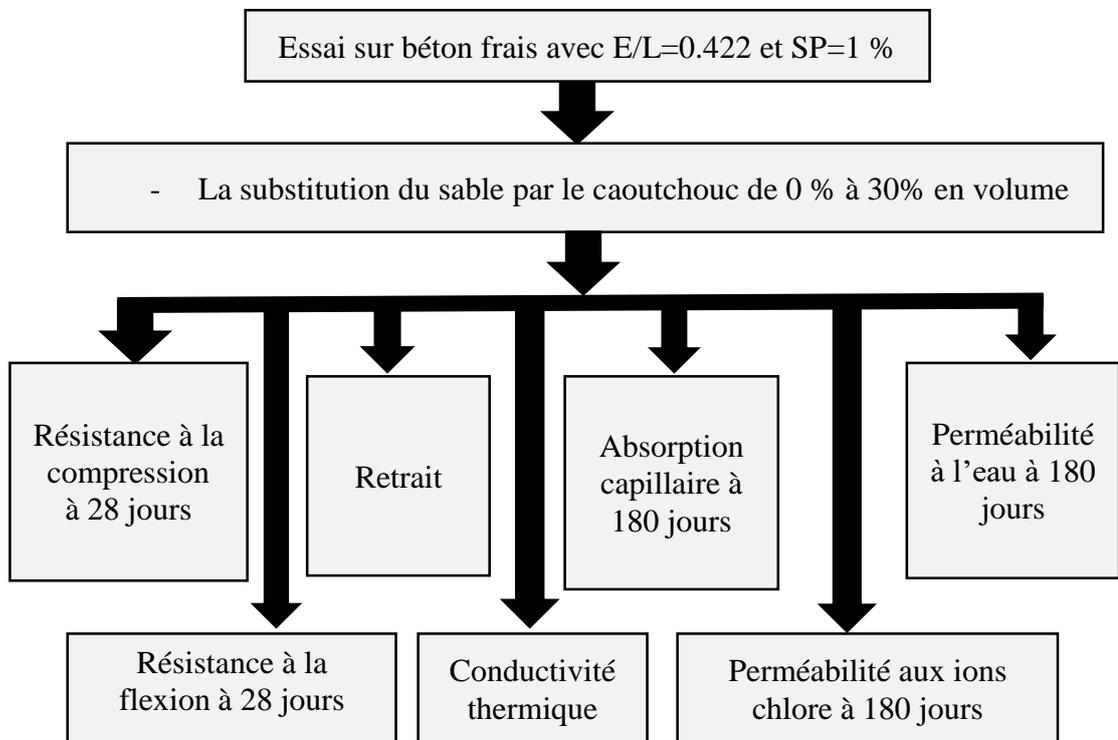


Figure 3. 23: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP caoutchouteux à l'état durci.

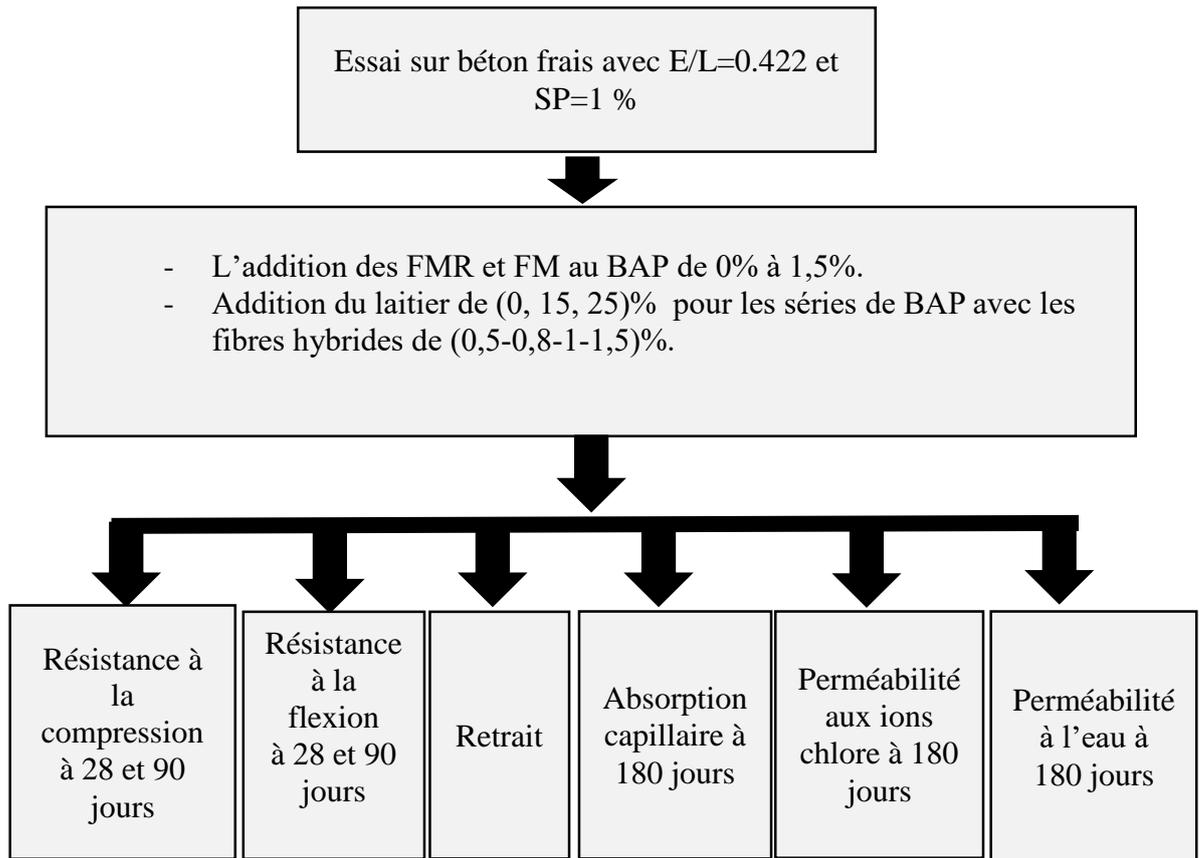


Figure 3. 24: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP fibrés à l'état durci.

**CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET
DISCUSSIONS_EFFET DE CAOUTCOUC
SUR LES PROPRIETES DU BAP**

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS_EFFET DE CAOUTCOUC SUR LES PROPRIETES DU BAP

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais rhéologiques réalisés sur le mortier dans le but d'optimiser le dosage en superplastifiant, ensuite ceux sur le béton afin d'obtenir un béton autoplaçant (BAP) de référence. En second lieu, pour déterminer les potentialités de la valorisation des déchets d'origine caoutchouteuse, nous présenterons les effets de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur les propriétés du BAP.

4.2. Optimisation de dosage du superplastifiant

Les différentes propriétés des BAP (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage etc...) rendent leur formulation relativement compliquée c'est pourquoi l'adjonction du superplastifiant joue un rôle primordial pour obtenir les propriétés souhaitées. Cependant, leur utilisation nécessite la connaissance des mécanismes d'action et des précautions d'emploi, parce qu'un excès de dosage en superplastifiant (SP) provoque un risque de ressuage et de ségrégation. En revanche un dosage insuffisant de SP provoque une diminution dans la fluidité du BAP. Dans ce contexte nous avons abordé l'optimisation du dosage en superplastifiant par le biais des essais sur mortier (essai de mini cône et essai V-Funnel). En effet, nous avons fixé le rapport E/C à 0.42 et le rapport S/M à 0.5 et nous avons varié le dosage en super-plastifiant de 0.8% à 1 % de poids du ciment. Le choix du rapport E/C et S/M a été dicté par les travaux ultérieur mené au laboratoire Géo-matériaux et Génie Civil de l'université de Blida-1.

Nous avons étudié la variation d'étalement et du temps d'écoulement d'un coulis de mortier pour chaque dosage de superplastifiant (SP). Les différentes compositions obtenues pour 1.5 litres de mortier en fonction du rapport optimale SP/L sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4. 1: Compositions des mortiers obtenues en fonction du dosage en SP.

Dosage en SP (%)	SP (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)
0.8 %	7.66	1022	1916	431.8
0.9%	9.2	1022	1916	431
1%	10.22	1022	1916	430.2
1.1%	11.18	1022	1916	329.5

4.2.1. Effet du superplastifiant sur l'étalement

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers autoplaçants sont illustrés sur la figure 4.1.

On remarque que l'étalement d'un mortier au mini cône augmente avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, le diamètre d'étalement augmente de 298 à 325 mm lorsqu'on augmente le SP de 0.8 à 1%, sachant que pour le dosage de 1.1% l'étalement a été de l'ordre de 340 mm. Donc, il est en dehors de l'intervalle des MAP défini par Domone et Jin [148] (270 à 330mm). De plus, il a été accompagné d'un ressuage et d'une légère ségrégation. Il faut noter que les dosages de SP de 0.8 à 1% donnent des résultats acceptables et vérifient les exigences normatives.

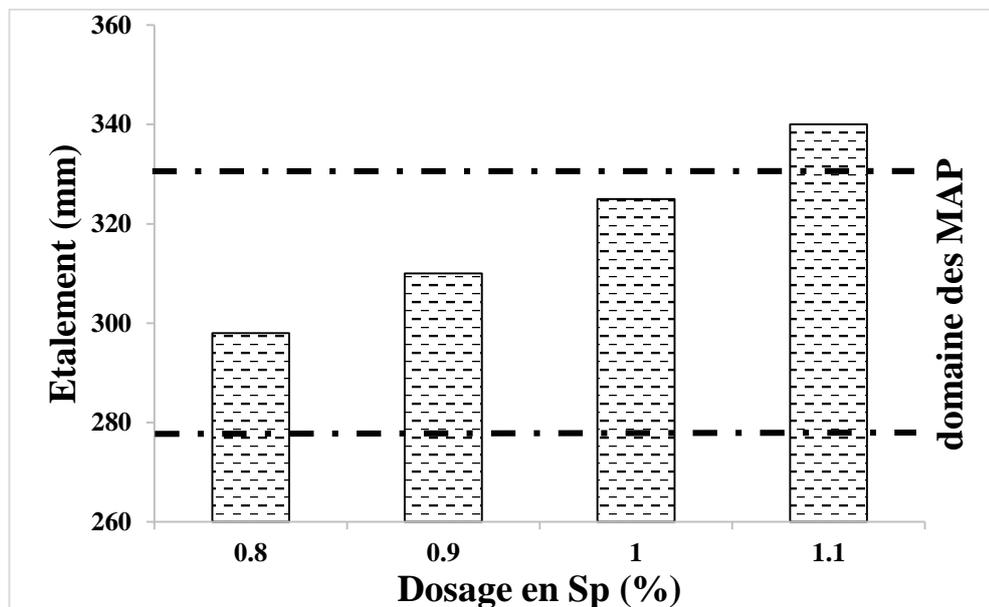


Figure 4. 1: Variation d'étalement en fonction de dosage en SP.

4.2.2. Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel)

Les résultats de l'effet de dosage en superplastifiant sur le temps d'écoulement sont représentés dans la figure 4.2.

Les résultats du temps d'écoulement en V-Funnel montrent que tous les dosages vérifient les exigences normatives ($2 < T_{vf} < 10$ s) et que le mortier devient plus fluide avec l'augmentation du dosage en SP, mais un excès de dosage en superplastifiant de l'ordre de 1.1% provoque une fluidité accrue et conséquemment conduit à un risque de ségrégation et de ressuage. Ces effets négatifs affectent probablement les propriétés mécaniques du béton à l'état durci.

Les résultats obtenus par les essais V-funnel et d'étalement montrent qu'un dosage en superplastifiant de 1% de poids de ciment, représente la limite supérieure admissible pour les MAP. Ce dosage en SP a été fixé pour les travaux expérimentaux sur le BAP.

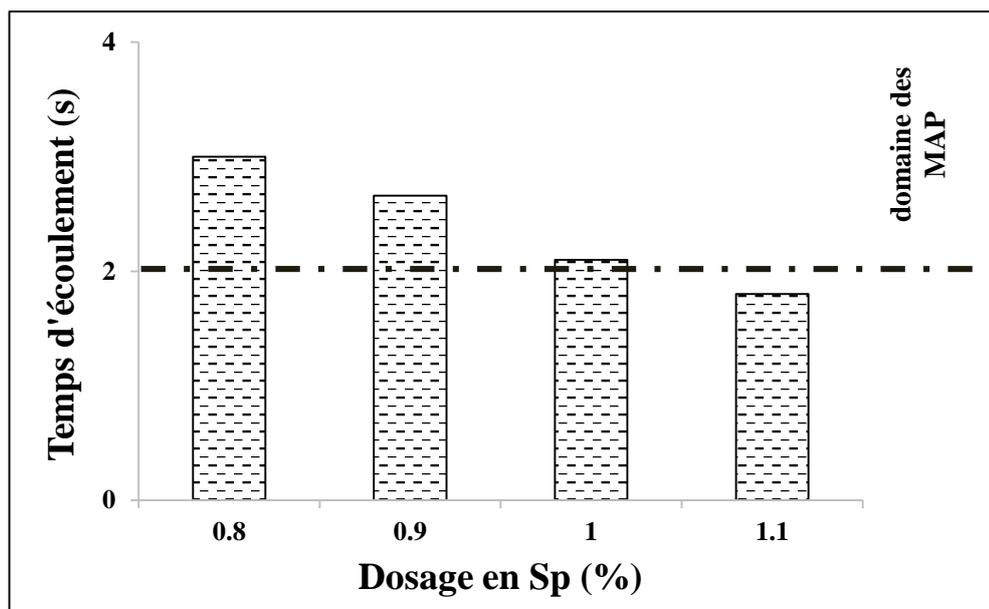


Figure 4. 2: Variation du temps d'écoulement en fonction de dosage en SP.

4.3. Effet du caoutchouc sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Dans cette seconde partie, nous allons présenter les effets des granulats de caoutchouc sur les performances du BAP. Pour cela, en premier lieu, après l'optimisation du dosage en superplastifiant sur le mortier, nous allons commencer par la formulation du béton autoplaçant de référence. Tout d'abord, nous avons fixé le dosage en superplastifiant à 1% du poids de ciment, le rapport S/M à 0.5 et E/L=0.42. En second lieu, pour étudier le potentiel de l'incorporation du caoutchouc dans la composition du BAP, le pourcentage de caoutchouc

étant le seul paramètre variable dans tous les mélanges, nous avons partiellement substitué en volume le sable par des granulats de caoutchouc dont la dimension maximale était de 2 mm. Cinq compositions ont été élaborées dans cette partie en changeant le taux de substituant caoutchouc de 0, 5, 10, 15, 20 et 30%. Le tableau 4.2 récapitule les cinq compositions des BAP caoutchoutés étudiées avec comme béton de référence BAP0 qui contient 0% de caoutchouc.

Tableau 4. 2: Composition des BAP caoutchoutés testés (kg/m³).

	Composition kg/m ³						
	Ciment	Gravier		Sable	Caoutchouc	SP	Eau
		3/8	8/15				
BAP0				819.7	0		
BAP5				778.7	12.6		
BAP10				737.7	25.2		
BAP15	442.4	465.26	347.69	696.7	37.8	4.42	200.7
BAP20				655.7	50.4		
BAP30				614.7	75.7		

Pour évaluer l'état frais des mélanges, nous avons effectué non seulement l'essai de la masse volumique, celui de la teneur en air, mais aussi l'essai d'étalement (diamètre et T50), l'essai de l'entonnoir en V (temps d'écoulement), l'essai de la boîte en L et celui de la résistance à la ségrégation par tamisage sur la base des guides Européens du BAP [75,119]. Des essais au rhéomètre ont été également mis en pratique.

4.3.1. La densité et la teneur en air

Après le malaxage, la densité et la teneur ont été mesurées pour chacun des dosages en caoutchouc. Il convient de noter qu'une réduction continue de la densité du mélange est observée. La densité varie de 2.41 à 1.98 quand le mélange est préparé à base de 0 à 30% de caoutchouc, comme le montre la figure 4.3. La chute de la densité peut être expliquée par le fait que les particules de caoutchouc présentent une faible densité par rapport aux granulats naturels. Cet argument a été utilisé par plusieurs chercheurs pour expliquer la chute de la densité du béton caoutchouteux [44,59,65,156–158]. On peut remarquer également, sur la même figure 4.3, un accroissement du pourcentage de la teneur en air avec l'augmentation du dosage en caoutchouc dans le mélange. La teneur en air occlus varie de 2.3 à 4.3 lorsque

le dosage en caoutchouc est varié de 0 à 30%, donnant ainsi une augmentation de 89.9%. D'autres chercheurs Benazzouk et al [36], Turatsinze et Garros [37], ont lié la chute de la densité du béton caoutchouteux à la teneur en air occlus. Ils ont rapporté que l'air piégé dans la surface rugueuse des particules de caoutchouc allège le béton.

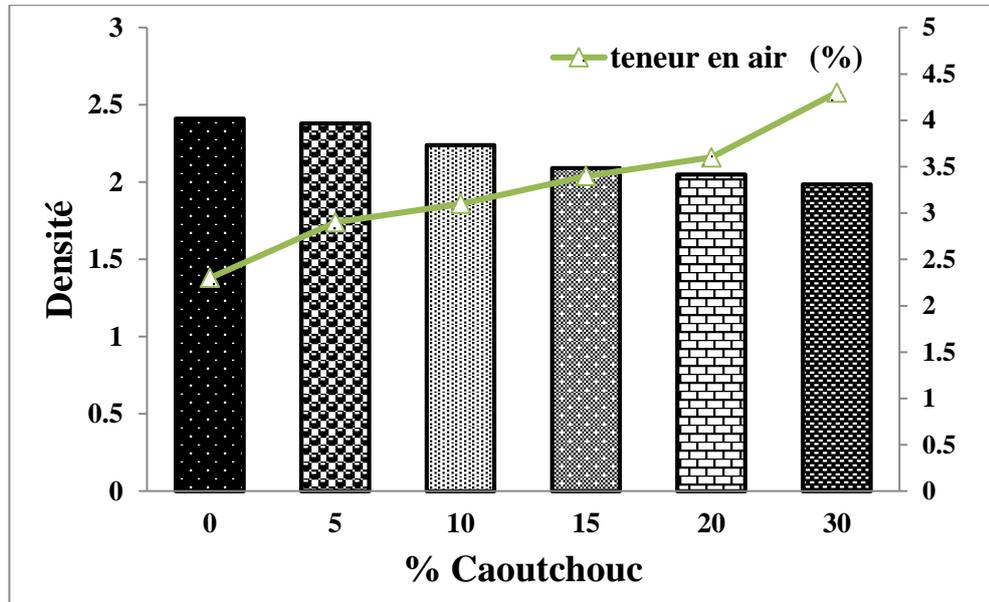


Figure 4. 3: Effet de la teneur en caoutchouc sur la densité et la teneur en air du BAP.

4.3.2. Étalement et le rapport H2/H1

En vue d'étudier l'effet de l'incorporation du caoutchouc dans le béton autoplaçant sur sa fluidité et sa capacité de remplissage en milieux sans obstacles, l'essai d'étalement a été réalisé (Figure 4.5).

La figure 4.4 montre la variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en caoutchouc. Il est clair que la fluidité du béton autoplaçant a été affectée par l'ajout du caoutchouc. Le diamètre d'écoulement change de 760 mm pour le mélange de référence (sans caoutchouc) à 520 mm pour le mélange qui contient 30 % du caoutchouc.

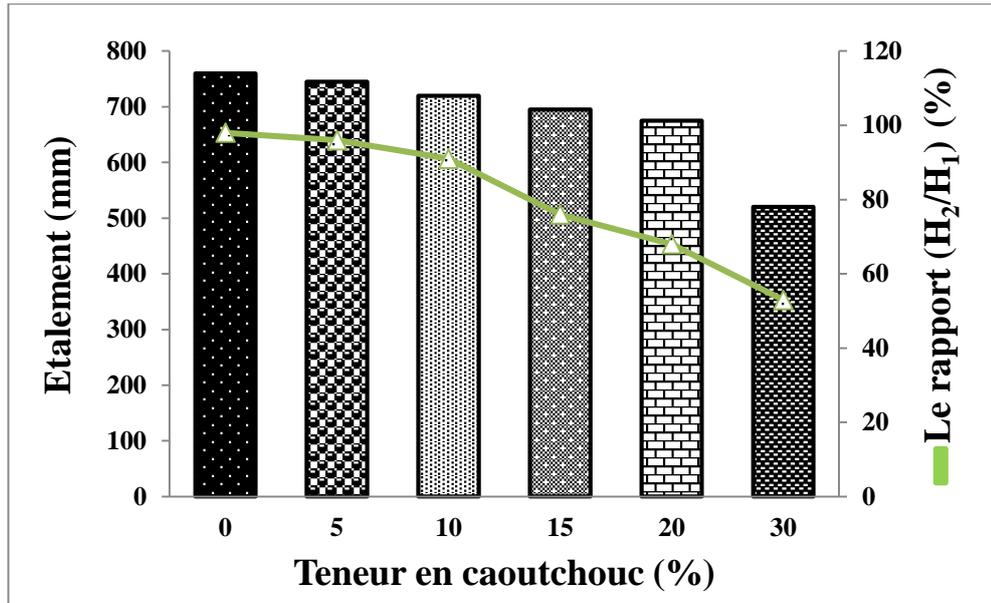


Figure 4. 4: L'effet de la teneur en caoutchouc sur l'étalement et le rapport H_2/H_1 du BAP.

Par ailleurs, selon les recommandations d'EFNARC [119], le diamètre d'étalement d'un béton autoplaçant doit être supérieur à 550 mm. De ce fait, le mélange qui contient 30% de caoutchouc n'est pas considéré comme béton autoplaçant, puisque le diamètre d'étalement est en deçà de ce qui est nécessaire. D'un autre côté, les résultats obtenus sont confirmés par des constatations visuelles lors de la préparation du mélange avec 30% de caoutchouc (figure4.5). En effet, le mélange était moins maniable. Donc, le taux de substitution du caoutchouc doit être limité à 20% pour assurer la maniabilité requise.



0% de caoutchouc

30% de caoutchouc

Figure 4. 5: L'effet de caoutchouc sur le diamètre d'étalement.

La figure 4.4 présente également la variation du rapport H_2/H_1 qui décrit la capacité de passage du BAP dans les endroits denses en ferraille, en fonction de la teneur en caoutchouc. Il est clair que le rapport H_2/H_1 est inversement proportionnel au dosage en caoutchouc. Les résultats obtenus concordent avec ceux de la littérature [62,159]. Selon les recommandations d'EFNARC [119], un béton autoplaçant doit avoir un rapport H_2/H_1 supérieur à 80%, cela conduit à limiter l'utilisation du caoutchouc à 15% pour rester toujours dans l'intervalle des bétons autoplaçants.

D'autre part, Ganesan et al. [32] ont décrit que la réduction de la fluidité est causée par l'incorporation du caoutchouc et peut être corrigée par l'augmentation du dosage de SP dans le mélange. Ils ont produit un béton autoplaçant avec un rapport H_2/H_1 supérieur à 80%, pour un taux de caoutchouc de 15 et 20 %. Cependant, Rahman et al. [33] ont rapporté l'inverse. L'augmentation du dosage de SP a un effet négatif sur la fluidité et provoque plus de blocage.

4.3.3. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V et le temps T_{50}

La variation du temps d'écoulement à l'entonnoir en V et du temps T_{50} en fonction du dosage en caoutchouc dans les mélanges sont présentés dans la figure 4.6. Pour un taux de substitution de 30%, le temps d'écoulement à l'entonnoir varie de 2.2 à 8.3 s et le temps T_{50} change de 0.22 à 0.73 s. Ce comportement corrobore les résultats précédents obtenus sur les différents tests caractérisant le béton autoplaçant à l'état frais. En effet, la fluidité du béton se réduit sous l'effet de la présence du caoutchouc alors que la viscosité augmente. L'abaissement de la fluidité et l'augmentation de la viscosité du béton peuvent être expliquées par le frottement mobilisé par les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. Ces résultats sont en accord avec la littérature [32,33,62].

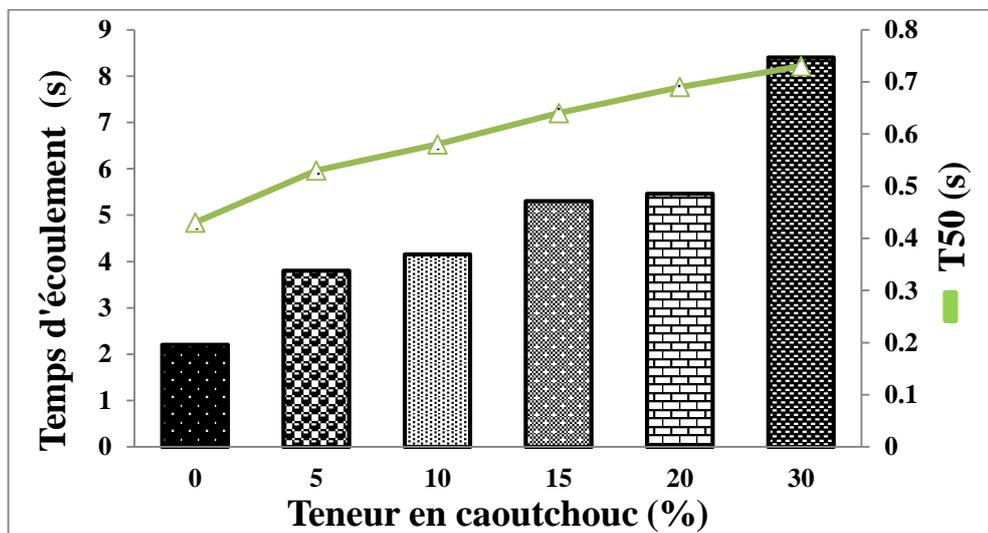


Figure 4. 6: Effet de la teneur en caoutchouc sur le temps d'écoulement et T_{50} .

Par ailleurs, Guneyisi [160] a décrit que l'ouvrabilité du béton autoplaçant contenant du caoutchouc peut être améliorée par l'utilisation des cendres volantes. Cependant, Rahman et al. [33] ont recommandé de ne pas augmenter le dosage en SP car il affecte négativement la fluidité du béton.

4.3.4. Résistance à la ségrégation par tamisage

L'essai de stabilité au tamis est couramment utilisé en laboratoire pour quantifier le potentiel du mélange à résister vis à vis de la ségrégation. La figure 4.7 montre la relation entre le taux de ségrégation et la teneur en caoutchouc. Le rapport de laitance varie de 5.87 à 3.4%, lorsque le mélange est préparé à base de 0 à 30 % de caoutchouc. Les particules donnant plus de cohésion à la pâte de ciment, en comparaison aux granulats naturels.

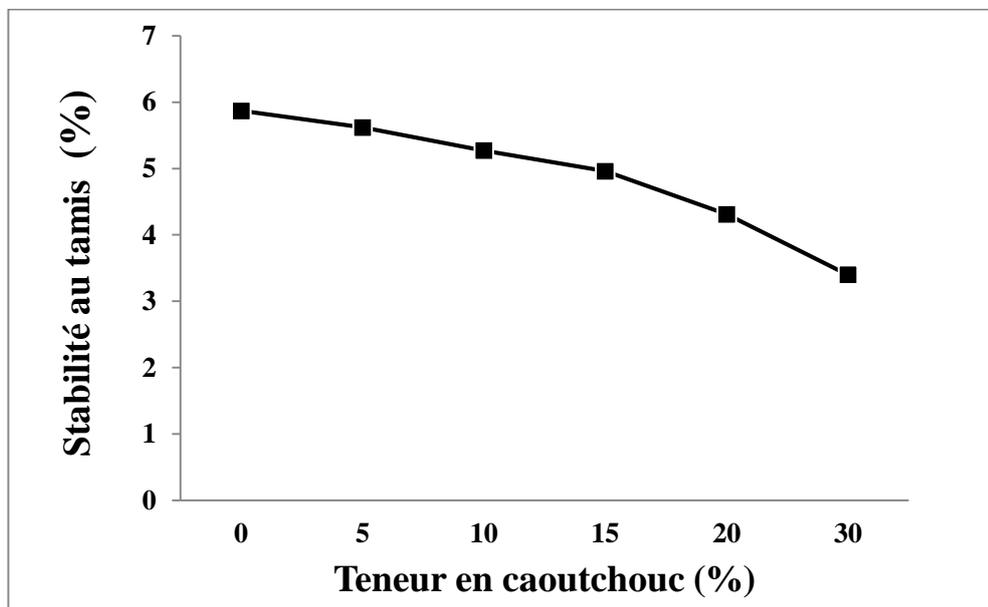


Figure 4.7: L'effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la ségrégation du BAP.

Turatsinze et Garros [37] ont rapporté des résultats contradictoires. L'utilisation de gros granulats de caoutchouc dans le BAP provoque le risque de ségrégation même si le dosage en SP est augmenté. En outre, Bideci et al. [161] ont indiqué que lorsque la longueur des particules de caoutchouc (sous forme de fibres) augmente, la résistance à la ségrégation diminue. Mais l'augmentation du pourcentage de ces particules augmente la résistance à la ségrégation.

4.3.5. Effet du caoutchouc sur la rhéologie des BAP

Pour mieux comprendre l'effet du caoutchouc sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais, les propriétés rhéologiques ont été déterminées pour chacun des dosages en caoutchouc. Il s'agit de déterminer, à l'aide d'un rhéomètre de type Heidolph- RZR 2102 Control Z, la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique.

4.3.5.1. Effet du caoutchouc sur la viscosité plastique

La figure 4.8 illustre les résultats de la variation de la viscosité plastique en fonction du taux de caoutchouc ajouté. Une augmentation régulière de la viscosité est observée avec l'augmentation de la concentration en caoutchouc. La viscosité plastique varie de 8.61 Pa.s à 15.43 Pa.s lorsque le taux de substitution varie de 0% à 30%.

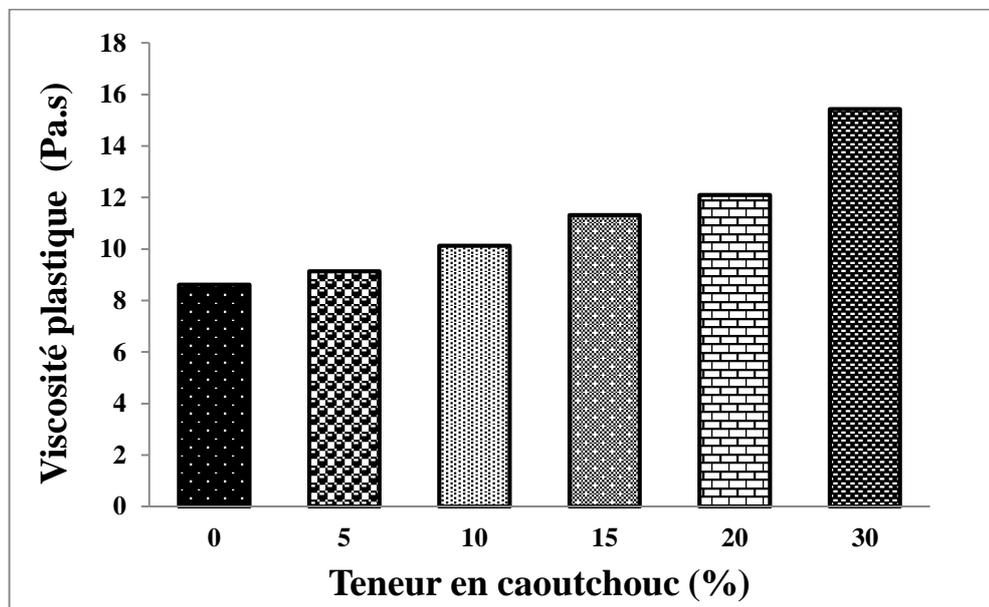


Figure 4. 8: Effet de la teneur en caoutchouc sur la viscosité plastique du BAP.

Les figures 4.9 et 4.10 illustrent des corrélations entre le diamètre d'étalement et la viscosité plastique ainsi que le temps d'écoulement et la viscosité plastique respectivement. On remarque que la viscosité plastique décroît de 15.43 (Pa) à 8.61 (Pa) avec l'accroissement de l'étalement de 520 mm à 760 mm avec un coefficient $R^2 = 0.965$. Cependant, la viscosité plastique augmente proportionnellement avec l'augmentation du temps d'écoulement avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.962$. Ces résultats confirment les essais classiques pour la caractérisation des BAP recommandés par l'EFNARC [119].

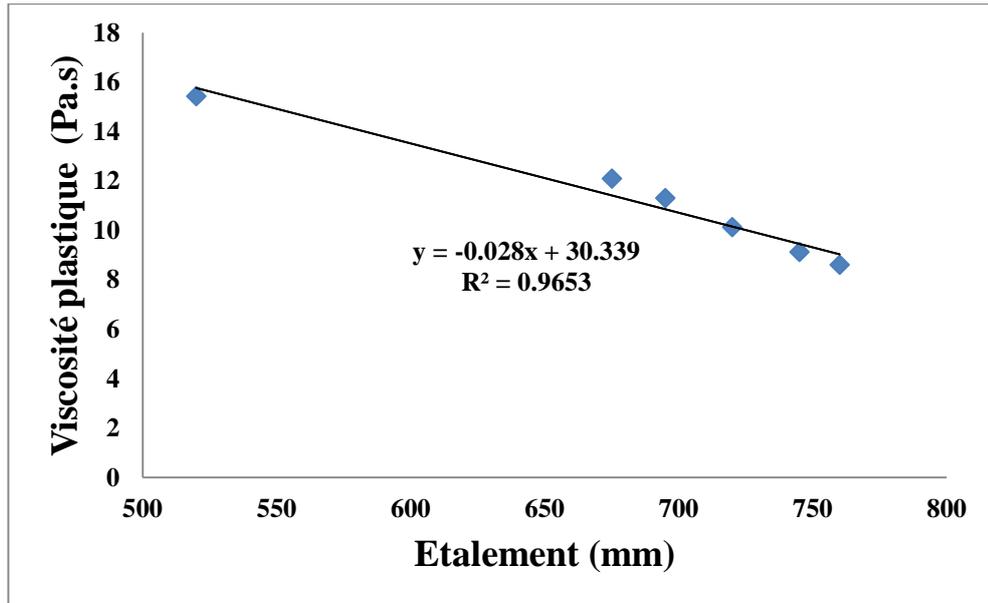


Figure 4. 9: Corrélation entre la viscosité plastique et le diamètre d'étalement.

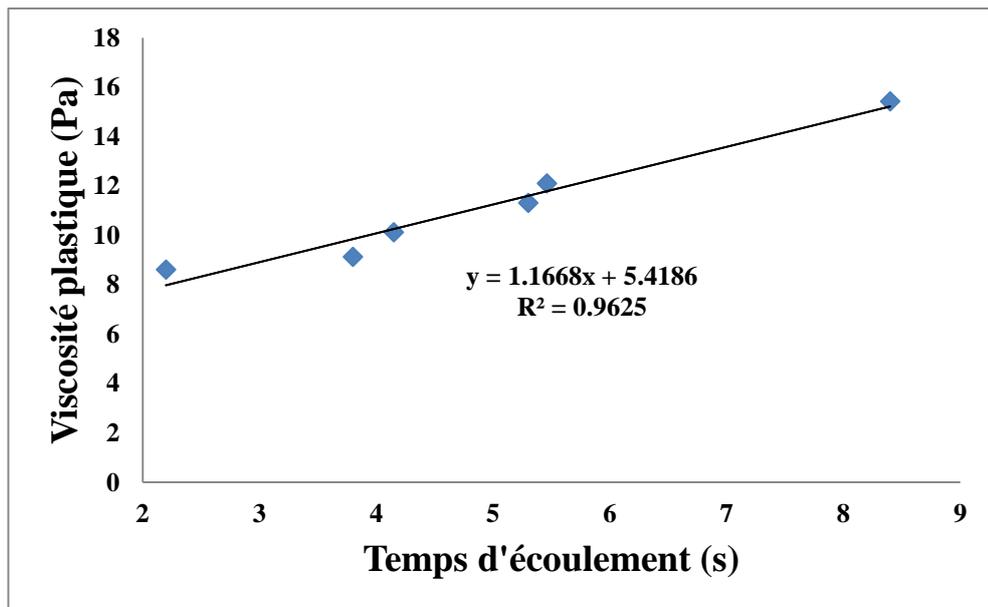


Figure 4. 10: Corrélation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement T_{vf} .

4.3.5.2. Effet du caoutchouc sur le seuil de cisaillement

Les résultats de la figure 4.11 montrent la variation du seuil de cisaillement en fonction du dosage en caoutchouc. Le taux de cisaillement est réduit de 15.78 à 10 Pa, pour un taux de substitution variant de 0% à 30%. La présence des particules de caoutchouc augmente le frottement entre les différents composants ce qui affecte la fluidité du mélange. Les mêmes constatations ont été trouvées par Guneyisi [160]. Par ailleurs, les résultats obtenus par le rhéomètre corroborent ceux trouvés avec les essais classiques ; essai V-Funnel et T50.

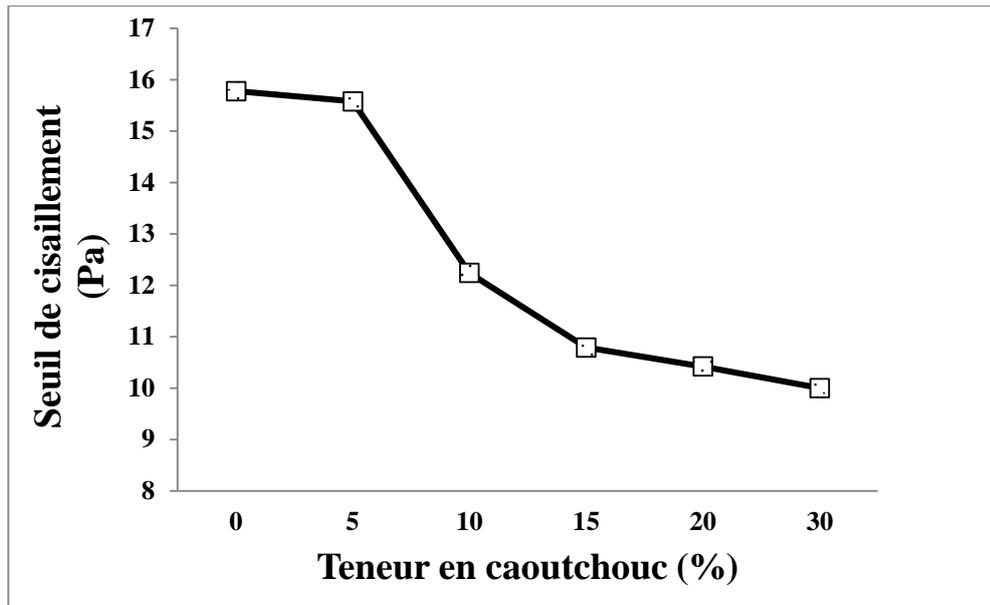


Figure 4. 11: Effet de la teneur en caoutchouc sur la contrainte de cisaillement du BAP.

4.4. Effet du caoutchouc sur le BAP à l'état durci

4.4.1. Les propriétés mécaniques

La détermination des propriétés mécaniques est une étape essentielle dans un processus de caractérisation des matériaux cimentaires. De ce fait, la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours, a été respectivement déterminée pour chacune des teneurs en caoutchouc sur des éprouvettes cubique $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ et prismatique $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 4.12 et 4.13. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais. D'après les histogrammes, une réduction systématique de la résistance avec l'augmentation du caoutchouc est observée. La résistance en compression chute de 47.72 à 23.56 MPa pour un taux de substitution en caoutchouc qui varie de 0% à 30%, soit une chute de l'ordre de 51%. Par ailleurs, pour le même taux de substitution, la résistance en flexion chute de 58%. Ces résultats confirment ceux rapportés par la littérature sur des matériaux cimentaires à base de granulats de caoutchouc [162].

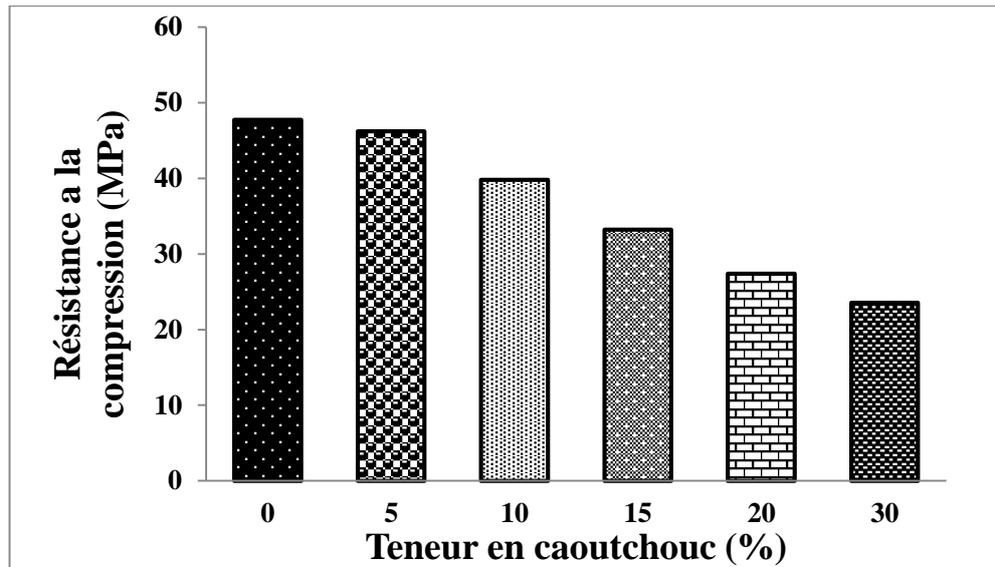


Figure 4. 12: Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la compression du BAP.

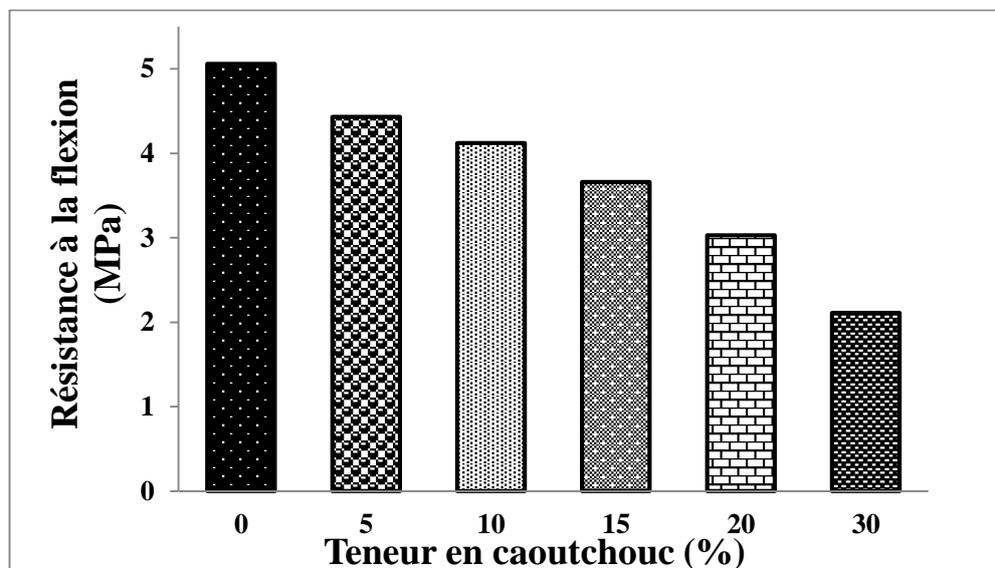


Figure 4. 13: Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la flexion du BAP.

La chute des propriétés mécaniques du béton à base de caoutchouc est probablement due à l'aspect souple du caoutchouc par rapport au granulats naturels. D'ailleurs Li et al. [163] ont attribué la chute de la résistance à la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels.

La deuxième raison est inhérente aux défauts d'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. Cet argument a été évoqué dans plusieurs travaux qui traitaient le comportement des bétons contenant des granulats en caoutchouc [31,164]. En

outre, cet argument a été aussi avancé par Thomas et al. [165] qui ont montré que la zone de transition entre la matrice et le granulats en caoutchouc est plus faible. De plus, Meddah [9] a rapporté que la mauvaise adhérence conduit à la création de zones de faible résistance. La rupture commence par la dislocation des particules de caoutchouc à partir de la matrice cimentaire, ce qui conduit à des concentrations de contraintes dans les zones voisines. D'un autre côté, Lutz et al. [166] attribuent à cette zone un module d'élasticité beaucoup plus faible, 40% inférieur à celui de la matrice cimentaire. Par conséquent, ces défauts d'adhérence constituent des points faibles qui peuvent initier des fissures sous sollicitation mécanique.

Enfin, la dernière raison est liée à la porosité du béton, incorporant des granulats en caoutchouc, qui est réputée plus élevée que celle du béton de référence [30,167]. Eldin et Senouci [39] ont attribué la chute de résistance à une réduction de la matière de charge solide et à des concentrations de contraintes dans la pâte de ciment autour des particules de caoutchouc.

4.4.2. La conductivité thermique

La variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en caoutchouc est présentée dans la figure 4.14. Il est clair que l'ajout du caoutchouc au béton autoplaçant réduit significativement sa conductivité thermique. Elle varie de 1.96 à 1.19 W/m.°C, lorsque le caoutchouc est utilisé à un taux de 0 à 30% de remplacement, soit une chute de l'ordre de 39.28%. Les résultats confirment les travaux d'autres chercheurs [35,58–60,168]. Ce changement peut s'expliquer par l'influence concomitante de plusieurs facteurs :

En premier lieu, selon Neville [56], il est connu que même avec les granulats naturels seuls, les caractéristiques des constituants de la matrice cimentaire jouent un rôle sur la conductivité, c'est-à-dire que leur nature minéralogique affecte la conductivité thermique du béton. Donc, la conductivité thermique du béton est d'autant plus faible que les granulats sont faibles. En outre, cette explication a été aussi avancée par le document Technique Unifié [57] qui stipule que le caoutchouc présente une structure amorphe et que sa conductivité thermique est faible c'est-à-dire de l'ordre de 0.4 W/m.°C en comparaison à celle des granulats naturels qui présentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à 1.5 W/m.°C.

En second lieu, la porosité entre aussi en jeu, et elle est plus importante avec l'incorporation des granulats en caoutchouc dans la formulation des matrices cimentaires,

où l'air, avec sa conductivité thermique beaucoup plus faible ($0.023 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$), remplit les pores à l'intérieur du béton limitant ainsi la conductivité thermique. En outre, Benazzoug et al.[58] et Marie [59] ont rapporté que l'air entraîné par les particules de caoutchouc crée des zones à porosité fermée dans la matrice cimentaire, ce qui permet de réduire la conductivité thermique et par conséquent d'améliorer l'isolation du produit final.

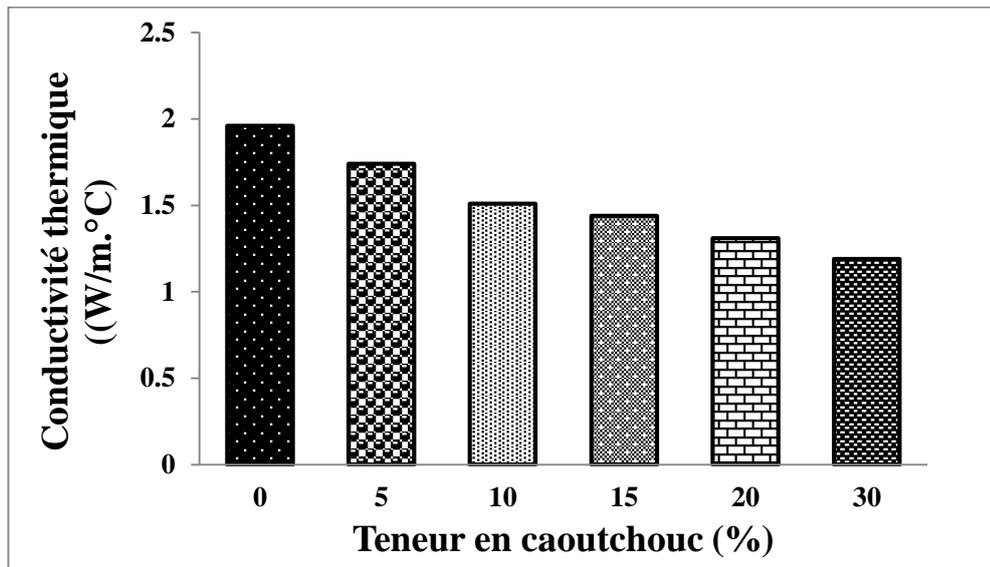


Figure 4. 14: Effet de la teneur en caoutchouc sur la conductivité thermique du BAP.

Pour étudier l'effet de la densité sur la conductivité thermique, la relation entre ces deux propriétés a été présentée dans la figure 4.15. Le graphe montre une relation linéaire avec une bonne corrélation entre la densité et la conductivité thermique ($R^2 = 0.928$).

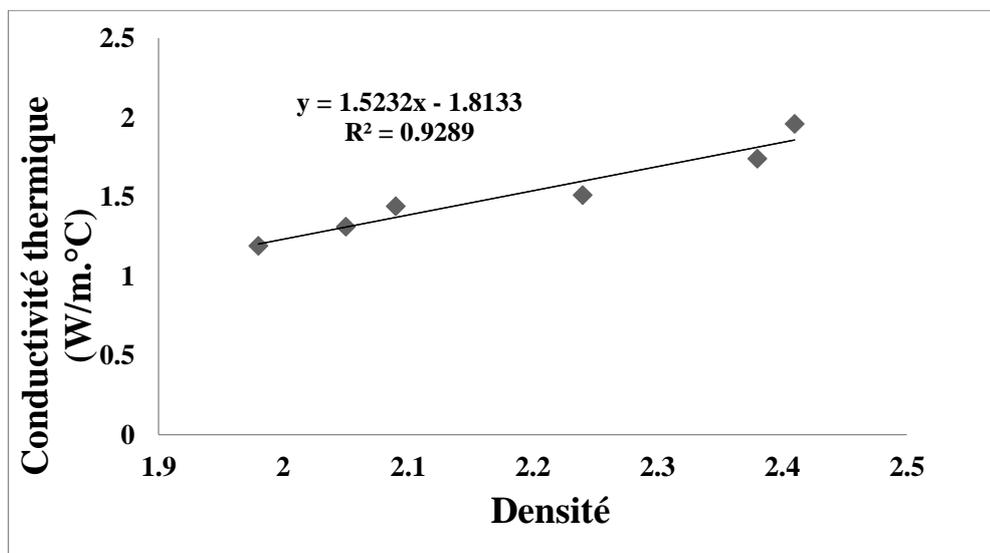


Figure 4. 15: Corrélation entre la conductivité thermique et la densité.

Dans le cas du béton caoutchouteux, la chute de la densité n'est pas seulement due à l'augmentation de la porosité, mais aussi à la faible densité du caoutchouc. Des résultats avec la même tendance générale ont été relevés par de nombreux auteurs [59,169,170], la conductivité thermique du béton diminuant avec la réduction de sa densité.

4.4.3. Retrait total

Les courbes de la figure 4.16 montrent l'influence du caoutchouc sur le retrait total du béton autoplaçant. On constate que le retrait total se développe plus rapidement en présence du caoutchouc. En comparaison au mélange de référence, la variation dimensionnelle de l'éprouvette contenant 15% de caoutchouc augmente de 29.93%. Ce comportement pourrait être expliqué par l'aspect déformable des particules de caoutchouc et par leur faible module d'élasticité par rapport à celui des granulats naturels.

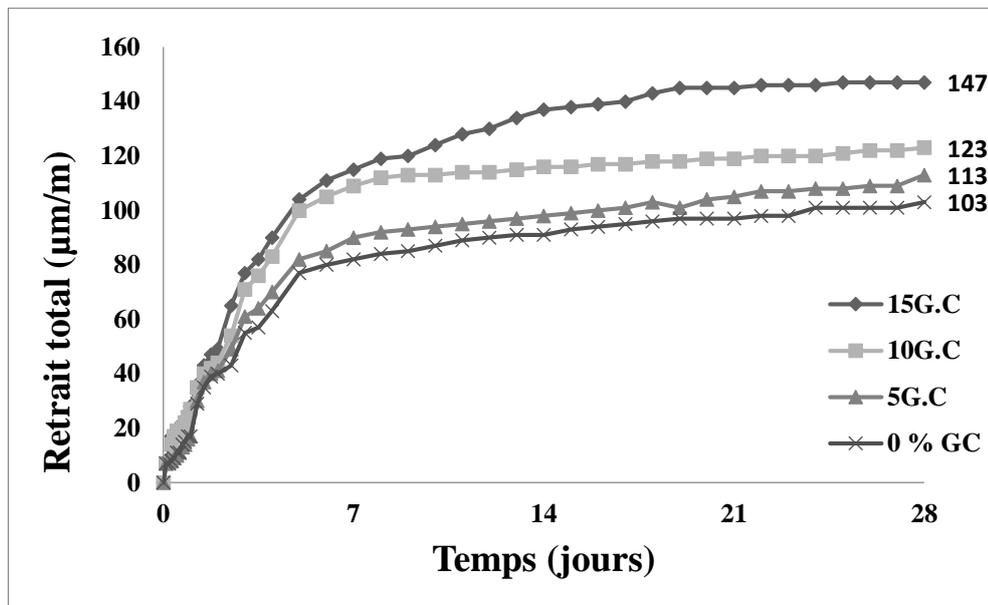


Figure 4. 16: Effet de la teneur en caoutchouc sur le retrait total du BAP.

Les résultats obtenus confirment ceux rapportés par Yung et al. [171] qui ont évalué la variation dimensionnelle des prismes en béton autoplaçant contenant des particules en caoutchouc de pneus usés en remplacement du sable naturel. Le sable naturel a été partiellement remplacé en volume par du caoutchouc à des niveaux de 0%, 5%, 10% et 20%. Le dosage du liant et le rapport E/C ont été fixés. Le caoutchouc utilisé est de trois tailles différentes 0.6, 0.3 et (0.6 + 0.3) mm. Les auteurs ont montré que le retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc et sa finesse. La variation était de 0,0183% pour

le béton de référence, alors qu'elle était respectivement de 0.0294%, 0.0298% et 0.0308% pour les échantillons contenant 5% de sable caoutchouteux avec une taille de particule de 0.6, 0.3 et (0.6 + 0.3) mm.

De plus, selon Huang et al.[172] le retrait au séchage des bétons de réparation contenant 40% d'agrégats de caoutchouc avec une taille de l'ordre de 0 à 0.15mm était environ une fois et demie plus grand par rapport au béton de référence. L'augmentation du retrait au séchage avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc des pneus peut être attribuée non seulement à la réduction de la quantité de particules rigides, qui agissent comme des contraintes internes à la déformation par retrait, mais aussi à l'augmentation de la porosité qui peut également contribuer à un retrait plus important dans les matériaux composites à base de ciment avec les particules de caoutchouc du pneu.

Par contre, Uygunoglu et Topçu [158] ont étudié l'effet du caoutchouc sur le retrait de séchage des mortiers autoplaçants. Avec deux rapports E/C 0.4 et 0.51 le sable a été remplacé par des particules de caoutchouc (1-4 mm) de 10 à 50%. Leurs résultats indiquent que l'incorporation de caoutchouc à des niveaux de 10%, 20% et 30% a réduit le retrait au séchage. Cependant, à 40% et 50% de substitution, le retrait de séchage a considérablement augmenté, en raison de l'augmentation de la porosité. En outre, la diminution du retrait a été confirmée dans l'étude de Chunlin et al. [173] qui ont étudié la possibilité de préparer un béton ordinaire par l'utilisation de particules de laitier et de caoutchouc de pneus usagés. Leurs résultats montrent que le retrait des bétons est plus faible, de 12% environ si on remplace partiellement, en volume, le sable naturel par 10% de caoutchouc granuleux (taille 5–1 mm). D'un autre côté, la taille des particules de caoutchouc a un effet sur le retrait. En effet, Skontaskule et Tiamlom [63] ont montré cet effet dans leur l'étude. Ils ont remplacé partiellement le sable naturel dans le béton par deux tailles différentes de caoutchouc avec des niveaux de 0%, 10%, 20% et 30% en volume. Les tailles de caoutchouc granuleux étaient (<5mm) et (< 2mm). Les auteurs ont indiqué qu'il y a une augmentation du retrait de séchage avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. A 120 jours et pour le même pourcentage de substitution c'est-à-dire 30%, les résultats montrent également que les échantillons contenant la petite taille de caoutchouc (< 2mm) présentent un retrait de séchage de l'ordre de 0.13% plus élevé par rapport à ceux contenant la grande taille (<5mm) qui montrent une augmentation de 0.080%. Les auteurs ont expliqué cette augmentation non seulement par la résistance à la compression et au module d'élasticité faible du béton caoutchouteux, mais aussi par la forme des particules feuilletées qui permet d'agir comme un ressort. Dans ce cas,

un rétrécissement plus important pourrait provenir lors de la combinaison des deux effets suivants: le premier c'est la contrainte interne inférieure (due au manque de sable) et le second c'est l'augmentation du matériau plus flexible.

4.4.4. Absorption capillaire

La figure 4.17 présente l'effet des granulats en caoutchouc sur le coefficient d'absorption capillaire. Les résultats montrent que la substitution du sable par le caoutchouc réduit significativement le taux d'absorption capillaire. En effet, la quantité d'eau absorbée est inversement proportionnelle au dosage en caoutchouc. Le coefficient le plus faible est obtenu avec les mélanges à 30% de caoutchouc, en effet, on remarque une réduction de l'ordre de 50% par rapport au béton témoin. La pâte de ciment étant constituée d'éléments absorbant l'eau, le caoutchouc ayant un coefficient d'absorption d'eau très faible, si on le compare avec le sable, ce comportement peut donc être expliqué par le fait que les particules de caoutchouc présentent une faible absorption par rapport aux granulats naturels. Benazzouk et al [36], Meddah et al. [174] ont rapporté que la présence des particules en caoutchouc réduit la surface effective traversée par l'eau.

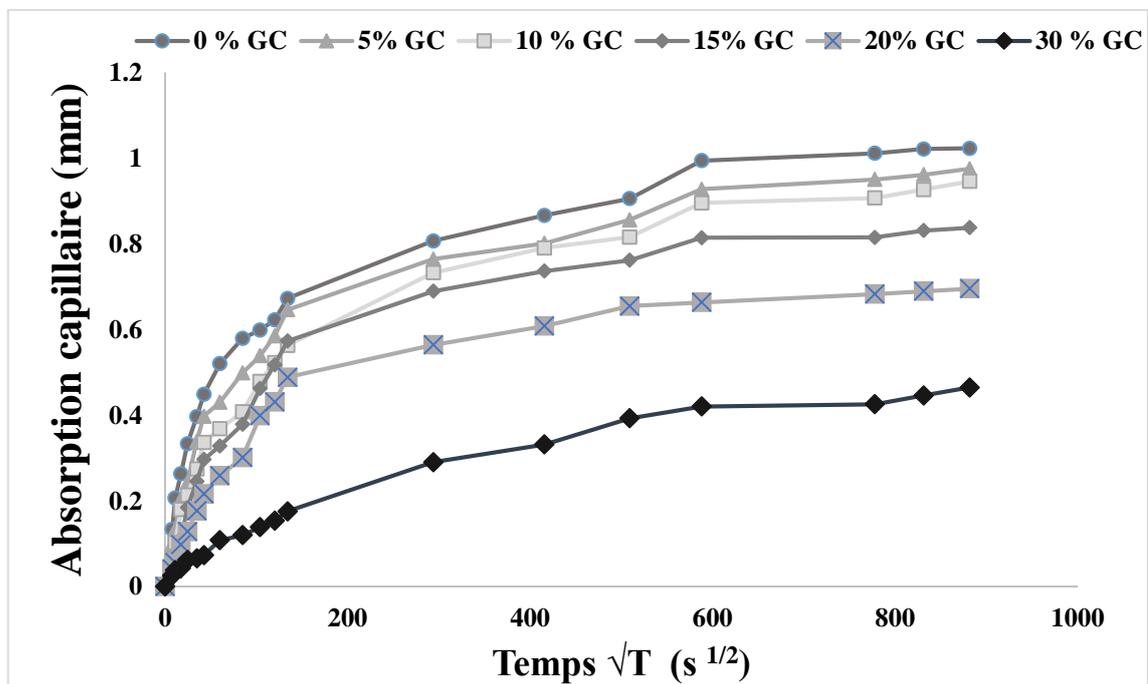


Figure 4. 17: Effet de la teneur en caoutchouc sur l'absorption capillaire du BAP.

Ces résultats ont été confirmés par l'étude de Benazzouk et al.[36] qui ont examiné le potentiel d'utiliser les déchets de caoutchouc dans une matrice cimentaire. Les auteurs ont

substitué en volume le ciment par des particules de caoutchouc avec une taille inférieure à 1 mm. Les résultats indiquent que le composite est caractérisé par une diminution de l'absorption d'eau par capillarité avec l'augmentation du taux de caoutchouc. D'après les auteurs, cela peut être dû en premier lieu à la capacité du caoutchouc à repousser l'eau (nature non absorbante) et en second lieu à l'augmentation du dosage en air, qui se manifeste par des pores vides fermés, qui ne sont pas accessibles à l'eau. Ce phénomène combiné permet de réduire le volume accessible à l'eau ce qui implique un faible coefficient d'absorption capillaire. En outre, dans leur recherche, Oikonomou et Mavridou [45] ont constaté que l'ajout des particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire diminue l'absorption de l'eau par immersion sous vide. D'un autre côté, Skontaskule et Tiamlom [63] ont analysé l'effet de la taille des particules en caoutchouc sur l'absorption capillaire du béton. Leurs résultats indiquent une réduction de l'absorption dans les échantillons de béton contenant la petite taille de caoutchouc inférieure à 2 mm. La réduction de l'absorption était de 30.77%, 15.38% et 11.54%, avec l'inclusion en volume du caoutchouc de petite taille respectivement de 10%, 20% et 30%. Pour les mêmes pourcentages, les échantillons contenant du caoutchouc de taille plus grande inférieure à 5 mm ont montré respectivement une augmentation de l'absorption d'environ 11.54%, 21.15% et 34.62%.

En revanche, dans d'autres recherches, Hesami et al. [62] et Bignozzi et Sandrolini [31] ont montré le contraire. L'absorption capillaire augmente avec l'augmentation du caoutchouc. Uygunoglu et Topçu [158] ont montré que la porosité apparente et l'absorption d'eau sont plus élevés dans les mortiers autoplaçants contenant du caoutchouc de pneus usés. Le sable naturel a été partiellement remplacé en poids par du caoutchouc (taille 4–1 mm) à des niveaux allant de 10% à 50%. Divers rapports E/C ont été utilisés. Avec un rapport E/C égale à 0.4, l'incorporation de 50% de caoutchouc a augmenté le pourcentage d'absorption d'eau de 71.4% par rapport au mortier témoin. En outre, Gesoglu et Guneyisi [28] ont abouti à la même constatation sur le béton autoplaçant. Leurs résultats montrent que la substitution du sable par le caoutchouc granulaire (taille <4 mm) provoque une augmentation dans le pourcentage d'absorption d'eau à l'âge de 28 jours de l'ordre de 5.81, 15.32 et 35.77% respectivement, pour un taux de substitution de l'ordre de 5, 15 et 25%. Selon Hesami et al. [62] et Bignozzi et Sandrolini [31], cette augmentation est due non seulement à la porosité du béton caoutchouteux mais aussi à la quantité d'air piégé dans le béton lors du malaxage ainsi que, probablement, à la variation des tailles et la forme des grains de caoutchouc par rapport au sable.

4.4.5. La perméabilité à l'eau

La profondeur de pénétration d'eau en fonction du taux de caoutchouc est montrée dans la figure 4.18, les résultats obtenus sont la moyenne de trois échantillons.

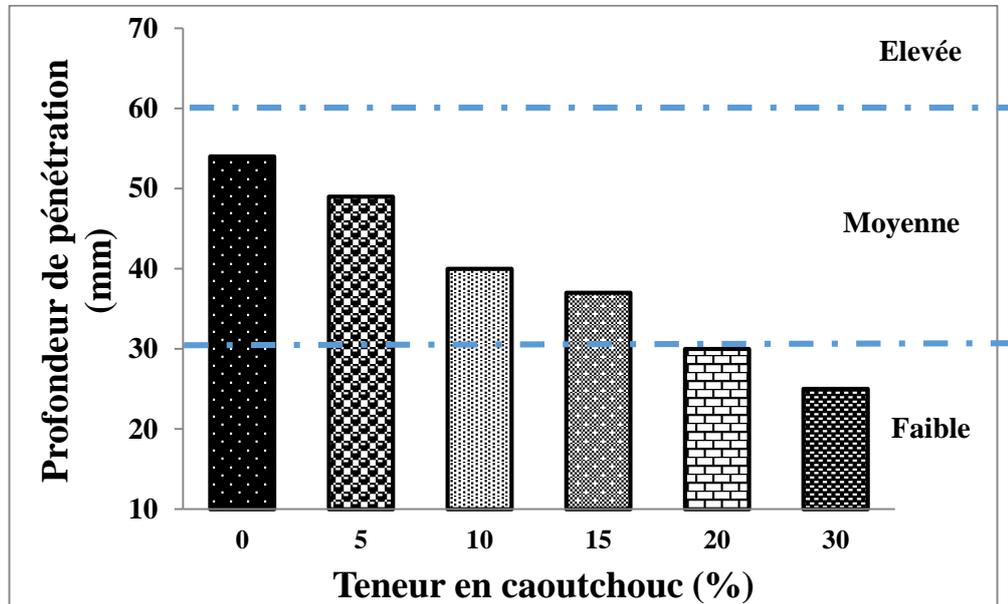


Figure 4. 18: Effet de la teneur en caoutchouc sur la profondeur de pénétration d'eau du BAP.

D'après la figure, on constate que le remplacement du sable par des particules de caoutchouc conduit à une diminution dans la profondeur de pénétration d'eau de 9.25, 25.92, 31.48, 44.44 et 53.7% pour un taux de substitution respective de 5%, 10%, 15%, 20% et 30%. Selon la norme DIN 1048 qui donne les trois classifications de perméabilité, on constate que tous les mélanges ont une perméabilité moyenne sauf le mélange avec 30% de caoutchouc qui montre une faible perméabilité. Cette réduction est due probablement aux particules de caoutchouc (non absorbant) qui constitue la pâte de ciment, ce qui se manifeste par la formation d'obstacles qui empêche l'eau de pénétrer dans la matrice cimentaire, ces obstacles, par la suite, minimisent la surface de la pâte traversée par l'eau. En outre, le durcissement dans l'eau durant 180 jours assure l'hydratation continue du ciment ce qui permet de combler les vides et de diminuer la porosité dans la pâte de ciment. De surcroît, ces résultats confirment les résultats de l'absorption capillaire. Les résultats obtenus sont en accord avec les résultats de [175,176]. Gesoglu et al. [175] et Ganesan et al. [176], ont expliqué cette diminution par le fait que la nature non absorbante du caoutchouc est considérée comme un obstacle pour le passage de l'eau à l'intérieur du béton.

En revanche, Thomas et al. [64] ont constaté que la substitution du sable naturel par un mélange de caoutchouc à trois tailles différentes, après élimination des fibres d'acier et des fibres textiles (poudre de 300 μm , 0.8-2 mm et 2-4 mm), à des niveaux de 0 à 20% conduit à une augmentation de la profondeur de pénétration d'eau à l'intérieur du béton. La valeur minimale de 4 mm a été observée pour les mélanges à 0% et 2.5% de caoutchouc granulé et la valeur maximale de 13 mm a été observée pour le mélange à 20%. De plus, Ganjian et al. [42] ont aussi signalé cette augmentation de la profondeur de pénétration d'eau quelque soit le constituant remplacé. Les résultats montrent que la profondeur de pénétration est plus grande dans le cas où les gros granulats sont substitués par le caoutchouc, par rapport au cas où le ciment est substitué par le caoutchouc. Les auteurs expliquent l'augmentation dans le deuxième cas par la réduction de la teneur en ciment dans le béton qui conduit à une réduction dans la liaison entre les particules dans ce mélange.

D'autre part, selon Su et al. [44] la taille des granulats et leur distribution ont un effet également sur la perméabilité à l'eau. Ils ont mentionné que la résistance du béton à la perméabilité à l'eau est généralement affaiblie lorsque du caoutchouc est incorporé. Cependant, le béton confectionné avec une combinaison de granulats de caoutchouc de différentes tailles a une résistance à la perméabilité à l'eau plus élevée que celle des bétons confectionnés avec, à chaque fois, une taille de caoutchouc différente. La faible perméabilité à l'eau obtenue dans les mélanges à base de caoutchouc de grande taille de l'ordre de 3 mm, est peut-être due, d'après les auteurs, à la substitution partielle du sable par de grosses particules, le béton obtenu ne peut pas donc être aussi dense que les bétons qui contiennent des particules de caoutchouc plus petites ou bien qui sont bien distribuées. Cette faible résistance est due aux micro-conduits d'eau produits dans le béton par les gros granulats. Par contre, les granulats fins peuvent combler les vides entre les gros granulats.

4.4.6. Pénétration aux ions de chlorure

La figure 4.19 montre la variation de la charge passante en ions de chlorure en fonction du taux de caoutchouc. On remarque que les granulats de caoutchouc affectent considérablement la pénétration des ions de chlorure, la perméabilité du mélange étant proportionnelle à la quantité de caoutchouc incorporée. La charge passante en ions de chlorure varie de 2229 à 4310 Coulombs, ce qui représente une perméabilité modérée à élevée selon la classification de la norme ASTM C 1202-94. Contrairement aux résultats obtenus dans l'essai de la perméabilité à l'eau, la forte pénétration de chlorure pourrait s'expliquer peut-être par la réaction entre les particules de caoutchouc et la solution de NaOH

au cours de l'essai qui crée davantage de vides et, par conséquent, augmente la pénétration de chlorure. Les mêmes constatations ont été trouvées par Gesoglu et Guneyisi [28] qui ont observé une augmentation progressive de la pénétration de chlorure avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc broyé dans le béton auto plaçant. Cependant, lorsque des cendres volantes ont été ajoutées au béton, il a été constaté une résistance significative à la pénétration des ions de chlorure à 90 jours de durcissement. Les bétons contenant 20, 40 et 60% de cendres volantes ont présenté respectivement une réduction moyenne de 67, 79 et 78% de la perméabilité aux ions de chlorure.

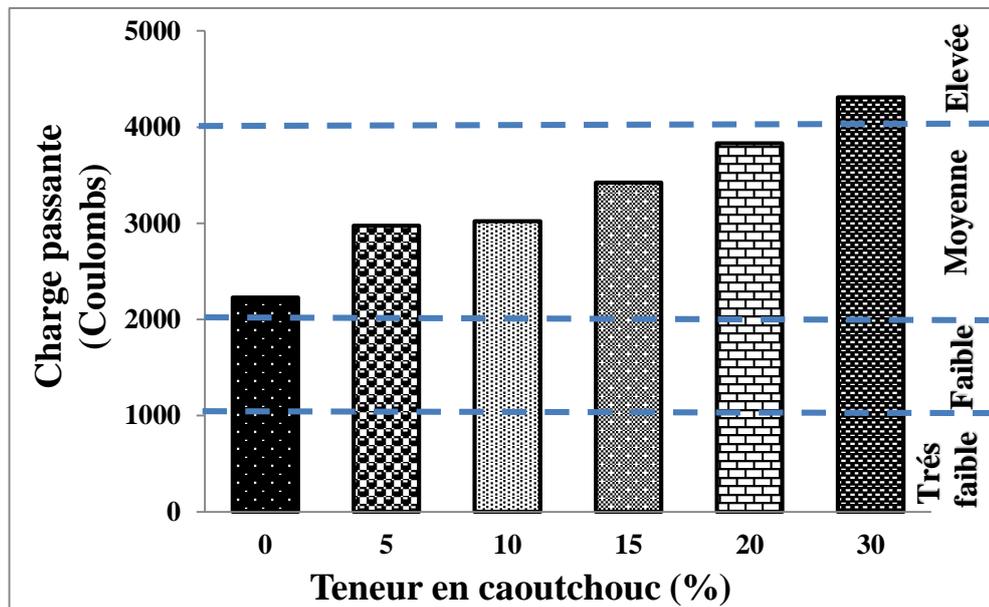


Figure 4. 19: Effet de la teneur en caoutchouc sur la pénétration des ions chlore du BAP.

En outre, Bravo et de Brito [65] ont effectué un test de migration du chlorure sur le béton caoutchouté, et ont constaté une augmentation du coefficient de diffusion du chlorure pour un remplacement du sable à 5%, 10% et 15% par du caoutchouc. Ils ont mentionné également que l'augmentation de la taille des agrégats de caoutchouc entraîne un coefficient de diffusion du chlorure plus élevé. Par ailleurs, le béton contenant des granulats de caoutchouc obtenus par la technique cryogénique offre une résistance à la pénétration des chlorures moindre que celle des bétons contenant des agrégats de pneus broyés mécaniquement.

Alors que Thomas et al. [66] ont rapporté que l'utilisation des granulats de caoutchouc de 0 à 20% dans un béton confectionné avec différents rapport E/C (0.4, 0.45 et 0.5) réduit le potentiel du transfert des ions de chlorures à 91 jours dans le béton si un faible pourcentage

de caoutchouc est utilisé (inférieur à 7.5%). Mais, si le pourcentage dépasse 7.5%, la profondeur de pénétration des ions chlorure augmente progressivement. La raison de la réduction de la profondeur de pénétration du chlorure dans les mélanges contenant de 0 à 7.5% de caoutchouc est due à l'imperméabilité des particules de caoutchouc qui n'absorbent pas l'eau et à la fois ne permettent pas le passage des ions de chlorure. Au fur à mesure que le pourcentage de caoutchouc augmente, la profondeur de pénétration du chlorure diminue. Toutefois, au-delà de 7.5%, la pénétration du chlorure augmente, et cela est dû à la présence de granulats de caoutchouc à l'intérieur du béton non enveloppés par la pâte de ciment.

Contrairement à nos résultats, Onuaguluchi et Panesar [67] signalent une réduction de la perméabilité au chlorure pour les éprouvettes en béton avec un taux de remplacement partiel en volume de l'ordre de 5%, 10% et 15% de granulats fins naturels par du caoutchouc (taille 2.3 mm). Les auteurs indiquent que les charges réduites enregistrées dans les mélanges contenant la fumée de silice est à l'origine de l'amélioration de la microstructure. Par conséquent, la charge transmise dans ces mélanges a été réduite d'environ huit fois. D'autre part, Oikonomou et Mavridou [14] ont signalé une réduction de la profondeur de pénétration des ions de chlorure à la suite du remplacement partiel, en poids, du sable naturel dans les mortiers par le caoutchouc de pneus usés (tailles 0.75 à 1.18 mm) à différents niveaux. Cette réduction était respectivement de l'ordre de 14.22, 16.76, 25.43, 30.25, 35.18 et 35.85% avec l'inclusion de caoutchouc à 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5 % et 15%.

4.5. Conclusion

La faisabilité de l'utilisation du caoutchouc en tant que granulats fins dans le BAP a été étudiée expérimentalement dans le présent chapitre. Le sable a été partiellement remplacé par des déchets de caoutchouc déchiqueté. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation du caoutchouc dans les mélanges du BAP affecte ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

- L'intégration du caoutchouc dans le BAP augmente la teneur en air du mélange en raison de son potentiel à piéger l'air à sa surface. De plus, le caoutchouc possède un poids unitaire inférieur à celui des granulats naturels. Ces deux paramètres permettent de produire un matériau plus léger, ce qui est avantageux pour les structures de bâtiments.
- Les tests d'ouvrabilité du béton montrent que l'incorporation du caoutchouc dans le béton réduit son potentiel d'écoulement. Si la substitution de sable par le caoutchouc

est limitée à 15%, les exigences des directives européennes relatives à l'ouvrabilité sont satisfaites. Cependant, la présence de caoutchouc dans le BAP crée une cohésion apparente qui contribue à améliorer sa résistance à la ségrégation.

- L'incorporation du caoutchouc dans le BAP diminue les résistances à la compression et à la flexion et augmente le retrait des mélanges de BAP. Ce comportement est dû à la faible rigidité du caoutchouc et à la réduction de la quantité de matériau solide.
- L'incorporation du caoutchouc dans le BAP améliore considérablement la conductivité thermique et réduit l'absorption capillaire et la pénétration de l'eau dans les mélanges de BAP, ce qui améliore la durabilité des structures à base de BAP caoutchouteux et pourrait être utile pour l'isolation par temps chaud.

CHAPITRE V :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS_EFFET
DES FIBRES METALLIQUES SUR LES
PERFORMANCES DU BAP

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS_EFFECT DES FIBRES METALLIQUES SUR LES PERFORMANCES DU BAP

5.1 Introduction

Nous nous intéressons dans le présent chapitre à étudier l'effet des fibres métalliques recyclées (FMR) récupérées à partir de pneus usés ainsi que celui des fibres industrielles (FM) sur le comportement du béton autoplaçant. La première partie dans ce chapitre est consacrée à étudier les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP fibré. En seconde partie, les propriétés physiques et de durabilité telles que le retrait, la perméabilité à l'eau, la perméabilité aux ions de chlorure et l'absorption capillaire ont été analysés en fonction du taux de fibres ajouté.

5.2 Effet des fibres sur les propriétés du BAP à l'état frais

Pour l'étude de cette phase, nous allons présenter l'effet des fibres métalliques recyclées sur les performances du BAP à l'état frais. Nous avons gardé la formulation du béton de référence citée dans le chapitre précédent, nous avons fixé le dosage en superplastifiant à 1% du poids de ciment et le rapport S/M à 0.5 et E/L à 0.42, la valeur variable étant le pourcentage de fibres ajouté. Les pourcentages des fibres suivants 0.5%, 0.8%, 1% et 1.5% sont ajoutés en volume total du béton.

Afin de mettre en évidence le potentiel réel de l'addition de ce type de fibres recyclées (FMR) sur les propriétés du BAP, des fibres industrielles (FM) de type Dramix ont été également employées avec les mêmes pourcentages pour comparer l'effet de chaque type de fibres sur les performances du BAP. Les pourcentages des fibres ont été ajoutés lors du malaxage à sec des ingrédients du BAP pour homogénéiser le mélange. Au total, neuf compositions ont été élaborées dans cette partie en variant le taux de fibres ajouté de 0 à 1.5%. Le tableau 5.1 récapitule les neuf compositions des BAP fibrés étudiées avec comme béton de référence le BAP0 qui contient 0% de fibres.

Les propriétés rhéologiques, l'étalement (diamètre et T_{50}), l'essai de l'entonnoir en V, l'essai de L-box et l'essai de la résistance à la ségrégation par tamisage des BAP fibrés ont été évaluées selon les recommandations des guides Européens du BAP [75,119]. Nous avons mesuré de la teneur en air. Des essais au rhéomètre ont été également réalisés.

Tableau 5. 1: Composition des BAP fibrés testés (kg/m³).

	Composition kg/m ³							
	Ciment	Gravier		Sable	FMR	FM	SP	Eau
		3/8	8/15					
BAP0					-	-		
0.5FMR					18.3	-		
0.5FM					-	37.5		
0.8 FMR	442.4	465.26	347.69	819.7	29.28	-	4.42	200.7
0.8 FM					-	60		
1 FMR					36.6	-		
1 FM					-	75		
1.5 FMR					54.9	-		
1.5 FM					-	112.5		

5.2.1 La densité et la teneur en air

Les résultats à l'état frais montrent que la densité des BAP fibrés augmente en fonction du dosage en fibres utilisé. La densité varie de 2.41 à 2.71, lorsque le dosage des fibres FM augmente de 0 à 1.5%, pour le même pourcentage en FMR, la densité aussi augmente de 2.41 à 2.6. Cette augmentation est expliquée par la forte densité des fibres ajoutées par apport à celle des granulats naturels.

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. La figure 5.1 illustre la variation du pourcentage de l'air occlus en fonction du dosage des fibres incorporées dans la formulation du BAP. On constate que le volume d'air occlus augmente de 39.13% avec l'augmentation du pourcentage de fibres FM de 0 à 1.5%. Alors que, pour la même augmentation de la teneur en fibres de FMR (0 à 1.5%), le volume d'air occlus augmente jusqu'à 73,91%.

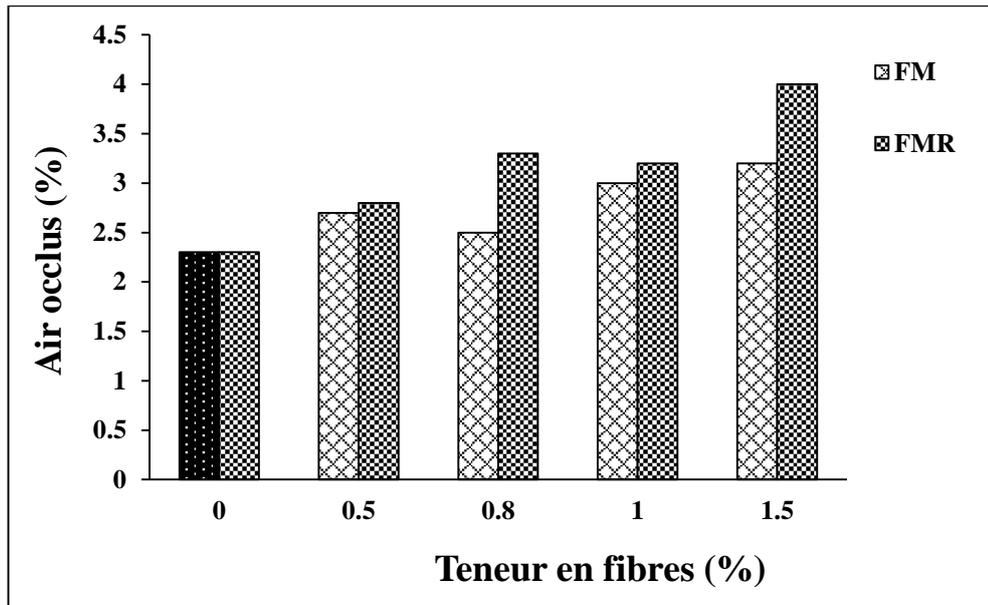


Figure 5. 1: l'effet de la teneur en fibres sur l'air occlus des BAP fibrés.

Gencil et al. [177] ont abouti aux mêmes constatations, en utilisant des fibres de polypropylène ayant une forme ondulée avec 45 mm de longueur, 1 mm de diamètre et une densité de 0.91 g/cm^3 . Par conséquent, ils ont constaté que la quantité d'air emprisonné dans les mélanges de BAP confectionné avec un rapport $E/C = 0.4$ augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Les auteurs ont signalé qu'il est bien connu que ces vides peuvent être vus comme des défauts au début de la microfissuration. À cet égard, les vides doivent être conservés dans une plage qui représente généralement 2% en volume du béton. De plus, Bolat et al. [178] ont estimé l'augmentation de la quantité d'air occlus dans le béton à 32, 21 et 29% avec l'utilisation, respectivement, de fibres d'acier, de polypropylène et de polyester en comparaison au béton de référence.

Par contre, des résultats contradictoires ont été trouvés par Aslan et Shami [179] ; ils ont indiqué que le pourcentage de l'air emprisonné dans les bétons autoplaçants contenant l'un 50 litre de fibres métalliques et l'autre du polypropylène diminue de 1.3% (référence) à 1.2% pour chacun des mélanges. Les auteurs ont aussi estimé que la combinaison des deux fibres provoque une diminution remarquable de la quantité d'air emprisonné qui peut aller jusqu'à 1%.

Frazaõ et al. [127] ont aussi conclu que l'ajout de fibres d'acier au BAP n'a eu d'influence ni sur la densité du BAP ni sur sa teneur en air. Cela est dû au pourcentage relativement faible de fibres dans la composition (2.5% en poids) qui ne modifie pas la densité. De plus,

l'utilisation de grandes quantités de fines et la bonne qualité des agrégats afin d'obtenir un béton autoplaçant, permettent aussi d'avoir une faible valeur d'air occlus dans le BAP.

5.2.2 Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams

Cet essai nous permet d'évaluer la capacité du béton à se déformer sous son propre poids. Les figures 5.2 et 5.4 illustrent respectivement la variation de l'étalement et le temps T50 en fonction du taux de fibres ajouté. D'après la figure 5.2 on remarque que le diamètre d'étalement est inversement proportionnel au dosage de fibres. La chute de l'étalement est de l'ordre de 7.89% lorsque 1.5% de FM ont été utilisées. Tandis que pour le même pourcentage de FMR, la réduction de l'étalement est plus intense, atteignant une valeur de 49.34%. En outre, il faut noter que les galettes pour les mélanges avec FM ou avec de faibles pourcentages de FMR présentent une forme ovale et sans signe de formation d'oursin ; par ailleurs, l'accumulation de particules au milieu n'a pas été aperçue suite à la bonne répartition des granulats (Figure 5.3. a). Cependant la réduction de l'étalement est remarquable et plus sévère lorsque le pourcentage des FMR ajoutées dépasse 1%, suite à la formation des oursins lors du malaxage du BAP et à la grande friction des fibres entre elles et avec les autres ingrédients (Figure 5.3. b, c). Selon les recommandations d'EFNARC [119], le mélange conçu avec 1.5% de FMR n'est pas considéré comme un BAP.

En outre, Meddah et Bencheikh [113] ont signalé que le béton contenant des déchets de fibres métalliques collectés dans un atelier de tournage montre certaines difficultés lors du processus de malaxage. En fait, ce type de fibres se caractérise par des formes différentes et aléatoires telles que droites, courbes, câblées, ondulées, frisées et parfois complexes. De plus, il a été observé que lorsque la longueur de ces fibres dépasse 30 mm, il devient difficile d'obtenir un béton ouvrable.

Des résultats similaires ont été obtenus par Khaloo et al. [112] qui ont constaté que les BAP conçus à deux classes 40MPa et 60 MPa avec l'addition des fibres industrielles à extrémités crochues de 0.5% à 2%, présentent une chute d'étalement avec l'augmentation du taux de fibres. Cependant, les auteurs mentionnent que le diamètre d'étalement reste acceptable étant généralement compris entre 650 et 800 mm.

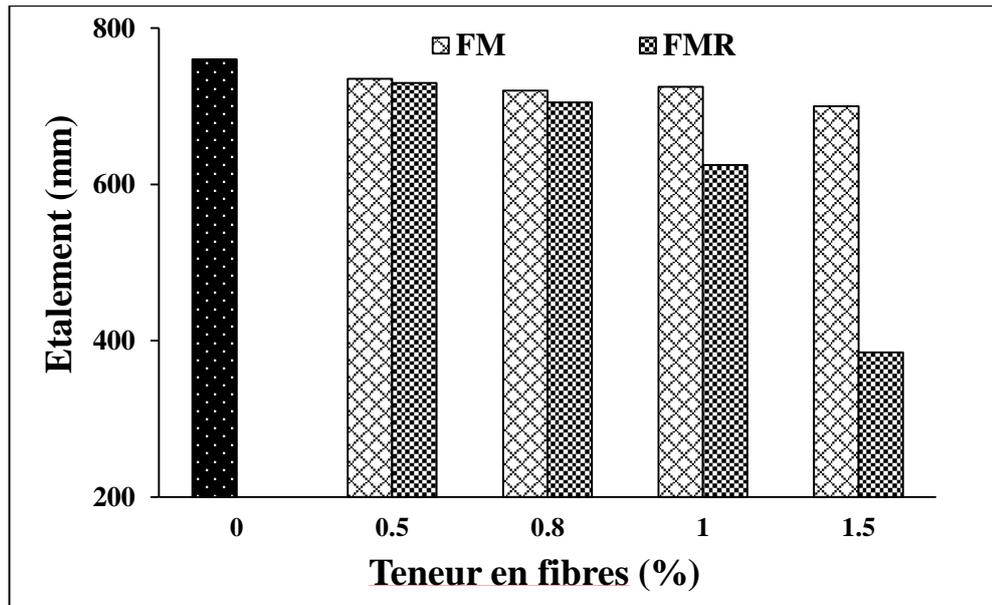


Figure 5. 2: Effet de la teneur en fibres sur l'étalement du BAP.

Zamri et al. [114] ont également indiqué que l'augmentation de la teneur en fibres industrielles à extrémités crochues de 35 mm de longueur dans les mélanges du BAP, conçu avec une substitution de 30% de ciment par les cendres volantes, affecte les propriétés du BAP frais. Cela est dû au fait que la teneur élevée en fibres d'acier a augmenté le seuil de cisaillement du BAP.

Une étude similaire à la nôtre cas [180] a été menée par Mastali et Dalvand. [181] qui ont trouvé une chute de l'étalement de l'ordre de 5% lorsque 14% de fumée de silice a été ajoutée, mais la chute est plus intense et atteint 15% si 0.75% de fibres recyclées obtenues à partir des pneus usagés ont été employées. La chute d'étalement est due à l'augmentation de la viscosité des BAP fibrés. Il faut noter que les fibres utilisées dans cette étude se distinguent de nos fibres par leurs densités supérieures (7850 kg/m^3) et par l'absence de résidus de caoutchouc, ce qui explique la différence des résultats.



(a)



(b)



(c)

Figure 5. 3: (a) Galette d'étalement pour le BAP fibré, (b - c) la formation des oursins.

D'autre part, Juhong et al. [182] ont trouvé que les fibres d'acier à extrémités crochues incorporées dans le béton brut affectent négativement la fluidité, avec des diminutions maximales d'affaissement arrivant jusqu'à 50% et 81% respectivement pour le béton de résistance normale et à haute résistance par rapport au mélange témoin. Cela pourrait être dû au fait que la dispersion des fibres d'acier dans le béton frais forme un réseau matriciel fibre-ciment dans lequel le mortier de ciment s'enroule autour de la fibre pour former une liaison fibre-matrice. Par conséquent, le réseau limite la fluidité du béton frais. Cependant, l'augmentation de la longueur des fibres de 30 mm à 60 mm conduit à une augmentation de l'affaissement du béton quel que soit sa classe de résistance. Cela peut être dû au fait que l'augmentation de la longueur des fibres réduit le nombre de fibres d'acier dans le même volume de béton avec le même contenu de fibres d'acier, ce qui affaiblit le degré de chevauchement entre les fibres d'acier et l'effet du réseau matriciel fibres-ciment.

Khaloo et al. [183] ont indiqué que l'augmentation de l'affaissement dans le béton frais est favorable si la consistance du béton est maintenue et qu'il n'y a pas de ségrégation ou de ressuage. Donc, la quantité de super-plastifiant requise pour maintenir le diamètre d'affaissement dans la plage de 40 à 60 cm doit être augmentée avec l'augmentation du pourcentage de volume de fibres de polymère récupérées à partir de déchets des courroies de distribution de voiture.

D'ailleurs Sahmaran et Yaman [184] ont révélé que, quel que soit le type de fibres incorporé dans le BAP, fibres d'acier à extrémités crochues ou fibres d'acier droites avec, respectivement, des longueurs de 30 mm et 6 mm, il en résulte une diminution de l'écoulement. Le diamètre d'écoulement des mélanges figuré dans la plage de 560 à 700 mm, et dans tous les mélanges aucun signe de ségrégation des agrégats n'a été observé près du bord de la propagation du béton.

L'histogramme de la figure 5.4 montre également que les deux types de fibres affectent le temps d'écoulement T_{50} . Une augmentation a été enregistrée avec l'augmentation du taux de fibres dans les mélanges. À 1%, le temps T_{50} croît de 0.43 s à 0.64 et 0.78 s pour les mélanges contenant FM et FMR respectivement. Ceci est également dû à la grande friction entre les fibres et les autres composants du BAP qui empêche l'écoulement et limite le diamètre d'étalement. Notons aussi que le mélange avec 1.5 de FMR n'atteint pas 50 cm de diamètre.

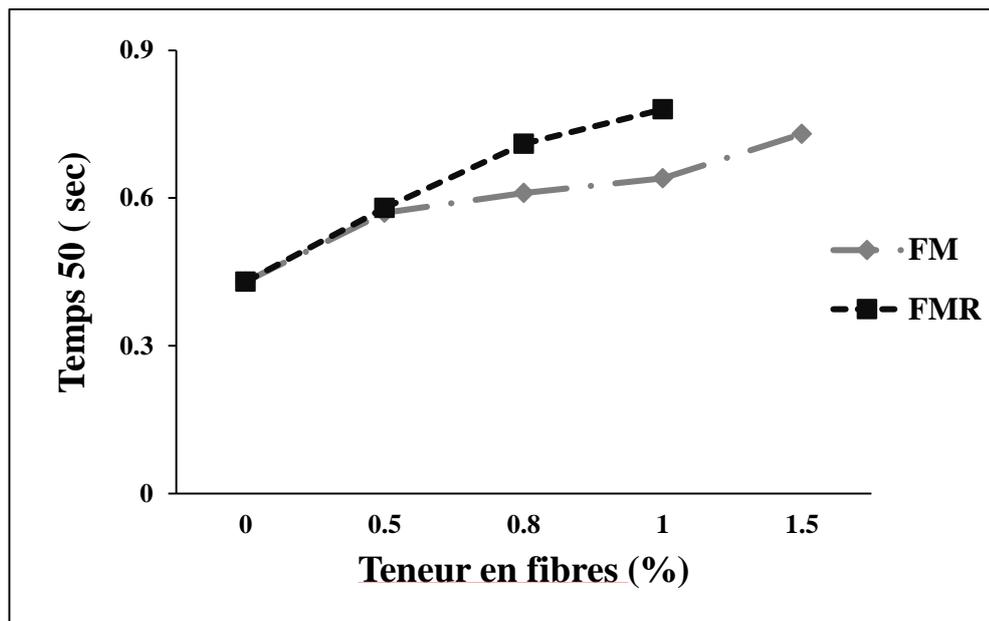


Figure 5. 4: Effet de la teneur en fibres sur le temps T_{50} du BAP.

Des résultats similaires ont été obtenus par Mastali et Dalvand [181] qui ont signalé que l'ajout de fumée de silice et de fibres recyclées dans la fabrication du BAP conduit à une augmentation dans le temps T_{50} . D'autre côté, Gülsan et al. [115] ont conclu que la durée T_{50} pour les mélanges contenant des fibres métalliques industrielles de 0, 0.5 et 1% atteint respectivement 2.66, 2.72 et 2.83 s.

Khaloo et al. [112] ont mentionné que quel que soit la classe de résistance du BAP (40 MPa ou 60 MPa) étudié, l'incorporation des fibres dans les mélanges du BAP conduit à une augmentation dans le temps T_{50} , les auteurs indiquent également que quel que soit le taux d'addition des fibres, le temps T_{50} reste dans la plage inférieure à 5 s qui est recommandé par l'EFNARC [119]. En outre, Anastasio et al. [185] ont trouvé que tous les mélanges contenant 0, 0.4% et 0.7% de FM de 30 mm de longueur présentent des valeurs T_{50} supérieures à 4 s, ce qui correspond à une viscosité élevée qui est une propriété souhaitée dans le BAP.

D'autre part Sholihin et al. [186] ont constaté que la perte de diamètre et le temps d'écoulement T_{50} du BAP sont plus élevés dans les mélanges contenant des fibres recyclées de boîtes d'alliage et de plastique, qui constituent un matériau rigide, par rapport aux mélanges contenant des fibres en caoutchouc. Ceci est expliqué par le rôle des fibres qui limitent la déformation du mélange. Les fibres incorporées parmi les composants solides dans le BAP frais ont tendance à générer un couplage fibre-agrégat résistant au mouvement. Par conséquent, le béton devient non homogène ou ne formant pas une galette correcte est dû à la distribution non homogène des fibres.

5.2.3 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V

Cet essai permet d'évaluer la mobilité d'un BAP en milieu confiné et de tester sa capacité de remplissage mais aussi de fournir une indication sur la viscosité du béton en mesurant le temps d'écoulement. La figure 5.5 regroupe l'ensemble des valeurs préconisées pour les séries des BAP fibrés étudiées. On remarque une augmentation du temps d'écoulement en fonction du dosage de fibres ajoutées. Cependant, l'utilisation des fibres industrielles conduit à une augmentation plus élevée dans le temps d'écoulement par rapport aux FMR. On note aussi un léger blocage au niveau de l'orifice pour les mélanges qui contiennent plus de 1% de fibres surtout pour les BAP fibrés par FM à cause de leur grande géométrie. Donc on constate que le BAP a perdu ses propriétés rhéologiques et sa capacité de remplissage après l'incorporation des fibres c'est-à-dire qu'il développe un seuil de

cisaillement beaucoup plus grand et devient plus résistant à l'écoulement, conséquence du frottement solide entre les fibres et les granulats.

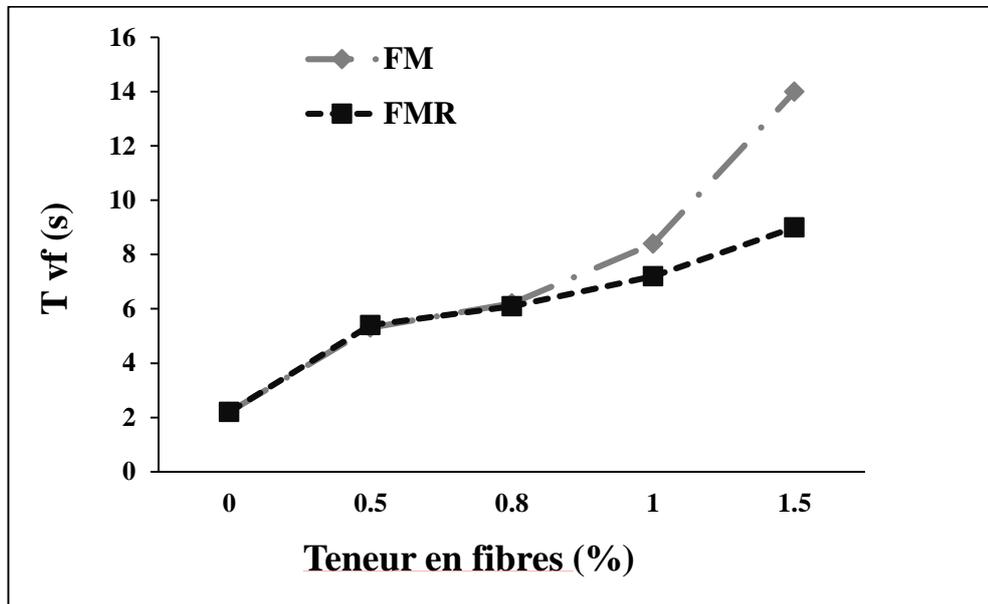


Figure 5. 5: Effet de la teneur en fibres sur le temps d'écoulement du BAP.

Ces résultats confirment ceux de la littérature sur les BAP fibrés. Rafat et al. [118] ont trouvé que les fibres d'acier à extrémités crochues, ajoutées au mélange du BAP, provoquent un blocage des particules lors de l'écoulement à travers l'entonnoir en v. Tous les mélanges du BAP ont présenté une valeur de temps d'écoulement comprise entre 7 et 12 s, la variation du temps d'écoulement était dans les limites (6 à 12 s) définies par l'EFNARC [119]. L'augmentation de la teneur en fibres a entraîné une augmentation du frottement entre les fibres et les agrégats et même entre elles, ce qui allonge le temps nécessaire pour vider l'entonnoir en v. En outre, Kamal et al. [187] ont constaté que le temps à l'entonnoir en v est compris entre 6.25 et 13.37 s avec l'addition de fibres d'acier à 0, 0.5, 0.75 et 1.0% en volume, tandis que Rambo et al. [188] ont rapporté 18.15 à 19.56 s de temps à l'entonnoir en v avec l'ajout de 1.0% et 1.5% de fibres d'acier à extrémités crochues.

Selon Zamri et al. [114], l'addition des fibres industrielles dans le BAP et l'augmentation de leurs dosages conduisent à l'augmentation de la viscosité du BAP. En outre, d'après Gülsan et al. [115], le temps à l'entonnoir en v mesuré est de l'ordre de 10.84, 12.83 et 13.76 s pour des bétons géo-polymères autoplaçants fibrées respectivement à 0%, 0.5% et 1%. Par ailleurs, dans une étude récente, Mastali et al. [116] ont remarqué que l'utilisation de fibres métalliques recyclées affecte aussi le temps d'écoulement à l'entonnoir en v ; l'augmentation

atteint 0.85% lorsque 14% et 0.75 % de fumée de silice et de fibres ont été respectivement utilisés.

Thiago et al. [189] ont constaté que les mélanges des BAP conçus avec 100% de gros granulats légers et d'autres conçus avec un mélange de granulats légers (70% gros et 30% fins) ont présenté un temps de l'ordre de 23 s et 16 s respectivement pour s'écouler à travers l'entonnoir en V, et donc classés dans la catégorie VF2 selon les recommandations de l'EFNARC [119]. Cependant lorsque le renfort en volume, dans les mélanges cités, en fibres d'acier était de l'ordre de 0.5%, le temps d'écoulement augmente jusqu'à 43 s et 46 s respectivement.

Grünewald et Joost [111] ont constaté que le temps d'écoulement à l'entonnoir en v augmente en fonction du taux des fibres incorporé. Ils ont signalé également que le comportement du BAP dans l'entonnoir en V dépend non seulement de la viscosité, mais aussi du rapport entre la taille maximale des particules et les dimensions de l'ouverture. Si la taille maximale des solides est relativement grande par rapport à l'ouverture de l'entonnoir, une teneur plus élevée en solides provoquerait un blocage. De plus, la mesure du temps d'écoulement ne donne pas simplement une indication de la viscosité mais également de la déformabilité. Plus la teneur en fibres est élevée et longue, plus le comportement de passage du mélange est décisif.

Sahmaran et Yaman [184] ont trouvé que l'addition de deux types de fibres de différentes géométries à 60 kg/m^3 conduit à un temps d'écoulement à l'entonnoir en v compris entre 2,4 et 4,3 s. Par conséquent, tous les mélanges de béton ont été considérés comme des BAP. Les auteurs ont mentionné que les fibres d'acier à extrémités crochues de 30 mm de longueur n'ont pas affecté les besoins en eau du mélange pour la même maniabilité, alors que, les fibres d'acier droites avec un diamètre et une taille plus faibles ont réduit la quantité d'eau. Cela pourrait s'expliquer par la géométrie des fibres ainsi que par les caractéristiques de surface de ces fibres. Nos résultats ne concordent pas avec ces derniers. Si on compare en termes de géométrie, nous avons constaté un temps d'écoulement à l'entonnoir en V beaucoup plus grand dans le cas de FM, cela étant expliqué par la longueur des FM de 50mm qui provoque un blocage au niveau de l'orifice de l'entonnoir en V.

5.2.4 Le rapport H_2/H_1 à la boîte en L (L-Box test)

Cet essai est destiné à tester non seulement la facilité à l'écoulement du matériau en milieu confiné, mais il fournit aussi une indication sur la ségrégation dynamique. L'effet des fibres sur le comportement à l'écoulement du BAP est présenté dans la figure 5.6. D'après cette figure, on note une diminution du rapport H_2/H_1 remarquable de l'ordre de 51% et 42% respectivement pour les BAP fibrés à 0.8% FM et FMR. La chute du rapport H_2/H_1 continue à descendre jusqu'à une valeur nulle pour les mélanges qui contiennent 1% et 1.5% de FMR ou de FM. Donc, un rapport de blocage inférieur à 80% veut dire que nous avons un risque de blocage. La figure 5.7 montre que ce dernier se manifeste par une descente de la phase grossière du matériau (graviers et fibres dont les masses volumiques sont les plus élevées) accompagnée par une remontée du mortier. D'une part, si on utilise les fibres FM, le vide entre les barres qui est de 3.75 cm empêche l'écoulement car ces fibres de 5 cm de longueur vont combler le vide entre les barres ce qui va provoquer inévitablement le blocage. D'autre part, si on utilise les fibres FMR, des oursins se forment lors du malaxage et les fibres s'enchevêtrent entre elles à cause de leur souplesse, par conséquent, le risque de blocage au niveau des barres d'acier augmente.

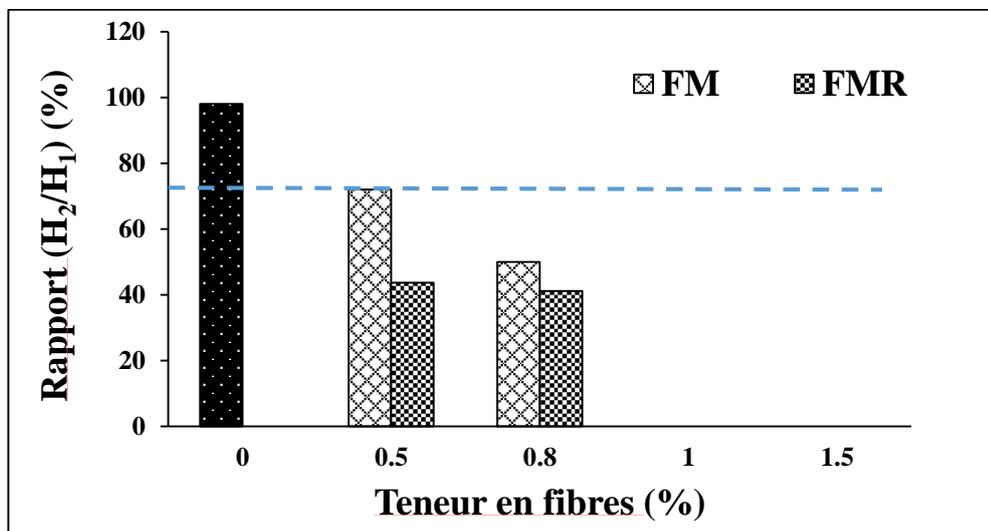


Figure 5. 6: Effet de la teneur en fibres sur le rapport (H_2/H_1) du BAP.



Figure 5. 7: illustration du blocage pour les BAP avec ; (a) FMR, (b) FM.

Des résultats similaires ont été obtenus par Gülsan et al.[115] qui ont remarqué que les valeurs du rapport de blocage des échantillons diminuent en fonction du dosage en fibres. La variation était respectivement de l'ordre de 0.96, 0.92 et 0.9 pour les mélanges contenant des fibres d'acier à 0%, 0.5% et 1%. Cependant, il convient de noter que tous les mélanges ont une capacité de passage adéquate. D'autre part, Zamir et al. [114] ont indiqué que seul le mélange du BAP avec 1.25% de FM a échoué dans le test L-box, et que les fibres ont tendance à provoquer un blocage au coin de la boîte en L. Pour cela, Hameed et.al [117] ont recommandé d'utiliser des fibres d'acier d'une taille 2 à 3 fois supérieure à la taille maximale des granulats pour une meilleure efficacité, mais afin d'éviter tout blocage, un espacement plus important des barres est nécessaire, la taille de la fibre étant supérieure à celle des agrégats.

En revanche, Rafat et al. [118] ont constaté que l'augmentation du taux de fibres d'acier à extrémités crochues de 30 mm de longueur dans le BAP, n'affecte pas de manière significative le rapport de blocage, les mélanges du BAP présentent une légère diminution du rapport de blocage avec l'augmentation du taux d'incorporation, mais tous les rapports (H_2 / H_1) varient entre 0.8 et 0.98 et sont dans les limites de l'EFNARC [119]. Les auteurs ont noté qu'aucun signe de blocage n'a été observé et que chaque BAP étudié présente une capacité de remplissage et de passage suffisantes.

D'autre part, concernant la capacité de passage, Anastasio et al. [185] ont indiqué que les valeurs de rapport de blocage à la boîte-L sont faibles dans tous les cas, avec ou sans fibres, tournant autour de 0.8. Les variations dans la teneur en laitier ou en fibres dans les proportions examinées montrent qu'elles n'ont aucun effet significatif sur le rapport de blocage à la boîte-L. Tandis que Mahmud et al. [190] ont mentionné que les mélanges des BAP fibrés avec 0.75% FM de différentes classes de résistance 20, 50 et 60 MPa contenant respectivement différents dosages en ciment 270, 500 et 550 kg/m³ présentent des valeurs du rapport de blocage à la boîte en L dépassant 0.80, ce qui indique une déformation favorable du BAP sans blocage.

5.2.5 Résistance à la ségrégation par tamisage

Cet essai permet d'évaluer la ségrégation statique qui se définit comme la perte d'homogénéité du béton. D'après la figure 5.8 on observe que le pourcentage de la laitance diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en fibres, une diminution de l'ordre de 52.12% et 51.44% a été observée dans les mélanges avec, respectivement, 1.5% de fibres FM et de fibres FMR. Les fibres ont influé positivement sur la stabilité et la résistance à la ségrégation, donc le mélange est homogène et les deux types de fibres sont bien distribués dans la matrice cimentaire.

Yehia et al. [128] ont abouti à des résultats similaires. Le pourcentage de laitance diminue de 20% à 13.3% lorsque 0.5% de fibres métalliques ont remplacé les gros granulats en volume. En outre, tous les mélanges répondaient généralement aux critères en termes de capacité de remplissage et de résistance à la ségrégation.

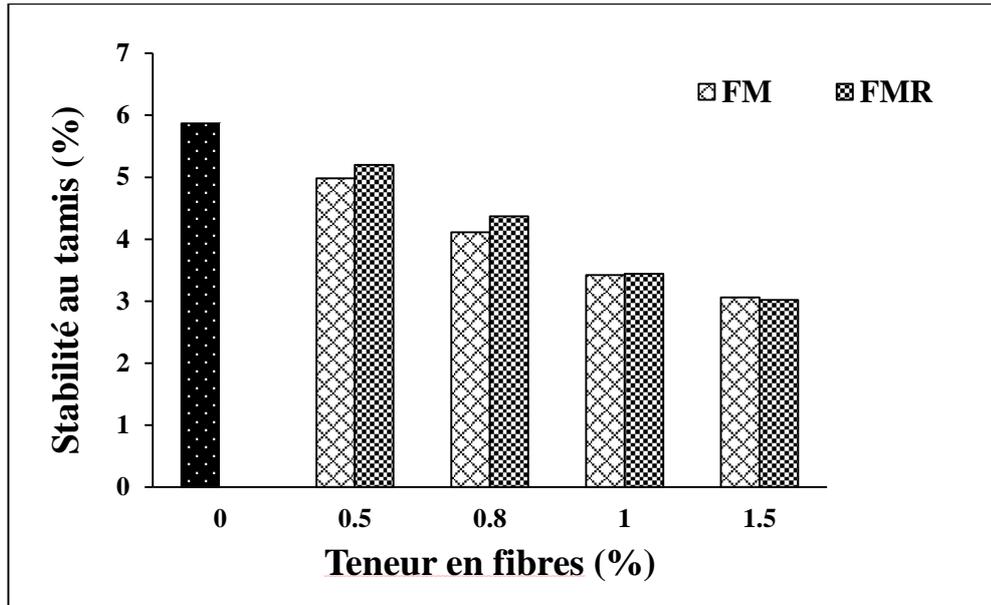


Figure 5. 8: Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la ségrégation du BAP.

En revanche, lors de l'exécution des essais de caractérisation du BAP, des observations visuelles ont été notées sur le phénomène de ségrégation du béton réalisé avec un taux de fibres supérieur à 0.8% comme le montre la figure 5.9. Un signe de ségrégation a été enregistré non seulement au milieu de la galette d'étalement, mais également au niveau des barres de la boîte en L. En fait, cela s'explique par la forte densité des fibres qui les mène à la partie inférieure qui ferme les ouvertures du tamis. Nous pouvons donc conclure que l'essai de stabilité au tamis ne reflète pas la résistance à la ségrégation du BAP fibré. Par conséquent, ce test n'est pas approprié pour le BAP renforcé par des fibres.



(a)



(b)

Figure 5. 9: Constatation visuelle sur ségrégation du BAP fibré ; (a) l'étalement, (b) l-box test.

D'ailleurs, Khaloo et al. [183] ont indiqué que l'inspection visuelle du béton frais n'a pas prouvé la ségrégation, mais un léger saignement de ségrégation a été observé dans certains mélanges, notamment les mélanges de BAP, à normale résistance, fibrés avec 0 et 0.5%. L'incorporation de fibres rend le BAP généralement moins visqueux et entraîne une diminution de l'ouvrabilité, ce qui indique que les fibres ne permettent pas aux agrégats de se déplacer librement.

Zamir et al. [114] ont démontré aussi que la résistance à la ségrégation du BAP augmente avec la réduction de la teneur en fibres. Ces chercheurs ont expliqué ces résultats par le fait que le BAP fibré a besoin de plus de pâte pour lier les fibres et les agrégats que le BAP non fibré.

Anastasiou et al. [185] ont trouvé que les valeurs de résistance à la ségrégation sont toutes inférieures à 15% qui est la limite suggérée par l'EFNARC [119]. Cependant, il existe une nette tendance à une ségrégation accrue avec une augmentation de la teneur en fibres ; pour une teneur en fibres de 0% à 0.7%, le pourcentage de laitance augmente de 6 à 14%. En revanche, le risque de ségrégation baisse avec une teneur accrue en poudre (liant). Dans le cas où 0.7% de FM sont employées, l'augmentation de la teneur en laitier de 60 à 120 kg/m³ conduit à une diminution du pourcentage de laitance de 14 à 9%.

5.2.6 Effet des fibres sur la rhéologie des BAP

L'effet des fibres d'acier sur les propriétés rhéologiques du BAP a été évalué. Pour mieux expliquer la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique, des essais au rhéomètre sont réalisés pour chacun des dosages en fibres étudiés.

5.2.6.1 Effet des fibres sur la viscosité plastique et le seuil de cisaillement

Des mesures rhéologiques par un rhéomètre de type Heidolph- RZR 2102 Control Z ont été effectuées afin de mettre en lumière les effets des fibres sur la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique.

Les histogrammes correspondant aux valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique en fonction du taux de fibres ajoutées sont illustrés dans les figures 5.10 et 5.11, respectivement. Nous constatons une augmentation pour les deux propriétés analysées avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Le taux de cette augmentation dépend du type de fibres utilisé. Dans le cas de 1,5% de FMR, on constate une augmentation de l'ordre de 7.79% et 23.9% respectivement pour le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, par rapport au BAP témoin. Tandis que pour le même pourcentage en FM, l'augmentation est

plus élevée, elle est de l'ordre de 15.46% et 28.8%. Ces résultats s'accordent mieux avec les résultats expérimentaux obtenus par les essais classiques pour la caractérisation du BAP. Le frottement des fibres entre elles et avec les autres ingrédients est la cause principale de cette augmentation.

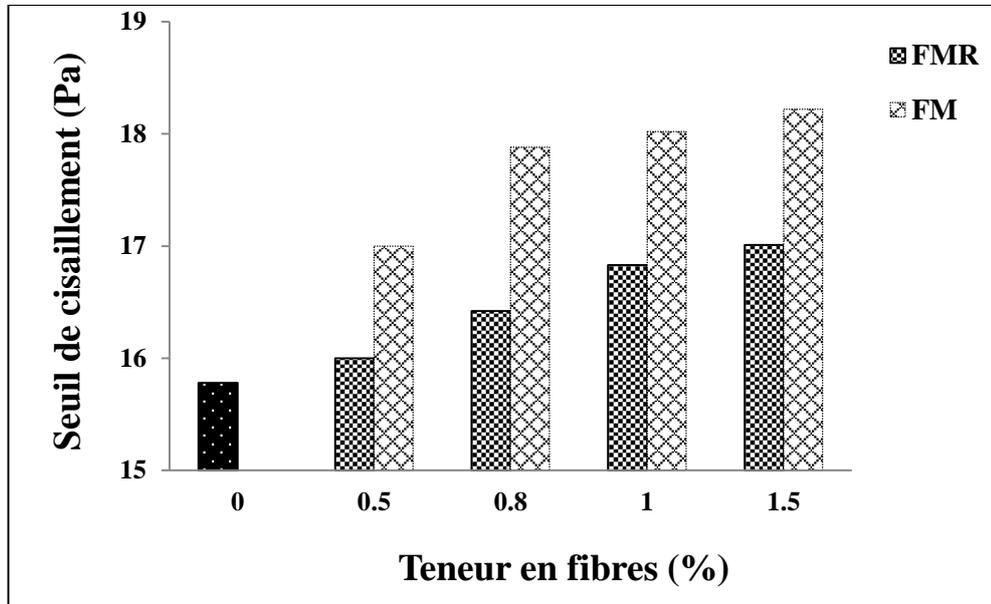


Figure 5. 10: Effet des fibres sur le seuil de cisaillement du BAP.

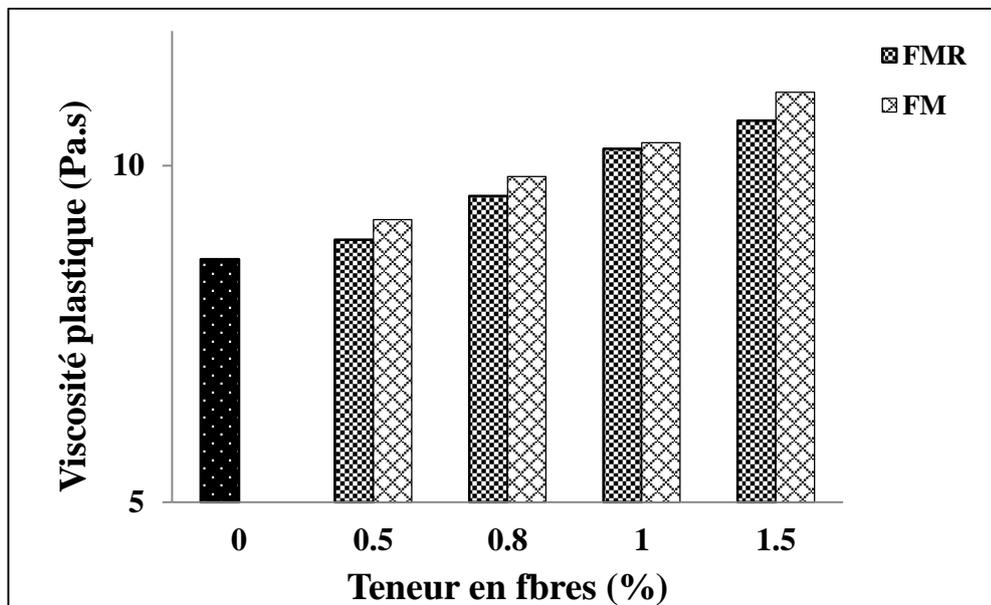


Figure 5. 11: Effet des fibres sur la viscosité plastique du BAP.

Marco et al. [191] ont abouti aux mêmes constatations. Ils ont remarqué que la présence des fibres (0.5, 0.75 et 1%) réparties de manière aléatoire a entraîné une augmentation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité du plastique. Ils ont souligné que dans tous les mélanges fibrés les valeurs de la contrainte de cisaillement étaient inférieures à 500 Pa, et celles de la viscosité plastique inférieures à 300 Pa.s. Les auteurs ont indiqué que le dosage en SP ajusté avec l'augmentation des fibres dans les mélanges du BAP pour atteindre l'ouvrabilité requise a un effet sur la contrainte de cisaillement. Pour cela la tendance à l'augmentation de la contrainte de cisaillement n'a pas été clairement observée. Le remplacement du gravier concassé par le gravier roulé de rivière n'entraîne aucune augmentation significative de la viscosité plastique jusqu'à une fraction volumique de fibres de 0.75%.

Par contre, Rambo et al. [188] ont constaté que l'addition de 1 et 1.5% de FM de 67 mm de longueur dans la fabrication du BAP conduit à une contrainte limite de cisaillement et à une viscosité inférieures à celles observées dans les mélanges non renforcés.

5.3 Effet des fibres sur le BAP à l'état durci

5.3.1 La résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression à 28 jours des bétons en fonction du dosage en fibres étudiés sont illustrés sur les figures 5.12. On observe une légère diminution de la résistance à la compression en fonction du taux de FMR incorporées ; la chute est de l'ordre de 16.5% pour le béton confectionné avec 1.5% de FMR. Cette chute est probablement justifiée par la tendance des fibres à passer à travers le fluide constitué par la pâte et à créer des vides entre les grains, la porosité du squelette granulaire est d'autant plus grande diminuant, ainsi, automatiquement la résistance. Cette réduction pourrait être aussi attribuée aux particules de caoutchouc résiduel entre les fibres FMR et aux particules adhésives sur la surface des fibres elles-mêmes. La partie en caoutchouc constitue une zone faible dans le béton conduisant éventuellement à la concentration de contraintes dans la pâte de ciment autour des particules de caoutchouc. D'ailleurs, Mestali et al. [192] ont indiqué que l'ajout de fibres peut à la fois augmenter les vides d'air dans les mélanges et limiter les propagations de fissures. Par conséquent, l'interaction de ces deux effets pourrait augmenter ou diminuer la résistance à la compression.

En revanche, l'utilisation des fibres industrielles dans la fabrication des BAP conduit à une légère amélioration de la résistance à la compression. L'augmentation enregistrée est de l'ordre de 10.81% pour un taux de FM ajouté de l'ordre de 1.5%.

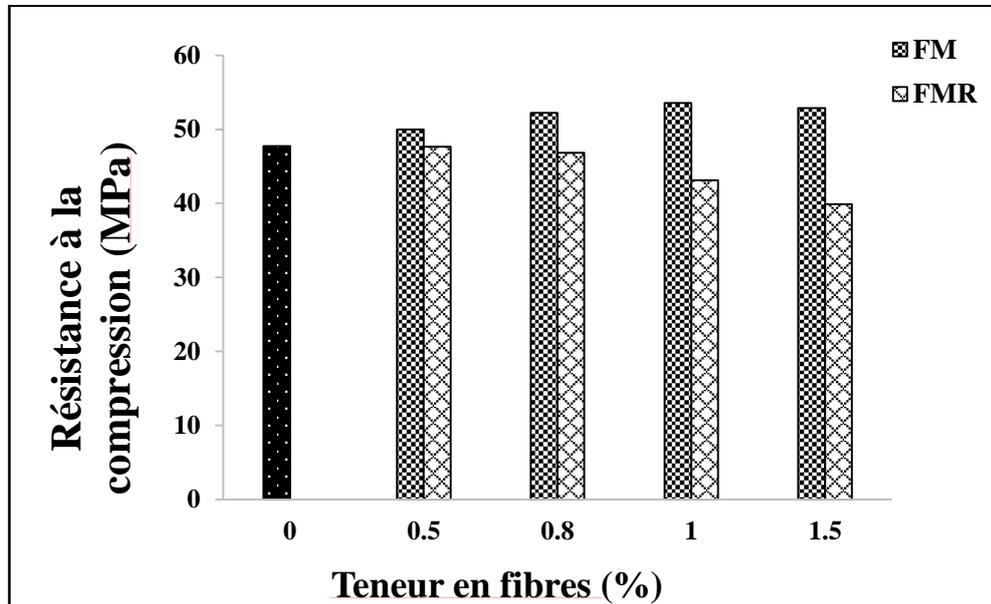


Figure 5. 12: Effet des fibres sur la résistance à la compression des BAP fibrés.

Giuseppe et al. [193] ont affirmé que les fibres d'acier recyclées ajoutées à 0.3% en volume n'ont pas d'effet significatif sur la résistance à la compression du béton. Alors que, Khaloo et al [112] ont constaté l'inverse : la résistance à la compression diminue si on augmente les pourcentages de FM. La réduction de la résistance pourrait être due à la diminution de l'ouvrabilité du béton causée par les fibres qui provoque à son tour une réduction dans la compacité du béton soumis aux vibrations. De plus, ce problème est mis en évidence dans les mélanges du BAP lorsqu'aucune méthode de compactage n'est appliquée pour leur moulage et que le compactage est effectué uniquement grâce à leurs propres poids. À cet égard, la réduction de la résistance à la compression pour des fractions volumiques de fibres d'acier plus élevées est plus importante, il convient, donc, de faire attention lors de l'application de ces types de BAP aux sections structurelles fortement renforcées.

Gülsan et al. [115] ont trouvé que l'inclusion du nono-silice conduit à une diminution de la résistance à la compression. Cependant, l'amélioration de la résistance à la compression a été remarquée lorsque 0.5% et 1% de fibres métalliques ont été utilisées. Elle s'est avérée supérieure à 5% et 7% respectivement.

Juhong et al. [182] ont trouvé des résultats similaires : la résistance à la compression augmente avec l'utilisation de 1% de fibres métalliques quel que soit leur longueur, les augmentations maximales sont respectivement de 26% et 22% pour le béton de résistance normale et le béton à haute résistance par rapport au mélange de référence. Cela peut être dû au fait que les fibres peuvent traverser les microfissures qui se développent à l'interface des gros granulats-mortiers et les arrêter, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du béton.

Contrairement à nos résultats, Khalid et al. [194] ont trouvé une légère augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en fibres collectées dans un atelier de réparation de pneus usagés. Les augmentations ont été de l'ordre de 2.7%, 3.3% et 7.9% pour une teneur en fibres de 30, 45 et 60 kg / m³ respectivement, par rapport au mélange de référence. Ce comportement pourrait être attribué au rôle des FMR dans la limitation de la propagation des fissures, ce qui améliore la répartition des contraintes et le transfert des charges dans le béton. La contradiction entre leurs résultats et les nôtres peut être attribuée aux fibres utilisées, dans notre cas nous avons utilisé les fibres telles qu'elles étaient, alors que, pour Khalid et al. [194] elles ont été nettoyées du résidu de caoutchouc par un chauffage d'environ 80 °C pendant quelques secondes.

Mestali et al. [116] ont montré aussi que l'utilisation des fibres obtenues à partir du recyclage de pneus usagés augmente la résistance à la compression du BAP. L'ajout de 0.75% de FMR à la formulation du BAP accroît remarquablement la résistance à la compression, de 18% environ par rapport au mélange témoin. Cela est dû à la capacité des fibres à arrêter la propagation des fissures par l'action de pontage.

D'autre part, pour remplacer les fibres d'acier commerciales de qualité contrôlée par des fibres recyclées, Aghaee et al. [195] ont utilisé les déchets de fils d'armatures en acier et de coffrages dans les mélanges du béton léger structural. Les fils d'acier recyclés coupés ont été utilisés à titre de comparaison avec des fibres d'acier industrielles à extrémités crochues. Afin de pouvoir comparer les effets de l'ajout de ces deux types de fibres sur le béton, leur géométrie a été modifiée de manière à les rendre similaires. La longueur et le diamètre des fibres étaient respectivement de 50 mm et 1.2 mm. Les pourcentages de renforcement examinés étaient des fractions volumiques de béton de 0.25%, 0.50% et 0.75%. Il a été constaté qu'une augmentation de 0 à 0.25% de la teneur en fibres augmentait la résistance à la compression d'environ 5% et 18% pour les mélanges avec FMR et FM respectivement,

par rapport au béton témoin, alors que l'augmentation de la teneur en fibres à 0.75% conduit à une résistance à la compression inférieure à celle du béton témoin. La diminution pour cette teneur en fibres peut être due à des difficultés de distribution des fibres à l'intérieur du béton.

5.3.2 La résistance à la flexion

Contrairement à la résistance à la compression, les résultats de la résistance à la flexion présentés dans la figure 5.13 montrent que les deux fibres utilisées dans cette étude peuvent améliorer la capacité du BAP à la flexion quelque soit le taux d'incorporation. On remarque des augmentations de 60.27% et 56.12% dans la résistance à flexion pour les mélanges des BAP fibrés avec respectivement 1.5% de FM et de FMR. Cela est dû à l'effet principal des fibres qui prévient et contrôle la propagation des fissures. En conséquence, le comportement en flexion est caractérisé par une résistance résiduelle dans la phase de post-fissuration avec une amélioration significative de la ténacité des matériaux. Selon Aiello et al. [196], la rupture en flexion pour tous les échantillons renforcés par les fibres est due à l'arrachement des fibres.

Khaloo et al. [112] ont confirmé ces résultats et ont trouvé que la résistance à la flexion à 28 jours augmente en fonction du taux de fibres ajoutées. Pour les mélanges du BAP ayant une classe de résistance moyenne, l'ajout de fractions volumiques de fibres de 0.5% à 2% entraîne respectivement une augmentation de la résistance à la flexion de 4.1, 10.6, 13.4 et 46%. De plus, l'ajout des mêmes fractions volumiques de fibres de 0.5% à 2% aux mélanges du BAP à haute résistance entraîne respectivement une augmentation des résistances à la flexion de 5.7, 9.2, 17.2 et 37.5% par rapport au BAP de référence.

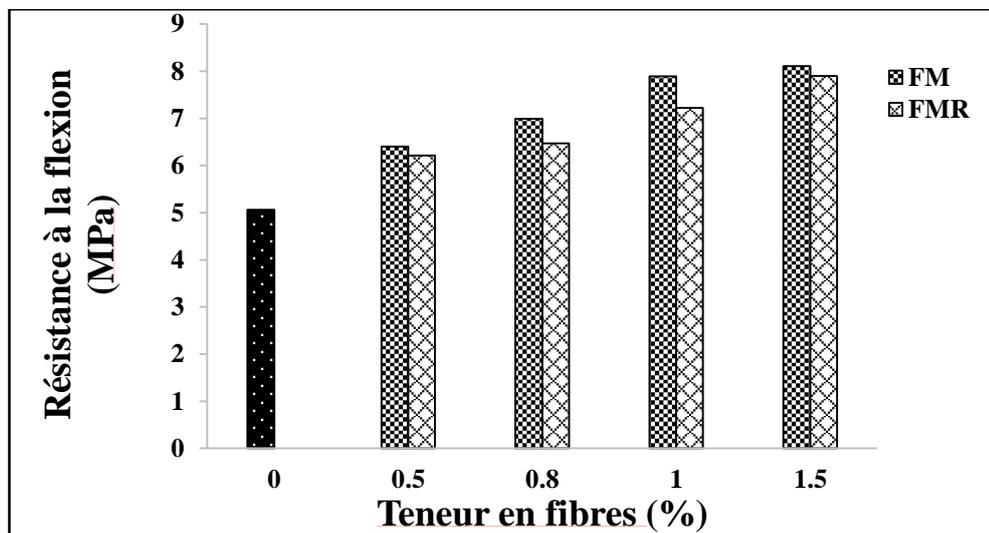


Figure 5. 13: Effet de fibres sur la résistance à la flexion des BAP fibrés.

Les mêmes constatations ont été relevées par Osman et al. [197] qui ont indiqué que la résistance à la flexion est considérablement affectée par les fibres par rapport au béton de référence. La résistance à la flexion du BAP renforcé par les FM de 30 mm de longueur augmente de 13.1, 24.2, 40.6 et 51.7% respectivement pour les mélanges contenant 15, 30, 45 et 60 kg/m³. Donc plus la quantité de fibres d'acier dans le BAP est élevée, plus la résistance à la flexion augmente.

Selon Gülsan et al. [115] l'incorporation des fibres métalliques à extrémités crochues de 30 mm de longueur de l'ordre de 0 à 1% dans la fabrication des BAP conduit à une légère augmentation dans la résistance à la flexion. Cependant, les échantillons avec des teneurs en nano-silice (NS) et en FM plus élevées présentent des résistances à la flexion résiduelle plus élevées par rapport aux échantillons sans nano-silice. Cela peut être dû à l'amélioration de l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire causée par l'ajout de nano-silice de 0, 1% et 2%. L'utilisation simultanée de FM et de NS donne une performance de flexion supérieure et la résistance maximale à la flexion est obtenue dans les échantillons avec 2% de NS et 1% de FM.

Lim et Oh [198] ont indiqué que la résistance à la flexion du béton ordinaire est considérablement améliorée par l'ajout de fibres d'acier de forme ronde et droite de 0.7 mm de diamètre et 42 mm de longueur. L'augmentation de la résistance à la flexion est de 55% environ lorsque la teneur en fibres augmente de 0% à 2%. Une autre caractéristique importante du comportement en flexion est que le béton renforcé par les fibres montre une ductilité et une capacité d'absorption d'énergie remarquable.

Seddiq et Bencheikh. [113] ont aussi abouti aux mêmes résultats, une amélioration dans la résistance à la flexion du BAP due à l'augmentation du pourcentage de fibres à extrémités crochues de 30 mm de longueur et de 0.5 mm de diamètre a été enregistrée. La résistance maximale à la flexion de l'ordre de 8.2 N / mm² a été atteinte dans le mélange avec 1.5% de FM. L'augmentation de la résistance à la flexion pour les mélanges avec 0.5%, 1% et 1.5% était respectivement de l'ordre de 14.1, 29.5 et 32.9% par rapport au béton témoin.

De même Iqbal et al. [199] ont signalé que l'addition de micro fibres de 13 mm de longueur et 0.2 mm de diamètre conduit à une augmentation de la résistance à la flexion du

béton léger autoplaçant. Ils ont estimé également que la résistance à la flexion à la première fissure et à la charge ultime augmente, une fois que la teneur en fibres est passée de 0% à 1.25%. La charge à la première fissure augmente de 32% environ tandis que la charge ultime augmente de 110% approximativement. Cela est attribué au rôle des fibres qui commencent à combler les fissures, ce qui augmente la charge finale.

5.3.3 Retrait total

Les courbes des figures 5.14 et 5.16 permettent de mettre en lumière l'influence des fibres et leurs dosages sur le retrait total du béton autoplaçant. Les résultats montrent qu'une réduction du retrait total est d'autant plus importante que le taux de fibres utilisé est élevé. Pour un taux de fibres de 1.5% la diminution du retrait des mélanges incorporant des FMR et des FM était respectivement de l'ordre de 27.27% et 27.33% est enregistrée. L'effet de la nature des fibres sur le retrait total du BAP est négligeable. Ce comportement pourrait s'expliquer par le rôle des fibres qui permettent de ralentir le mouvement du squelette du fait de l'évaporation de l'eau ou de l'évolution de la microstructure [200]. Elles permettent aussi d'empêcher le glissement de la matrice par la résistance au frottement [201].

D'ailleurs, Cao et al. [202] ont affirmé que l'utilisation des fibres métalliques de 13 mm, confère un avantage significatif à la réduction de la valeur de retrait au séchage. En outre, pour limiter le retrait au séchage, les fibres d'acier sont plus efficaces que les fibres de l'alcool polyvinylique et celle de carbonate de calcium (CaCO_3). Cela est probablement dû à la grande longueur et aux modules d'élasticité élevés des fibres d'acier. Donc, l'augmentation du module d'élasticité des fibres est un moyen efficace pour compenser le retrait de la matrice à base de ciment renforcé par les fibres.

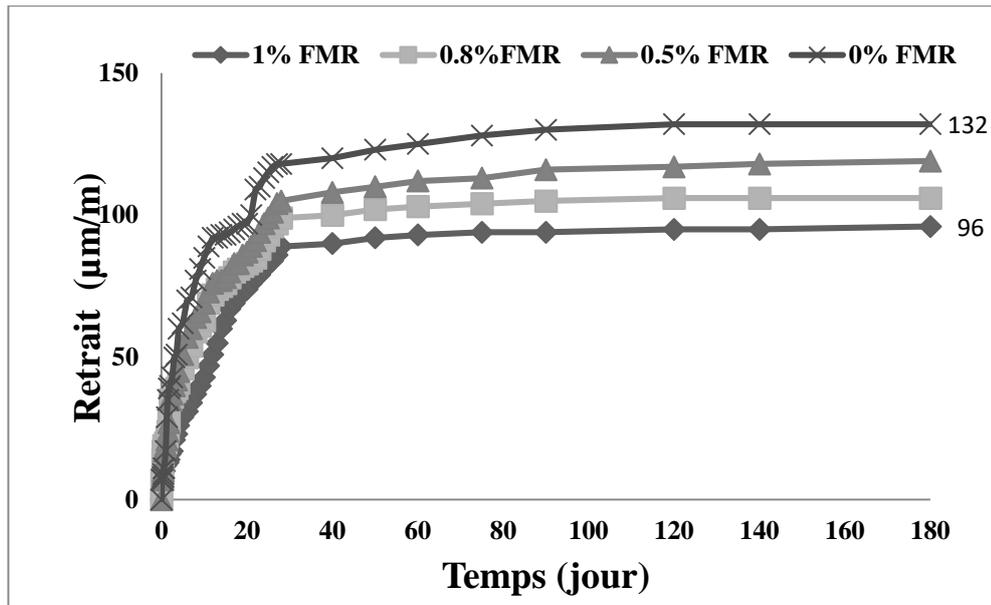


Figure 5. 14: Effet des FMR sur le retrait total du BAP.

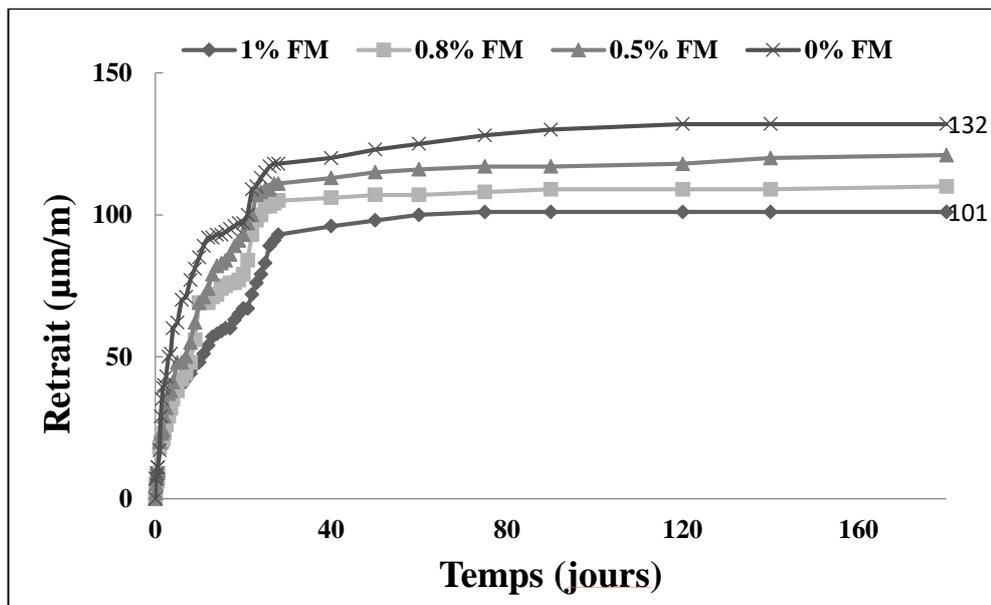


Figure 5. 15: Effet des FM sur le retrait total du BAP.

En outre, Yoo et al. [203] ont prouvé que l'ajout en volume de fibres d'acier jusqu'à 3% peut améliorer progressivement la charge ultime et le module d'élasticité du béton ultra haute performance renforcé par les fibres. Ils ont également observé que les fibres d'acier peuvent réduire le retrait et la fissuration précoce suite à leur action de pontage. De plus, Afroughsabet et al. [130] ont confirmé que l'incorporation de 1% de fibres d'acier à extrémités crochues dans le béton à base d'agrégats recyclés a entraîné une réduction du retrait. Cela s'explique par le fait que les fibres peuvent arrêter la propagation de la

fissuration qui est le résultat du retrait de séchage. Par rapport au béton confectionné à base de granulats naturels, les fibres ont une efficacité légèrement plus grande pour réduire le retrait dans les bétons confectionnés avec des agrégats recyclés : pendant 448 jours, l'addition de 1% de fibres conduit à une réduction du retrait qui atteint 10% pour le béton à base d'agrégats naturels, tandis que dans les bétons à base d'agrégats recyclés la réduction atteint 15%.

Negin et al. [123] ont évalué le potentiel de l'utilisation des différentes fibres pour réduire le retrait au séchage du béton. Ils ont indiqué que l'utilisation des fibres de polypropylène, de polyoléfine et d'autres en acier conduit à une diminution de la déformation provoquée par le retrait de séchage. Ils ont signalé que les fibres d'acier ont contribué de manière significative à la réduction du retrait (29% à l'âge de 28 jours). Tandis que pour les fibres de polyoléfine et de polypropylène la diminution du retrait de séchage final est respectivement de 13% et 12%. Pour les auteurs, l'impact des fibres de polypropylène sur la réduction du retrait, qui est le plus faible, est expliqué par la faible longueur des fibres et de leur module d'élasticité.

Kaïkea et al. [204] ont trouvé que le retrait du béton diminue considérablement en augmentant le volume de fibres ; à 28 jours les mélanges ayant une teneur en fibres ondulées de l'ordre de 1% ont montré une réduction du retrait de 4 à 9% pour les mélanges confectionnés avec le laitier et la fumée de silice comme substitution au ciment respectivement par rapport au mélange témoin. Tandis que, avec un contenu volumique en fibres de 2%, la réduction du retrait varie de 15 à 24% respectivement. Ils ont signalé qu'au bout de 90 jours, le retrait se stabilise à cause de la forme des fibres d'acier et la bonne adhérence des fibres avec la matrice cimentaire qui sont capables de limiter le rétrécissement.

D'un autre côté, l'influence des fibres, quelque soit leur nature, sur le retrait a été démontrée par Romildo et al. [205]. Ils ont constaté que le retrait des mortiers renforcés par des fibres de cellulose, de sisal court et de noix de coco considérablement réduit par l'inclusion de 0.2% en volume de mortier. En outre, les fibres retardent la fissuration initiale pour le retrait plastique, c'est-à-dire qu'elles retiennent et contrôlent efficacement le développement de la fissure dans le mortier à jeune âge.

5.3.4 La perméabilité à l'eau

La figure 5.16 montre les résultats correspondant à la profondeur de pénétration d'eau en fonction du taux de fibres incorporées et de leurs dosages. On peut observer que sous une pression de 5 bars pendant 72 heures, la profondeur de pénétration d'eau du béton s'accroît en fonction non seulement de l'incorporation des fibres mais aussi de l'augmentation de leurs dosages, et cela, en raison de la connectivité, causée par les fibres, entre les pores. L'augmentation de la perméabilité à l'eau est plus élevée dans le cas où les fibres de FM ont été utilisées par rapport l'utilisation de fibres FMR. Pour un taux de 1.5% de fibres, on a enregistré une augmentation de 31.48%, alors que, pour l'utilisation du même pourcentage de FMR, l'augmentation est seulement de 16.66%. On peut estimer, selon la norme DIN 1048, que le BAP de référence et les BAP fibrés avec 0.5% sont des bétons à perméabilité moyenne. Cependant, une incorporation de fibres dépassant 0.5% dans la fabrication du BAP conduit à une perméabilité élevée.

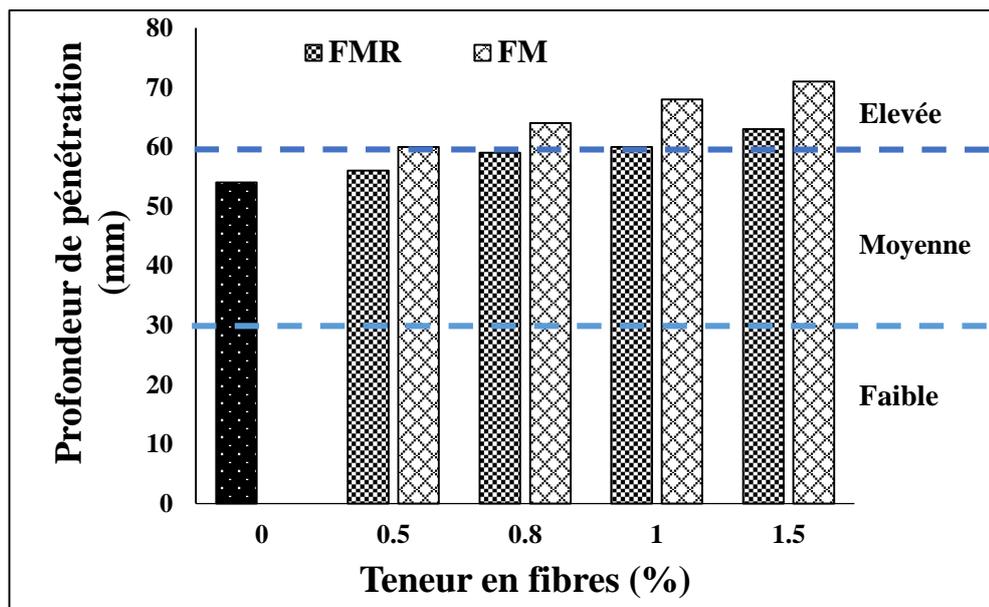


Figure 5. 16: Effet de fibres sur la profondeur de pénétration d'eau du BAP.

Bolooki et al. [124] ont rapporté des résultats contraire avec l'addition de macro fibres synthétiques polyoléfine, une réduction de la perméabilité à l'eau du béton a été constaté en raison de la limitation de l'initiation et la propagation de fissures par les fibres. Les fibres distribuées aléatoirement empêchent les microfissures de se développer en macro-fissures. De plus, les fibres peuvent jouer un rôle positif dans le colmatage de la connectivité des pores perméables à grande échelle. Pour cette raison, l'eau ne peut pas passer facilement dans

le béton. Les fibres synthétiques avec réseau de fibrillation ont moins de performances en termes de réduction de la perméabilité à l'eau en raison d'un blocage moindre du chemin d'eau.

5.3.5 Pénétration aux ions de chlorure

Les résultats illustrés dans la figure 5.17 montrent la variation de la charge passante en ions de chlorure des BAP fibrés.

Les résultats représentés sur la figure 5.17 indiquent que l'utilisation des fibres affecte considérablement la pénétration des ions de chlorure du BAP et que les échantillons préparés avec FMR ont des valeurs de pénétration de chlorure significativement inférieures à celles des échantillons avec FM.

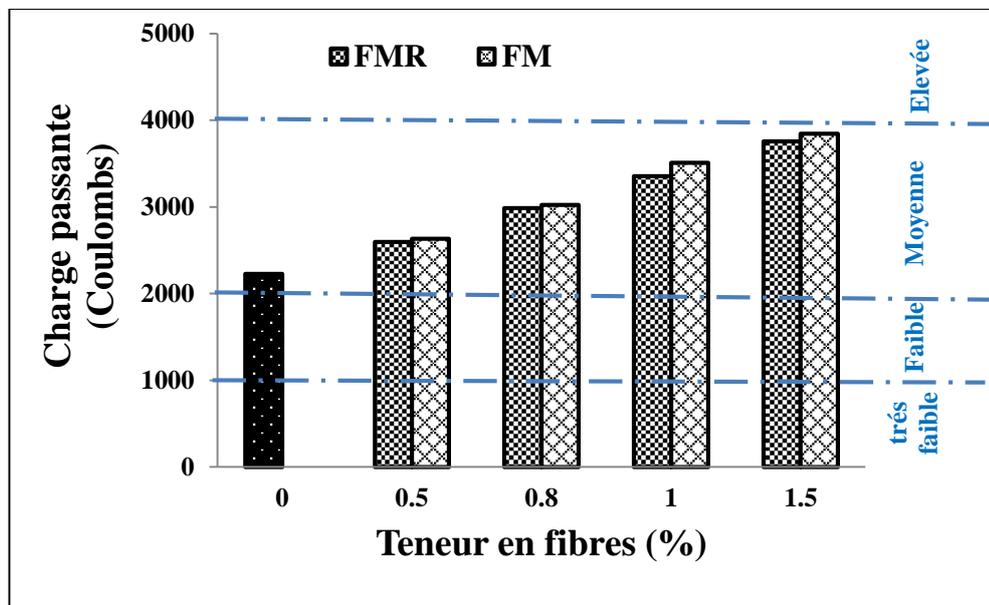


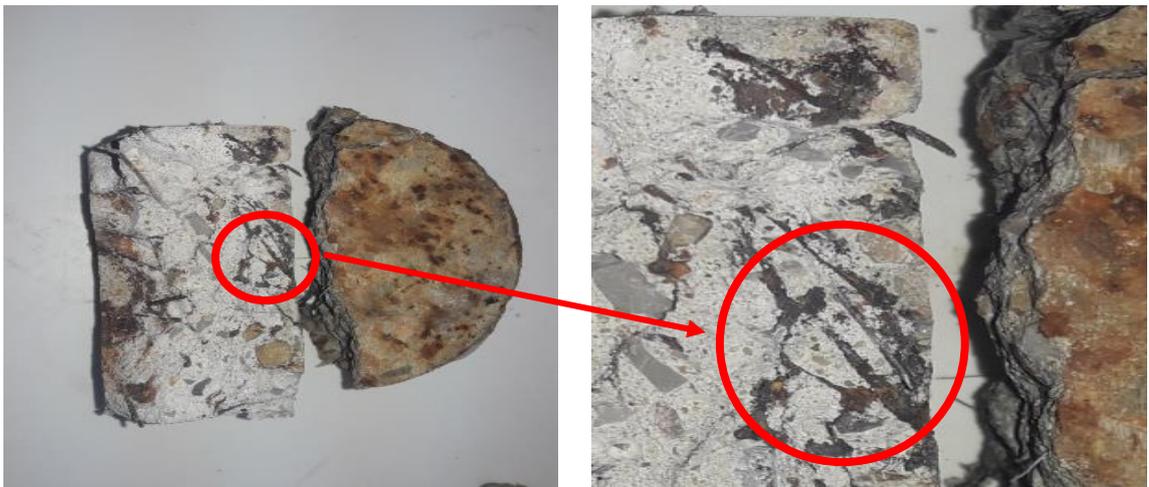
Figure 5. 17: Effet de fibres sur la charge passante en ions de chlorure du BAP.

On constate une augmentation significative de la charge passante en fonction des taux de fibres utilisés. La valeur de pénétration des chlorures la plus faible a été observée après 180 jours pour le BAP de référence, la pénétration des chlorures augmente de 68.59% et 72.49% pour un taux d'incorporation des fibres de 1.5% de FMR et FM respectivement par rapport au béton de référence. Cela est probablement dû à la conductivité électrique des fibres. On remarque aussi que, quelque soit le taux d'incorporation des fibres dans la formulation du BAP, la perméabilité aux ions de chlorure reste toujours moyenne. De plus, la constatation visuelle montre qu'il y a des signes de corrosion illustrés dans la figure 5.18.

Ces signes sont représentés par la formation de rouille sur les surfaces des échantillons, juste après la fin de l'essai. Mais avec le temps cette corrosion migre vers l'intérieur (voir zooms Figure 5.18).



(a)



(b)

Figure 5. 18: Les signes de corrosion des échantillons du BAP fibrés, (a) sur la surface, (b) à l'intérieur du béton.

De même, Frazão et al. [127] ont indiqué qu'il est possible d'observer au cours de l'essai de diffusion des ions de chlorure par migration en régime non stabilisé, la formation de matière corrodée dans la solution cathodique et l'accumulation d'ions de chlorure dans l'interface fibre-pâte détériorent le film d'oxyde protecteur des fibres d'acier, les rendant plus vulnérables à la corrosion.

Yehia et al. [128] ont affirmé que les résultats de la résistance à la pénétration des ions de chlorure des BAP fibrés sont très bas. Cependant, ils ont montré une pénétration de chlorure supérieure à celle du mélange témoin, soulevant des préoccupations concernant l'application des fibres d'acier dans le béton en raison de leur potentiel de corrosion qui est élevé. Les auteurs attribuent ce comportement à la plus grande section transversale et au frottement accru des fibres d'acier. Des observations similaires concernant les signes de corrosion sont également indiquées par les auteurs, mais, contrairement à nos résultats, ils ont mentionné qu'une telle corrosion ne peut se produire que localement c'est-à-dire à la surface du béton et que rien ne permet de penser qu'elle peut se propager plus profondément dans le béton. Quelque soit la maniabilité du béton, les fibres se maintiennent toujours à la surface du béton et peuvent se corroder en créant des taches brunâtres.

Nos résultats concordent avec ceux de Rafât et al. [118] qui ont indiqué que la résistance à la pénétration des ions de chlorure du béton a été réduite par l'utilisation de FM. Cependant, nous notons une seule différence : les valeurs de la charge se situent dans la plage de «très faible» perméabilité aux ions de chlorure pour ces chercheurs, alors que pour nous, les valeurs de la charge se situent dans la plage de «moyenne perméabilité» en raison probablement de la classe de résistance de notre béton et sa porosité relativement élevée. Ils ont constaté également que les valeurs de la résistivité enregistrées pour tous les mélanges de béton fibrés étaient très élevées, ce qui indiquait une très bonne protection des armatures d'acier adjacentes à la corrosion. Les valeurs de la charge passante étaient de l'ordre de 766 Coulombs pour le mélange avec une teneur en volume de fibres de 1,5% par rapport au mélange témoin (198 Coulombs).

Au contraire, Anastasiou et al. [185] ont constaté un effet négligeable de l'augmentation de la teneur en fibres d'acier dans le BAP sur la résistance à la pénétration des ions de chlorure. Le mélange contenant 0.7% de fibres en volume ne présentait qu'une valeur mineure de la teneur en chlorures de 0.7% alors que le mélange de référence présente une valeur de 0.6%.

5.3.6 Absorption capillaire

L'effet de la teneur en fibres FMR et FM sur l'absorption capillaire pour le béton autoplaçant contenant 0 à 1.5% de fibres est illustré dans les figures 5.19 et 5.20 respectivement. Comme l'illustre les deux figures, l'absorption capillaire des BAP fibrés augmente proportionnellement avec l'augmentation des fibres ajoutées. On remarque qu'il y a une disparité dans l'augmentation de l'absorption capillaire en termes de type de fibres utilisées, où elle arrive à 1, 7.05, 8.16 et 12,25% pour une addition de 0.5%, 0.8%, 1% et 1.5% de FMR respectivement. Tandis que pour les mêmes pourcentages en FM, elle atteint respectivement 9.8, 12.74, 14.7 et 17.45%. Ce comportement est dû à la connectivité entre les pores et les micro-canaux créés par les fibres, elles-mêmes, et qui facilitent la pénétration d'eau à l'intérieur du béton entraînant une absorption plus élevée. L'uniformité et la grande géométrie des FM par rapport aux FMR sont les causes d'une augmentation d'absorption capillaire supérieure en cas d'utilisation des FM.

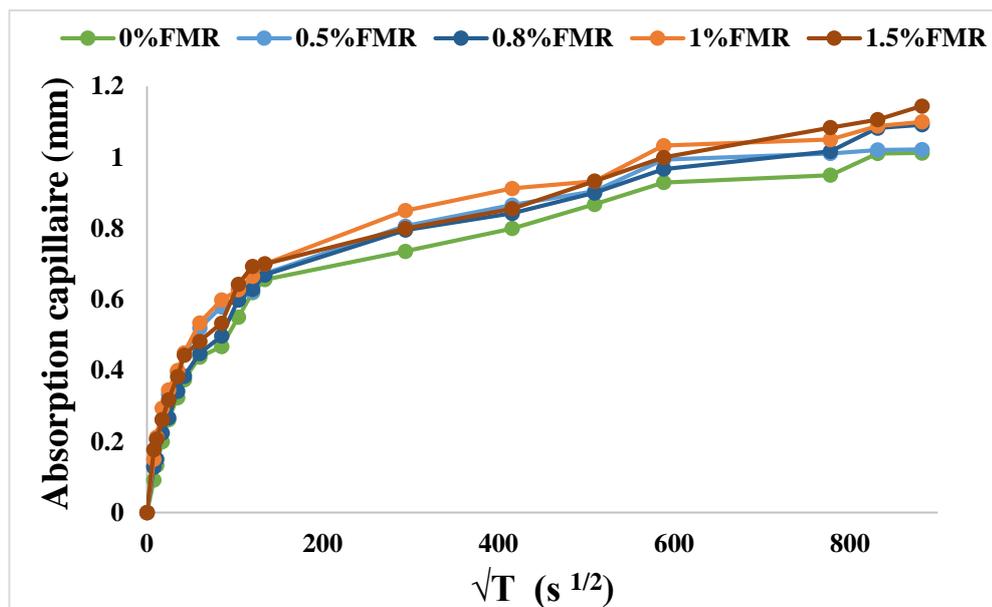


Figure 5. 19: Effet des FMR sur l'absorption capillaire du BAP.

Selon Koushkbaghi et al. [129] l'incorporation des fibres d'acier augmente l'absorption d'eau de 9% par rapport aux échantillons non fibrés. Les fibres augmentent la connectivité entre les pores et les micro-canaux qui facilitent la pénétration d'eau à l'intérieur du béton, ce qui entraîne une absorption plus élevée.

D'autre part, Farazo et al. [127] ont indiqué que la quantité totale d'eau absorbée est plus grande dans le BAP non renforcé que dans les BAP fibrés, mais le coefficient

d'absorption d'eau par capillarité est similaire dans les deux compositions, ce qui signifie que la présence de fibres n'a pas provoqué de modification substantielle de la porosité capillaire de la surface des BAP fibrés pour faciliter la pénétration d'agents détériorants.

Contrairement à nos résultats Afroughsabet et al. [130] ont trouvé que les fibres d'acier à extrémités crochues à un effet significatif sur l'absorption d'eau du béton. Une réduction de 29% pour les granulats naturels avec l'inclusion de 1% de fibres d'acier et 23% pour les granulats recyclés.

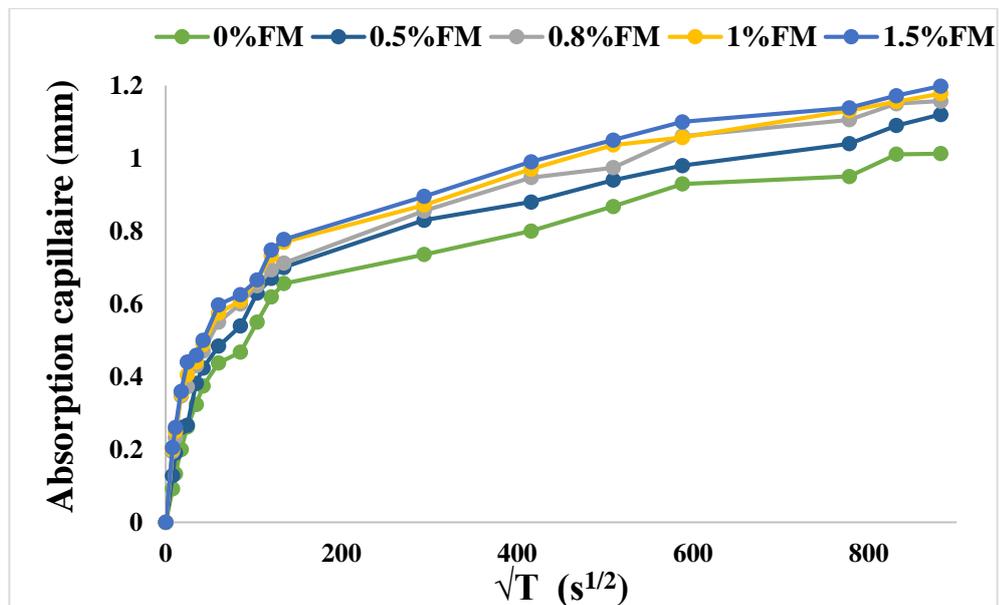


Figure 5. 20: Effet des FM sur l'absorption capillaire du BAP.

5.4 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre concernant l'effet des fibres métalliques recyclées et industrielles sur les performances du BAP à l'état frais et durci nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'addition des fibres d'acier a modifié les paramètres à l'état frais et durci du BAP par rapport au BAP de référence.
- L'ajout de fibres d'acier (FMR ou FM) réduit la maniabilité du BAP. Le pourcentage de fibres ajoutées est corrélé négativement à l'ouvrabilité du béton et entraîne, par conséquent, une augmentation de la viscosité, une diminution de la fluidité et un blocage possible, mais augmente la résistance à la ségrégation.

- La résistance à la compression du BAP avec les fibres d'acier de pneus usés diminue avec l'augmentation du pourcentage de FMR en raison de la présence d'une partie de particules de caoutchouc à la surface des fibres qui constituent des zones faibles dans le béton. Mais les fibres d'acier FM améliorent légèrement la résistance à la compression.
- Les fibres d'acier (FMR ou FM) améliorent la résistance à la flexion du fait de l'action de pontage de la fibre d'acier et empêchent la formation de fissures et leur propagation.
- L'utilisation de fibres d'acier, (FMR ou FM), dans la fabrication du BAP réduit le retrait total. En effet, les fibres aident à ralentir le mouvement du squelette du fait de l'évaporation de l'eau ou de l'évolution de la microstructure, elles empêchent aussi le glissement de la matrice grâce à la résistance au frottement.
- L'effet de fibres d'acier, (FMR ou FM), sur l'ensemble des propriétés de durabilité étudiées dans ce chapitre est défavorable. Le coefficient d'absorption capillaire ainsi que la profondeur de pénétration d'eau augmente avec l'augmentation du taux de fibres incorporées dans le BAP, à cause de la connectivité entre les pores et les microcanaux produits par les fibres, elles-mêmes, qui facilitent la pénétration d'eau à l'intérieur du béton
- La diffusion des ions de chlorure augmente en fonction de la teneur en fibres ajoutées à cause de la conductivité électrique des fibres.

**CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET
DISCUSSIONS EFFET DU LAITIER ET
DES FIBRES HYBRIDES SUR LES
PERFORMANCES DU BAP**

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS _EFFET DU LAITIER ET DES FIBRES HYBRIDES SUR LES PERFORMANCES DU BAP

6.1. Introduction

Vu les effets négatifs de l'utilisation des fibres métalliques recyclées obtenues à partir de pneus usagés sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP par rapport aux fibres industrielles, et afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des fibres métalliques dans la fabrication du BAP, nous nous intéressons, dans ce chapitre, à l'étude et à l'évaluation de l'effet de l'incorporation des fibres hybrides (FHy) sur les performances du BAP. De plus, l'ajout cimentaire « laitier » a été également utilisé dans le but d'améliorer le comportement des BAP fibrés à l'état frais. Les fibres hybrides ajoutées au BAP sont une combinaison des deux types de fibres utilisés précédemment (FMR et FM), 50% de chaque type.

Ce chapitre traite les résultats obtenus à partir de différents tests adoptés dans le programme expérimental. Non seulement les propriétés rhéologiques classiques pour la caractérisation du BAP ont été effectuées, mais aussi des essais par le rhéomètre ont été également réalisés. De plus les propriétés mécaniques et physiques des BAP fibrés ont été aussi évaluées dans ce chapitre. À la fin de ce chapitre les propriétés de la durabilité telles que l'absorption capillaire, la perméabilité à l'eau et la perméabilité aux ions de chlorure ont été analysées en fonction du taux de fibres ajouté.

6.2. Effets des fibres hybrides et du laitier sur les propriétés du BAP à l'état frais

Concernant les performances à l'état frais des BAP fibrés, dans ce chapitre. Nous avons adopté la formulation de référence antérieure. Nous avons fixé le dosage en superplastifiant à 1% du poids de liant utilisé, le rapport S/M à 0.5 et E/L à 0.42. Les variables dans cette partie sont les pourcentages des fibres hybrides ajoutées ainsi que le dosage de substitution du ciment par le laitier.

Trois séries ont été étudiées, à savoir un BAP sans ajout choisi comme béton de référence et deux BAP l'un avec 15% de laitier et l'autre avec 25% de laitier. Quinze formulations ont été étudiées à savoir pour chaque pourcentage de laitier, nous avons incorporé cinq taux de FHy 0, 0.5, 0.8, 1 et 1.5%. Le tableau 6.1 récapitule les quinze compositions des BAP élaborées. La méthode de malaxage adoptée est la même que celle décrite précédemment.

Tableau 6. 1: Composition des BAP fibrés avec les FHy à base de laitier (kg/m³).

	Composition kg/m ³								
	Ciment	Laitier	Gravier		Sable	FHy		SP	Eau
			3/8	8/15		FMR	FM		
0F 0laitier	442.4	-							
0F 15laitier	376	66.4							
0F 25laitier	331.8	110.6							
0.5F 0laitier	442.4	-				9.15	18.7		
0.5F 15laitier	376	66.4				9.15	18.7		
0.5F 25laitier	331.8	110.6				9.15	18.7		
0.8F 0laitier	442.4	-	465	347.7	818	14.4	30	4.42	200.7
0.8F15laitier	376	66.4				14.4	30		
0.8F 25laitier	331.8	110.6				14.4	30		
1F 0laitier	442.4	-				18.3	37.5		
1F 15laitier	376	66.4				18.3	37.5		
1F 25laitier	331.8	110.6				18.3	37.5		
1.5F 0laitier	442.4	-				27.5	56.2		
1.5F 15laitier	376	66.4				27.5	56.2		
1.5F 15laitier	331.8	110.6				27.5	56.2		

6.3. Effet des fibres hybrides sur les propriétés du BAP à l'état frais

6.3.1. Air occlus

La figure 6.1 présente les résultats de la variation de la quantité d'air occlus en fonction du taux de fibres ajouté pour les différents BAP fibrés étudiés.

D'après l'histogramme de la figure 6.1, on observe une augmentation de la teneur en air proportionnel au taux de fibres incorporé. L'augmentation de la teneur en fibres de 0 à 1.5% de FM, FHy et FMR conduit à une augmentation de la teneur en air de 2.3% à 3.2%, 3.6% et 4% respectivement. On constate que la valeur la plus élevée a été enregistrée avec les FMR, suivie par les FHy. Cela peut être attribué à la grande porosité entraînée par les FMR à cause de l'enchevêtrement des fibres entre elles, d'une part, et de l'effet combiné de ces fibres avec certaines quantités de caoutchouc résiduel sur les surfaces du FMR d'autre part,

augmentant encore plus la quantité d'air à l'intérieur du BAP par rapport aux BAP fibrés avec FM.

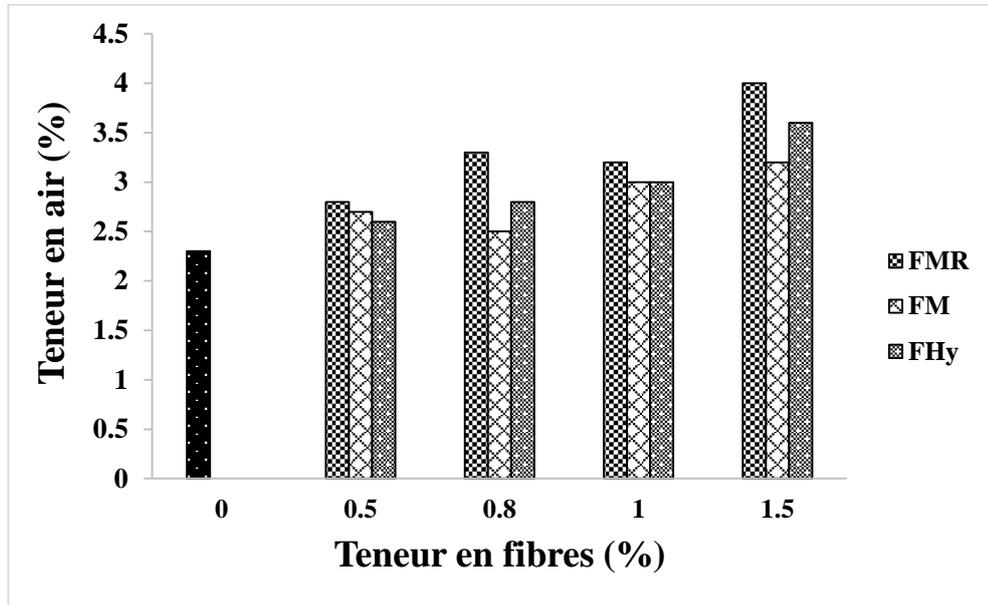


Figure 6. 1: Effet des fibres sur la teneur en air occlus du BAP.

Sahmaran et al. [184] ont abouti aux mêmes constatations. L'ajout de 60 kg/m^3 de FM de 30 mm de longueur à la formulation du BAP augmente la teneur en air de 1.8% à 4.2%. Tandis que la combinaison de 50% de ces fibres avec d'autres de faible longueur (6mm) conduit à une augmentation plus élevée de la quantité d'air occlus arrivant à 4.5%. De plus, Aruntas et al. [206] ont constaté que lorsque la teneur en fibres d'acier dans le béton augmente, la quantité d'air emprisonné augmente également. Ils ont aussi déterminé que le fluidifiant, les fibres et la durée de la vibration externe augmentent la quantité d'air occlus dans les bétons.

6.3.2. Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams

L'essai au cône d'Abrams nous permet d'évaluer la déformation du BAP sous l'effet de son propre poids en milieu libre. Les figures 6.2 et 6.3 illustrent les résultats concernant le diamètre d'étalement et le temps T_{50} au cône d'Abrams, respectivement en fonction du taux de fibres ajouté.

D'après la figure 6.2, on constate une amélioration sur le diamètre d'étalement du BAP lors de l'utilisation des FHy par rapport à l'utilisation des FM et des FMR. Au lieu d'une chute d'étalement de l'ordre de 7.89% et 49.34% pour les mélanges contenant 1.5% de FM

et FMR respectivement, on a enregistré une légère diminution d'étalement qui atteint 5.5% avec le même pourcentage en FHy. Cela peut être expliqué par les dimensions non homogènes des fibres FHy, c'est à dire que pour un volume de fibres de 1.5%, les longueurs des fibres varient ce qui minimise la friction et l'enchevêtrement des fibres entre elles. D'autre part, l'utilisation de 50% de FMR dans la composition de FHy réduit le pourcentage des grains de caoutchouc résiduel dans les FMR, ces grains de caoutchouc aident à augmenter la viscosité du mélange impliquant une réduction d'étalement.

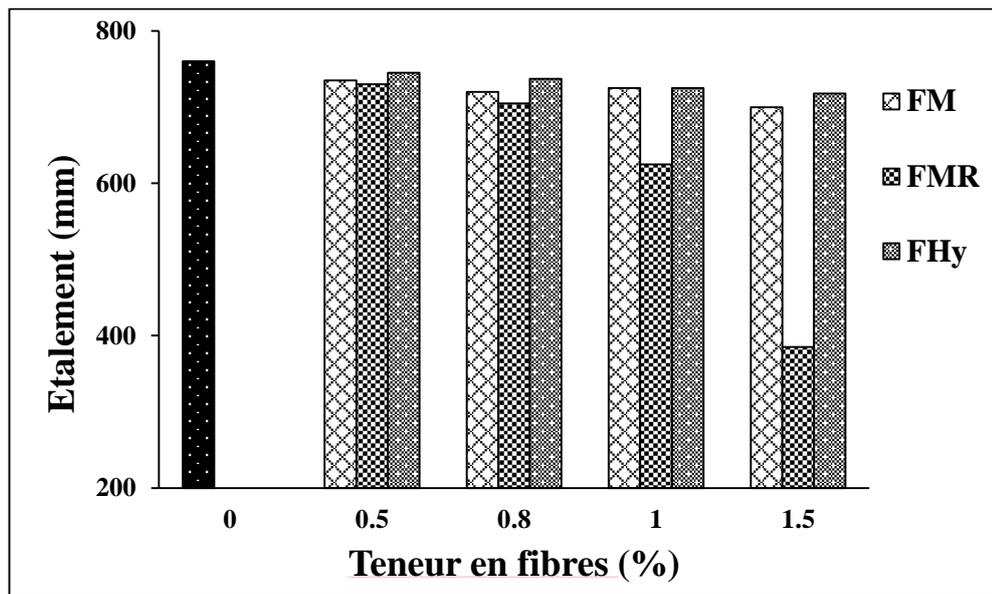


Figure 6. 2: Effet des fibres sur le diamètre d'étalement du BAP.

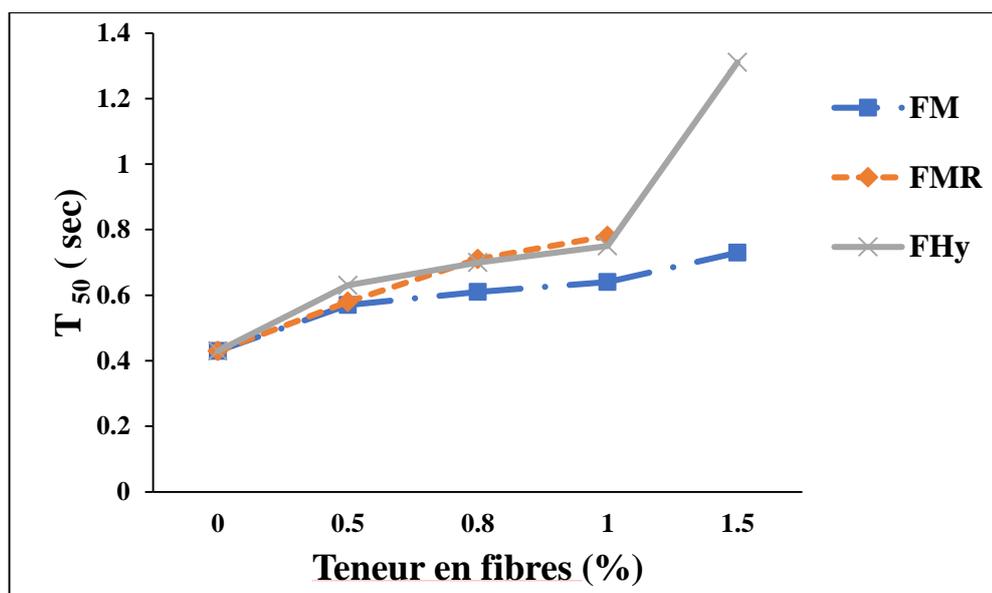


Figure 6. 3: Effet des fibres sur le temps T50 du BAP.

Des résultats similaires ont été obtenus par Clifford et al. [207] qui ont trouvé que la combinaison, à différents pourcentages, des micros fibres de 13 mm de longueur et de 0.2 mm de diamètre avec des fibres à extrémités crochues de 60mm de longueur, une fois, et une autre fois avec des fibres à extrémités doublement crochues, donne un étalement variant de 780 à 760 mm et de 750 à 710 mm, respectivement. Cette combinaison aide à améliorer l'écoulement du BAP, car l'utilisation des micros fibres seules donne une faible valeur d'étalement. La diminution de la maniabilité peut être attribuée à une modification de la structure interne de la matrice (pâte de ciment) autour des agrégats à l'état frais par la grande quantité de microfibrilles. Cette modification résulte de la grande surface totale des microfibrilles qui se traduit par une adhérence accrue qui limite la propagation du BAP. Donc, ces résultats concordent avec nos résultats avec les FMR et les FHy. D'autre part, Rambo et al. [188] ont trouvé des valeurs de diamètre d'étalement des BAP fibrés non constantes. Cela est dû à l'effet de perturbation générée par les fibres dans le squelette granulaire du mélange.

D'ailleurs, dans une étude antérieure, Mohammadi et al. [208] ont constaté aussi que l'ouvrabilité du béton ordinaire diminue de manière uniforme avec l'augmentation de la teneur en fibres. L'introduction de fibres d'acier entraîne une augmentation apparente de la rigidité du mélange. Cependant, le rapport d'aspect des fibres a une influence significative sur l'ouvrabilité du mélange frais. Ils ont indiqué que la combinaison entre deux fibres d'acier de 50 et 25 mm de longueur pour avoir un rapport de forme inférieur entraîne une amélioration dans l'ouvrabilité par rapport à l'utilisation de longues fibres. La tendance des fibres à s'agglomérer est nettement réduite dans le cas de béton avec fibres de rapport d'aspect inférieur. En outre, une dispersion plus uniforme des fibres plus petites a été obtenue dans le béton par rapport aux fibres plus grandes. En outre, la formation d'oursins de fibres excessives a été réduite, même à des fractions de volume plus élevées ce qui a permis d'améliorer l'ouvrabilité du mélange de béton contenant des fibres plus courtes.

Tabatabaeian et al. [209] ont mentionné que l'addition des FM de 50mm de longueur à 0.5% et 1% provoque une diminution d'étalement de 0.6% et 1.8%, respectivement. De plus, le remplacement partiel des FM par d'autres en polypropylène de 12 mm de longueur aide à intensifier cette réduction, elle atteint 41 et 42% pour les mélanges contenant une combinaison de (0.1% FM + 0.4% F poly) et (0.4 %F poly+ 0.6% FM), respectivement. Cette réduction pourrait s'expliquer par la capacité des fibres organiques à absorber plus d'eau telles que le polypropylène par rapport aux fibres d'acier dont l'absorption est négligeable.

La variation du temps d'écoulement T_{50} en fonction du taux de fibres ajouté est montrée sur la figure 6.3. Les résultats montrent que l'utilisation des FHy aide le BAP à atteindre un diamètre de 50 cm avec un taux de fibres de 1.5%, ce que nous n'avons pas pu obtenir avec les FMR. Malgré une augmentation supérieure dans le T_{50} avec 1.5% de FHy qui arrive à 1.33 (s) par rapport aux FM, nous avons pu améliorer la faisabilité d'utiliser les FMR dans le BAP.

Alors que Malgorzata et Tomasz [210] ont indiqué que l'ajout de fibres hybrides, c'est à dire une combinaison entre FM droites et d'autres ondulées de 6 et 35 mm de longueur, respectivement, n'a pas une influence significative sur le temps T_{50} , alors que, l'augmentation dans la teneur en FHy au-delà de 2% provoque une légère augmentation du T_{50} .

De plus, Akcay et Ali [211] ont affirmé aussi que l'ajout d'une combinaison de micro fibres droites de haute résistance à la traction et de deux types de macro fibres à extrémités crochues de haute et normale résistance à la traction, provoque une augmentation du temps d'écoulement T_{50} . Ils ont indiqué que le principal facteur qui affecte la fluidité est la géométrie des fibres plutôt que leur résistance à la traction. L'ajout de 0.75% de fibres, n'a pas modifié de manière significative les valeurs T_{50} du BAP, tandis que l'ajout de 1.5% de fibres a augmenté considérablement les valeurs T_{50} .

6.3.3. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel

La capacité du passage du béton à travers les zones confinées a été évaluée par la mesure du temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V. La figure 6.4 représente le temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction du taux de fibres employé.

Selon la figure 6.4, nous notons une amélioration dans le temps d'écoulement à l'entonnoir en V par l'utilisation des FHy par rapport aux FM et FMR. Les résultats montrent que quelque soit le taux de fibres ajouté, les FHy donnent la plus faible valeur du temps d'écoulement. L'augmentation de la teneur en fibres de 0 à 1.5% conduit à une augmentation du temps d'écoulement de 2.2 s à 14 s, 9 s et 8.89 s pour les mélanges confectionnés respectivement avec FM, FMR et FHy. Ce comportement peut être expliqué d'une part par la géométrie variable des FHy qui contiennent moins de fibres longues (50 mm) qui ont la capacité de provoquer un blocage au niveau de l'orifice de l'entonnoir, et d'autre part par la réduction du taux des FMR qui peuvent former des oursins lors du malaxage, suite à leur

enchevêtrement. Cette variation dans la géométrie des FHy aide à réduire le frottement entre les fibres et les autres ingrédients.

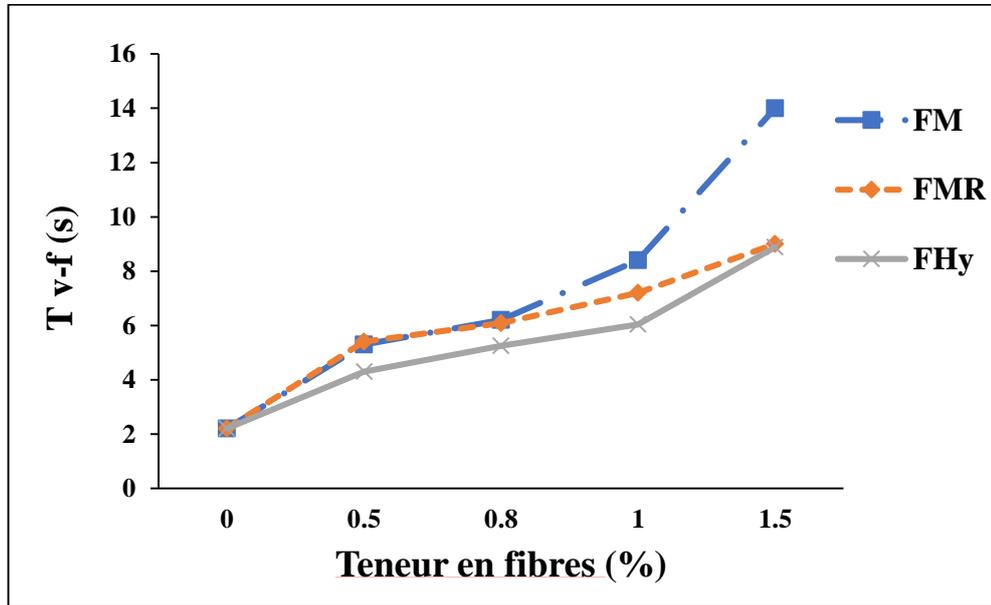


Figure 6. 4 : Effet des fibres sur le TV-Funnel du BAP.

D'ailleurs, Tabatabaeian et al. [209] ont signalé que l'ajout de fibres dans le BAP a entraîné une augmentation dans la viscosité du béton. Si on augmente le pourcentage de fibres, le temps d'écoulement à l'entonnoir en V augmente. En outre, ils ont constaté que l'effet des fibres de polypropylène sur la viscosité est nettement plus élevé que celui des fibres d'acier. L'addition de 0.5% de fibres d'acier augmente le temps d'écoulement à l'entonnoir en V de 7%. Cependant, pour le même pourcentage de 0.5% de fibres, le remplacement partiel des fibres d'acier par des fibres de polypropylène de 0.1%, 0.2%, 0.3% et 0.4% augmente le temps d'écoulement à l'entonnoir en V de 25%, 41%, 64% et 66%, respectivement. Cela est dû à la grande capacité des fibres de polypropylène d'absorber l'eau par rapport aux fibres d'acier, elles réduisent considérablement l'eau du béton, augmentant ainsi la viscosité et le temps d'écoulement à l'entonnoir.

En outre, Rambo et al. [188] ont abouti aux mêmes constatations. Le temps d'écoulement augmente avec l'addition de 1% de FM. Toutefois, l'incorporation du même pourcentage en FHy réduit légèrement le T_{v_f} , en restant dans la plage recommandée par l'EFNARC [119]. Mais, l'augmentation de la teneur en FM ou FHy provoque le risque de blocage au niveau de l'ouverture de l'entonnoir. Akcay et Ali [211] ont mentionné que l'addition de 0.75% de fibres FHy ne modifie pas de manière significative la capacité de

remplissage du béton, alors que l'addition de 1.5% de FHy augmente considérablement le temps d'écoulement. Ceci peut être expliqué par la quantité considérablement élevée de FHy qui entraîne une plus grande quantité d'air dans le béton, ces bulles d'air peuvent entraîner des valeurs plus élevées du temps à l'entonnoir en V.

6.3.4. Mesures du rapport H_2/H_1 de l'essai L-Box

Le comportement des BAP fibrés dans une zone ferraillée a été évalué par l'essai de la boîte en L. Cet essai donne une bonne évaluation sur la capacité de passage et de remplissage du BAP dans les milieux confinés et ferraillés. La figure 6.5 montre l'effet des fibres sur le rapport H_2/H_1 .

On remarque que l'addition des fibres FHy apporte une amélioration en termes de capacité de passage et de remplissage des BAP fibrés. On constate que les mélanges confectionnés avec 0 et 0.5% de FHy montrent un rapport H_2/H_1 supérieur à 80% ce qui est recommandé par l'EFNARC [119]. Cependant, au-delà de 0.5% de FHy, on ne peut pas observer de blocage total du béton, tandis que les mélanges conçus avec 0.5% ou plus de FM et FMR présentent des rapports de blocage inférieurs à 80% et même, parfois, un blocage total. Ces résultats peuvent être expliqués par la réduction du taux de fibres longues (50 mm) et aussi par l'absence d'oursins formés suite à l'enchevêtrement des FMR qui ont un faible élanement. Donc, l'élimination de ces facteurs peut contribuer à éviter le blocage au niveau des barres de la boîte en L.

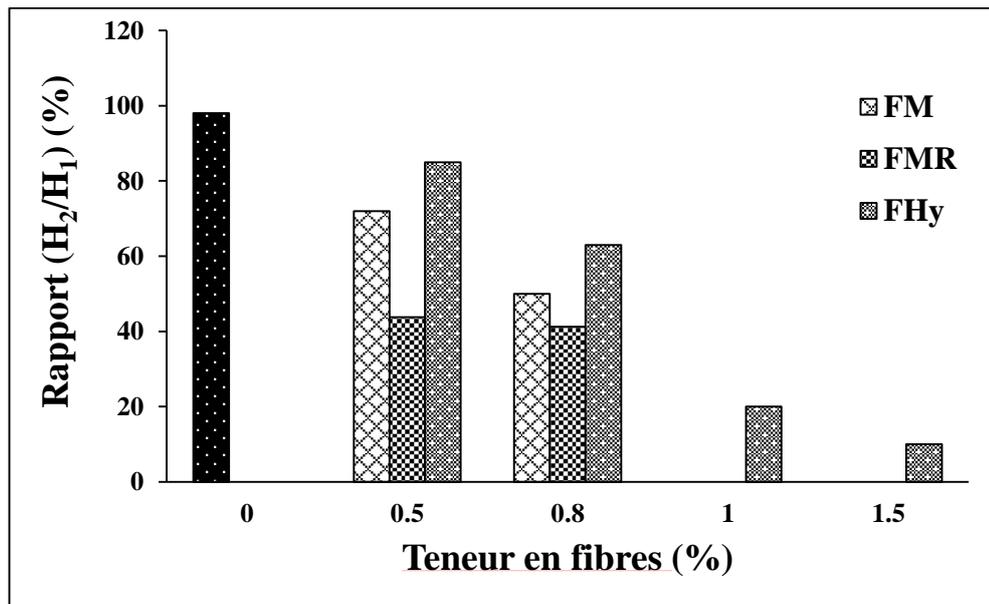


Figure 6. 5: Effet des fibres sur le rapport H_2/H_1 du BAP.

Des observations similaires ont été obtenues dans l'essai de J-ring par Tabatabaeian et al. [209] qui ont indiqué que la capacité de passage des BAP à haute résistance non fibrés est plus grande que celles des BAP fibrés avec une combinaison entre les FM et les fibres de polypropylène. En effet, les fibres d'acier ont généralement de grandes longueurs qui les empêchent de passer à travers l'anneau. Cependant, le remplacement partiel des FM par des fibres de polypropylène de faible longueur de 12 mm augmente la capacité de passage.

De plus, Rambo et al. [212] ont constaté que tous les mélanges du BAP renforcé par 1 % et 1.5% de FM ou FHy ont été bloqués lors du test à la boîte L avec trois barres. Cela est dû au faible espacement entre les barres, ce qui n'est pas courant dans les structures où de tels taux de renforcement (1.0% et 1.5%) ne sont pas utilisés. En outre, Malgorzata et al. [210] ont trouvé que l'utilisation des fibres hybrides (micro fibres droites + macro fibres ondulées) à 1% et 1.5% réduit le rapport de blocage à la boîte en L, mais les mélanges du BAP présentent un rapport supérieur à 0.8 donc il satisfait aux exigences de l'EFNARC [119]. Cependant, le rapport de blocage H_2/H_1 pour tous les mélanges, contenant 2% ou plus de 2% de fibres, est inférieur à 0.8, donc ils ne satisfont pas aux exigences du BAP.

6.3.5. Résistance à la ségrégation par tamisage

L'effet de la variation du taux d'incorporation des fibres sur la résistance à la ségrégation des BAP est illustré sur la figure 6.6. Le taux de ségrégation est calculé à partir de l'essai de stabilité au tamis.

On observe que l'augmentation du taux d'incorporation des fibres est traduite par une diminution du taux de ségrégation. Nous n'avons pas enregistré une amélioration en termes de résistance à la ségrégation des BAP fibrés avec les FHy par rapport aux BAP avec FM ou FMR. Ce test peut être n'est pas approprié pour évaluer la résistance à la ségrégation des BAP fibrés. Les fibres, en général, ont tendance à passer jusqu'à la partie inférieure du tamis à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment, à cause de leur densité élevée, procédant ainsi à la fermeture des ouvertures du tamis.

De même, Strauss et al. [188] ont mentionné qu'une hétérogénéité du BAP (accumulation de fibres et d'agrégats) a été observée dans le milieu de la galette d'étalement du mélange de BAP fibré avec 1.5% de FM et de FHy, suggérant la possibilité de ségrégation des matériaux constitutifs.

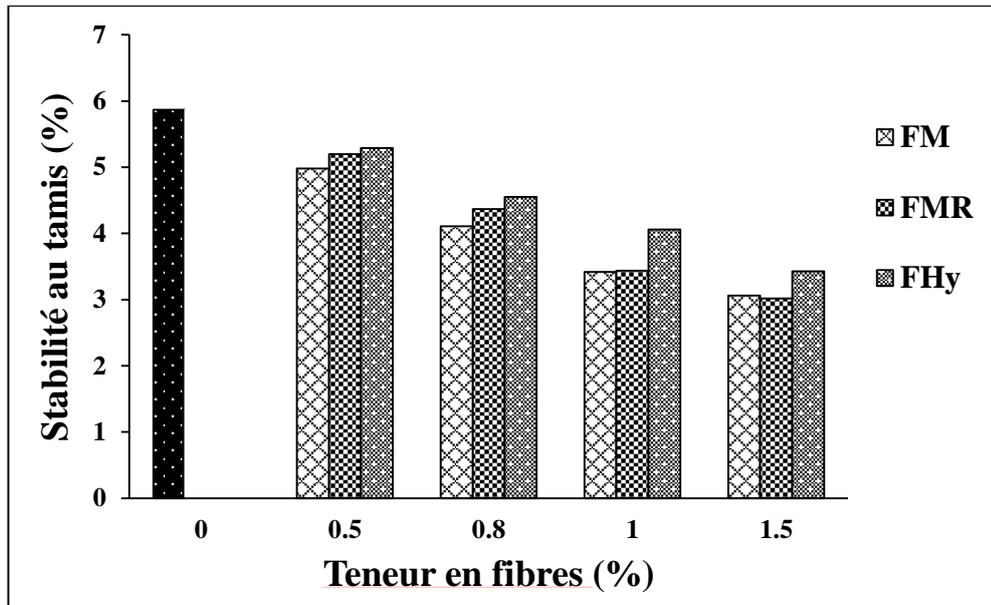


Figure 6. 6: Effet des fibres sur la résistance à la ségrégation par tamisage du BAP.

6.3.6. Effet du FHy sur la rhéologie des BAP

La contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule s'appelle le seuil de cisaillement. La viscosité plastique d'un liquide varie selon la nature des fluides. Les figures 6.7 et 6.8 illustrent la variation du seuil de cisaillement et la viscosité plastique du BAP en fonction du taux d'incorporation des fibres pour les différentes compositions des BAP étudiées.

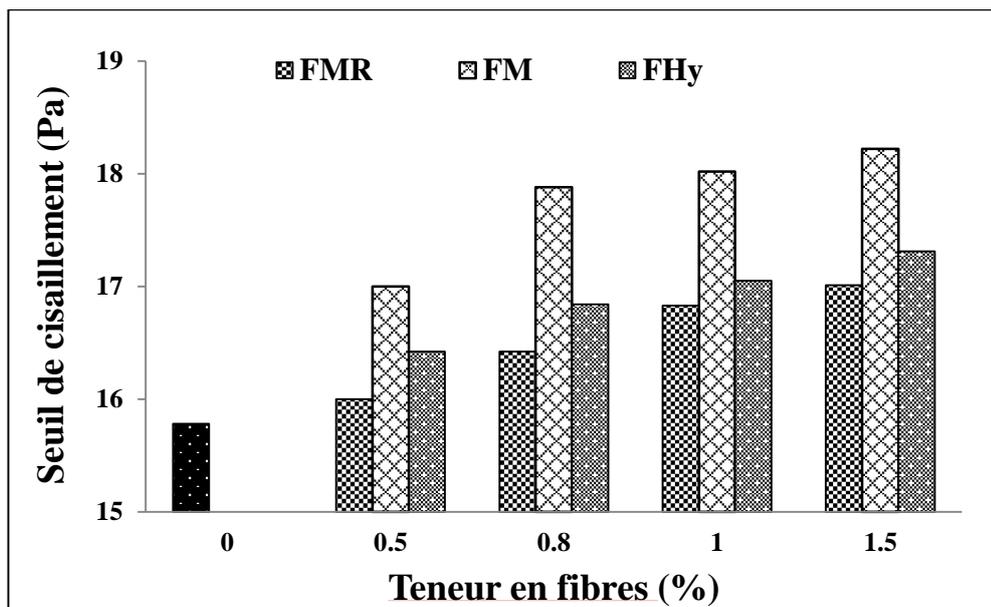


Figure 6. 7: Effet des fibres sur le seuil de cisaillement du BAP.

D'après la figure 6.7, on remarque que quelque soit le type de fibres utilisé le seuil de cisaillement augmente proportionnel avec l'augmentation du taux de fibres employé. Cependant, les résultats montrent que l'utilisation des FHy, en comparaison aux FM, aide à réduire le taux de cette augmentation, ce qui améliore la fluidité des BAP fibrés. L'augmentation du pourcentage de fibres de 0 à 1.5% est accompagnée d'une augmentation du seuil de cisaillement de 15.78 à 17.01 Pa, 18.22 Pa et 17.31 Pa pour les mélanges avec FMR, FM et FHy, respectivement. Cela est dû à la variété de la géométrie des FHy qui contiennent moins de fibres longues (50 mm), ce qui minimise et réduit le frottement entre les fibres et les autres ingrédients.

D'autre part, cet accroissement dans la teneur en fibres a également provoqué une augmentation dans la viscosité plastique des BAP fibrés. L'histogramme de la figure 6.8 montre que les valeurs de cette augmentation ont atteint 10.79, 11.09 et 10.67 (Pa.s) si le taux de fibres ajouté est respectivement de 1.5% FHy, FM et FMR, alors que le BAP témoin présente une valeur de l'ordre de 8.61 Pa.s. Par contre, en termes d'incorporation des FM de 35 mm de longueur dans la formulation du BAP, Strauss et al. [188] ont trouvé l'inverse. Ils ont indiqué que les mélanges fibrés avec une teneur en FM de 1% et 1.5% montrent une viscosité plastique et un seuil de cisaillement inférieur à ceux des BAP non fibrés. Par ailleurs, nos résultats sont conformes à ceux obtenus par ces auteurs en termes d'utilisation des fibres hybrides, c'est-à-dire que l'ajout de fibres d'acier droites de 12 mm provoque une augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement du BAP. Ce comportement est plus prononcé avec l'augmentation de la teneur en FHy de 1 à 1.5%.

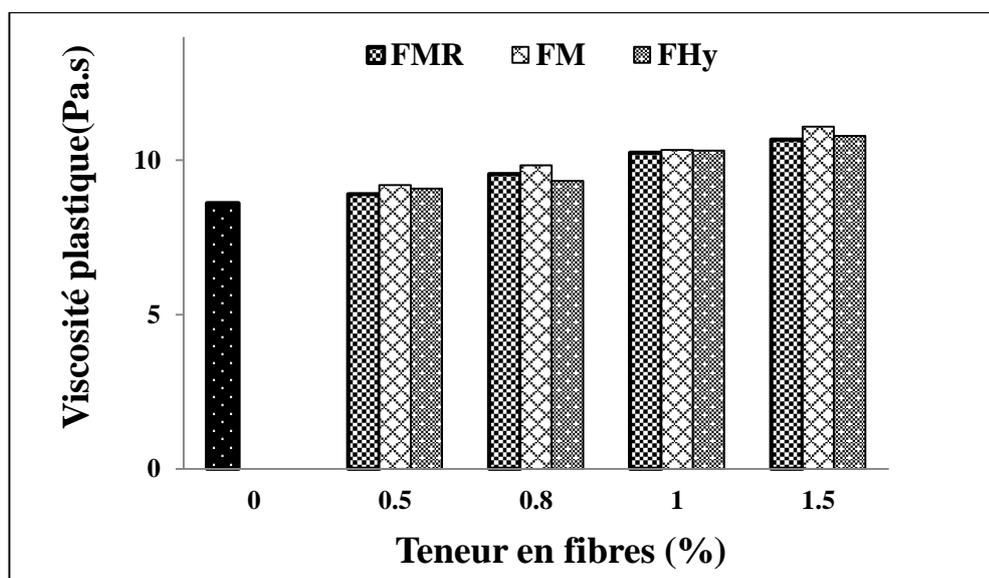


Figure 6. 8: Effet des fibres sur la viscosité plastique du BAP.

6.4. Effet du laitier sur les propriétés des BAP avec FHy à l'état frais

Dans cette partie nous allons présenter l'effet du laitier sur le comportement des BAP fibrés avec les FHy à l'état frais.

6.4.1. Etalement et Temps T_{50} au cône d'Abrams

Les figures 6.9 et 6.10 présentent respectivement la variation du diamètre d'étalement et du temps T_{50} du béton en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier, ainsi que les pourcentages des fibres FHy utilisées.

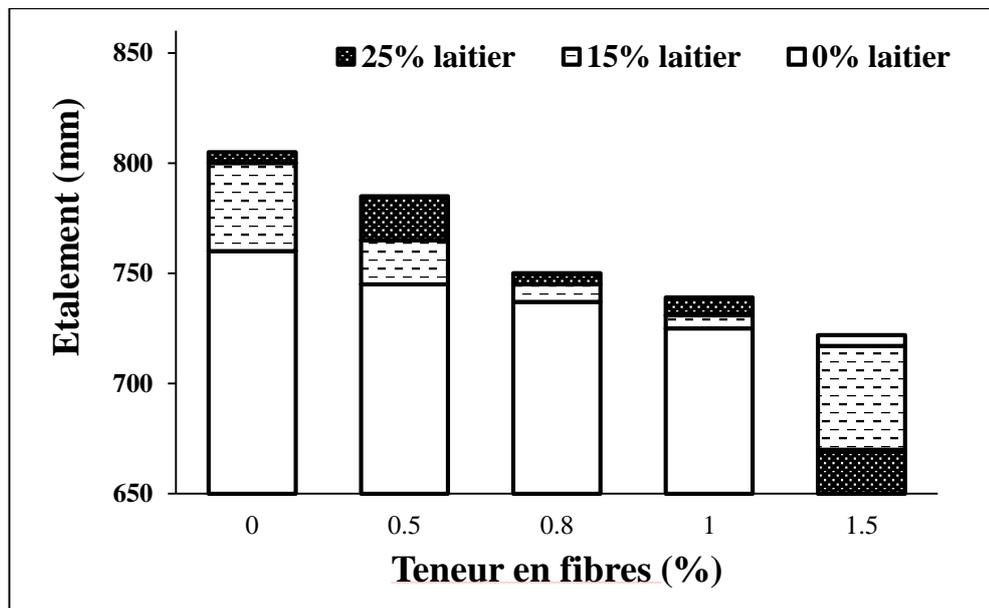


Figure 6. 9: Effet du laitier sur le diamètre d'étalement des BAP fibrés.

D'après la figure 6.9, on remarque que l'augmentation de la teneur en FHy provoque une diminution dans le diamètre d'étalement et ce point a été discuté dans la section précédente. En outre, dans la même figure on constate aussi que la substitution du ciment par le laitier améliore considérablement la fluidité du BAP pour les mélanges fibrés jusqu'à un taux de 1% FHy, par la même, nous notons que le taux de 25% de laitier donne la plus grande valeur d'étalement sans ségrégation ni ressuage, tout en restant dans la marge des valeurs correspondantes aux BAP. Mais on remarque un effet négatif du laitier pour les BAP fibrés avec 1.5% FHy. Pour 1% de FHy, le diamètre d'étalement varie respectivement de 725, 731 et 739 mm pour 0%, 15% et 25% de substitution du ciment par le laitier. Alors que pour 1,5% de FHy, les valeurs du diamètre d'étalement arrivent à 722, 717 et 670 mm pour un taux de substitution par le laitier de 0%, 15% et 25%, respectivement. La grande fluidité

obtenue avec 25% de laitier dans le mélange 1,5% FH_y cause un déplacement libre des fibres qui va provoquer un enchevêtrement facile entre elles, lequel traduit une accumulation des fibres au milieu de la galette et, par conséquent, un risque de ségrégation.

Les résultats du T₅₀ pour obtenir un étalement de 50 cm en fonction du pourcentage de fibres incorporé et du taux de substitution du ciment par le laitier sont illustrés dans la figure-6.10. On constate que l'évolution du temps T₅₀ est proportionnelle à l'augmentation du taux de fibres ajouté suite au grand frottement produit par le contact des fibres avec les autres composants. Cependant, la substitution du ciment par le laitier augmente la fluidité du BAP qui se traduit par une légère diminution dans le T₅₀. Pour 1,5% de FH_y, les valeurs de T₅₀ varient de 1.31s, 0.87s et 0.83s pour un taux de substitution de 0%, 15% et 25%, respectivement, et on remarque que le taux de substitution à 25% donne la plus faible valeur de T₅₀.

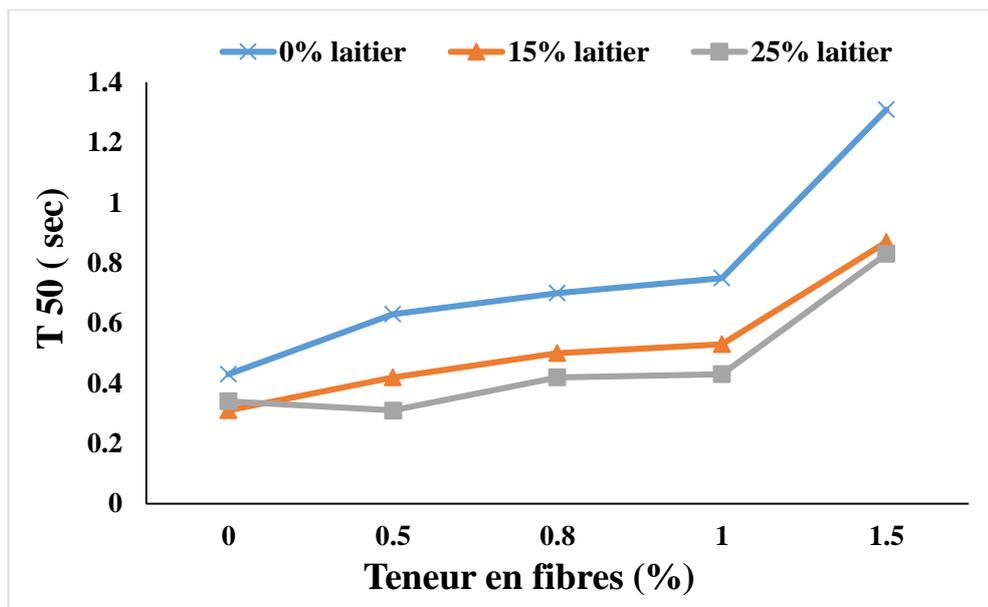


Figure 6. 10 : Effet du laitier sur le temps T₅₀ des BAP fibrés.

D'ailleurs, Aarre et Domone [213] ont mentionné que l'utilisation d'une teneur en laitier de 10 à 15% dans la fabrication du BAP conduit à des augmentations dans le diamètre d'étalement et dans le temps d'écoulement T₅₀ qui varient respectivement de 650 à 700 mm, et de 2 à 4 s. Le dosage optimal du laitier pour un bon BAP sans présence de ségrégation est de 15%. D'autre part, Wang et Lin [43] ont confirmé que la substitution du ciment par le laitier améliore les propriétés à l'état frais du BAP et que le pourcentage optimal de la substitution est de 15% de laitier.

Boukendakdji et al. [135] ont mentionné aussi une augmentation dans le diamètre d'étalement jusqu'à 20% de substitution du ciment par le laitier avec un optimum de 15%. Mais l'augmentation de la viscosité et le risque de ségrégation ont été enregistrés pour une teneur plus élevée en laitier.

6.4.2. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel

La capacité de remplissage du BAP dans les zones confinées a été évaluée par l'essai à l'entonnoir en V, elle donne une indication sur la viscosité du béton. Les résultats de variation du temps d'écoulement (T_{vf}) en fonction à la fois du pourcentage de fibres hybride (FHy) et du taux du laitier sont indiqués sur la figure 6.11.

Selon cette figure, on constate que tous les pourcentages de fibres employés provoquent une augmentation du temps d'écoulement (T_{vf}). Cette augmentation est de 2.2 s à 8.89 s pour les BAP à base de FHy (0 à 1.5%) et sans laitier, cela peut être expliqué non seulement par la friction des fibres entre elles, mais également par le blocage instantané au niveau de l'orifice de l'entonnoir causé par les FHy. Par ailleurs, la substitution du ciment par 15% et 25% de laitier aide à réduire le temps à l'entonnoir en v quelque soit la teneur en fibres (0, 15 et 25% de laitier) et répond aux recommandations puisque les temps à l'entonnoir en V est inférieur 12 secondes. On observe aussi que pour les mélanges renforcés par 1,5% FHy, le temps d'écoulement varie de 8.89 s à 7.12 s pour une augmentation du taux de substitution de 0 à 25 %, respectivement. Effectivement, le laitier contribue à diminuer la cohésion des bétons autoplaçants.

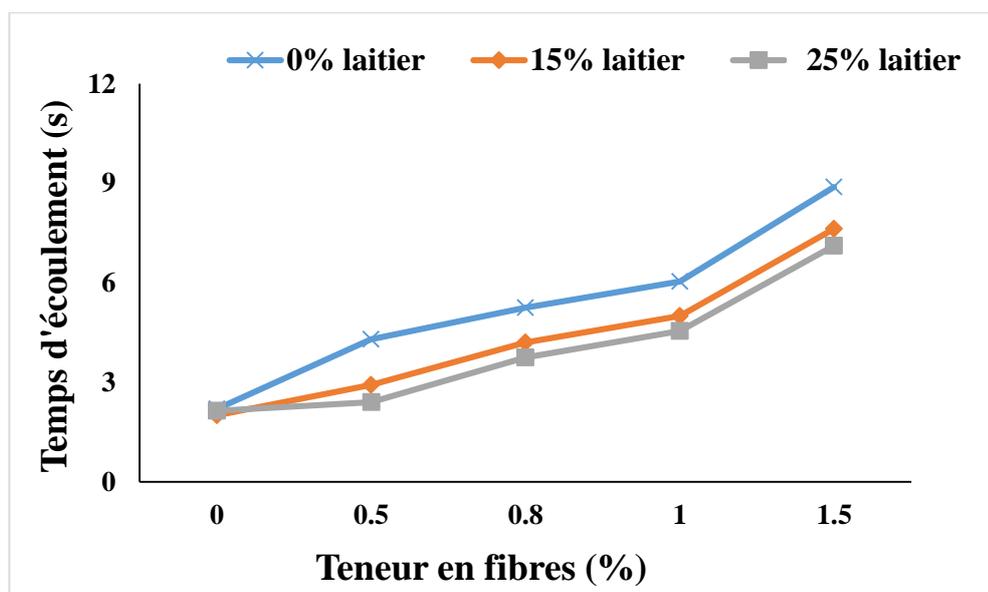


Figure 6. 11: Effet du laitier sur le TV-Funnel du BAP fibres.

Dans le cas des BAP sans fibres, des résultats similaires ont été mentionnés par Boukendakdji et al. [135] qui ont observé que l'incorporation du laitier donne un temps d'écoulement à l'entonnoir inférieur à celui des mélanges de référence jusqu'à 20% de substitution, mais le temps optimal est obtenu avec 15% de laitier.

Uysal et al. [214], quant à eux, ont examiné l'effet de la fumée de silice, de la poudre de marbre, du laitier de haut fourneau, du calcaire et de la poudre de basalte. Ils ont trouvé que les mélanges avec 20 et 40% de laitier présentent de bonnes viscosités et des résistances à la ségrégation. Cependant, le mélange avec 60% de laitier présente la viscosité et le temps d'écoulement à l'entonnoir les plus faibles par rapport aux autres mélanges. Les meilleures performances d'ouvrabilité ont été obtenues avec l'addition de la fumée de silice.

6.4.3. Mesures du rapport H_2/H_1 de l'essai L-Box

L'essai de la boîte en L (L-Box) exprime une bonne appréciation de la capacité de remplissage, et de passage. La figure 6.12 montre l'effet de l'incorporation des fibres (FHy) sur le rapport H_2/H_1 . On observe une diminution remarquable du rapport H_2/H_1 avec l'augmentation de l'incorporation du taux de FHy incorporées, ce rapport est inférieur à 80% pour les trois séries (0.8%, 1%, 1.5%), ce qui traduit un risque de blocage. Nous pouvons expliquer ce comportement par l'espacement entre les barres de la boîte en L qui est de 3.75 cm et par l'utilisation d'un type de fibres de 5 cm de longueur fibres industrielles (FM) qui vont combler le vide entre les barres et provoque forcément le blocage.

La figure 6.12 illustre également l'influence du laitier sur le rapport H_2/H_1 . On remarque que la substitution de 15% de ciment par le laitier conduit à une amélioration en termes de capacité de passage pour un taux de FHy inférieur à 0.8%. Cependant, pour un taux de 25% de laitier diminue le rapport H_2/H_1 par rapport au BAP sans laitier, par exemple pour une teneur en fibres de 0.8%, les valeurs du rapport de blocage sont de 63%, 70% et 50% pour un taux de substitution de 0%, 15% et 25% de laitier, respectivement. La substitution du laitier par du ciment aide à améliorer la suspension du BAP pour éviter la descente de la phase grossière du matériau (densité plus élevée des FHy) accompagnée par une remontée du mortier. Donc nous pouvons conclure, d'après cet essai, que le taux de 15% de laitier est l'optimum pour avoir une meilleure capacité de passage dans les zones ferraiillées.

De même, Gesoglu et al.[138] ont indiqué que l'utilisation des ajouts minéraux, tels que le laitier, la fumée de silice et les cendres volantes conduisent à une augmentation du rapport

H_2 / H_1 de la boîte L, ce qui permet d'améliorer la capacité de remplissage et de passage du BAP.

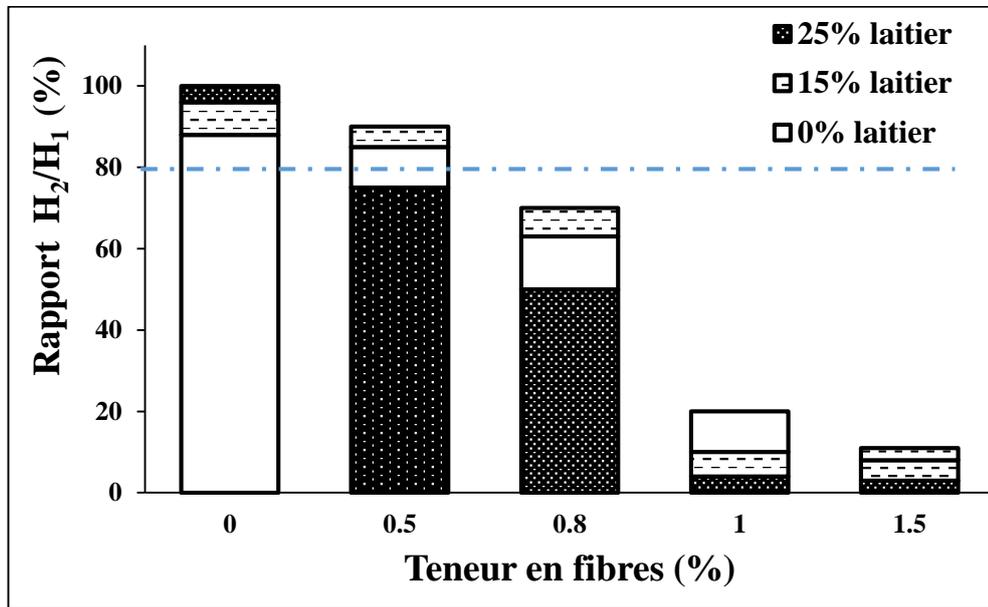


Figure 6. 12: Effet du laitier sur le rapport H_2/H_1 des BAP fibrés.

D'autre part, Uysal et al. [214] ont remarqué que le rapport H_2/H_1 augmente considérablement avec l'utilisation de laitier de haut fourneau. Donc, l'incorporation du laitier conduit à une capacité de remplissage et de passage adéquates.

6.4.4. Résistance à la ségrégation par tamisage

La figure 6.13 montre que l'augmentation du taux d'incorporation des FHy est traduite par la diminution du taux de ségrégation. Pour des taux d'incorporation de FHy de 0 % et 1.5 %, le pourcentage de la laitance est respectivement de 5.87 % et 3.43 %. Cette diminution se traduit aussi par la diminution du diamètre d'étalement.

On observe aussi que le pourcentage de laitance diminue considérablement en fonction de l'augmentation de la teneur en laitier. Ces résultats sont contradictoires à ceux de Boukendakdji [147] qui a constaté une croissance des pourcentages de laitance en fonction de l'augmentation de teneur en laitier, ce qui nous permet de conclure que la fluidité obtenue par l'utilisation du laitier facilite le passage des fibres vers la partie inférieure du tamis, entraînant le blocage au niveau des ouvertures du tamis.

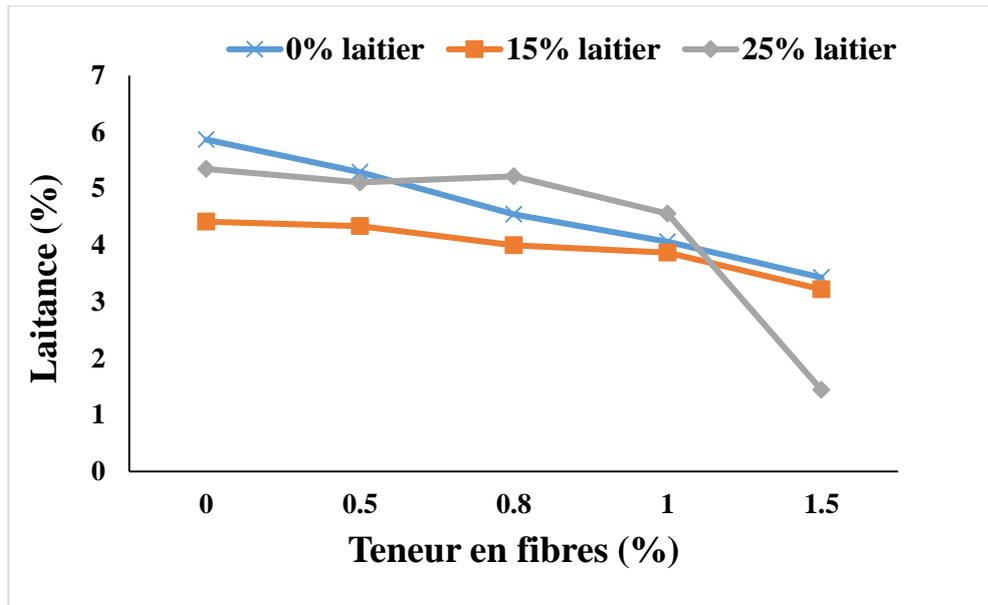


Figure 6. 13: Effet du laitier sur la résistance à la ségrégation par tamisage des BAP fibrés.

Yahiaoui et al. [215] ont aussi remarqué que la résistance à la ségrégation est satisfaisante avec 15% de laitier, tandis que l'addition de 20% et de 25% donnent du ressuage et de la ségrégation. En outre, Sideris et al. [216] ont rapporté que l'addition du laitier n'a pas affecté négativement la résistance à la ségrégation des mélanges du BAP. Ils ont également rapporté que l'utilisation de laitier comme charge contribue à l'obtention de mélanges de BAP plus visqueux.

6.4.5. Effet du laitier sur la rhéologie des BAP fibrés

Les résultats du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier dans les différents mélanges de BAP fibrés étudiés sont illustrés dans les figures 6.14 et 6.15, respectivement.

On constate, d'après les figures 6.14 et 6.15, que l'addition des FH_y augmente les deux paramètres rhéologiques du BAP, alors que le remplacement partiel du ciment par le laitier conduit à une réduction de ces paramètres. Selon la figure 6.14, on remarque, par exemple, que pour une teneur en FH_y de 1%, le seuil de cisaillement diminue de 17.05 Pa à 15.05 Pa et à 13.65 Pa pour un taux de substitution du ciment par le laitier de l'ordre de 0 15% et 25% respectivement. Yahiaoui et al. [215] ont abouti aux mêmes constatations dans les cas des BAP sans fibres, à savoir, que l'incorporation du laitier améliore l'ouvrabilité du BAP et conduit à la diminution du seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement baisse de 15.09

Pa à 10.37 Pa et 7.74 Pa pour un taux de substitution du ciment par le laitier varie de 0% à 15% et 25%, respectivement.

On peut conclure également, d'après la figure 6.15, que la viscosité plastique diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment. Pour un taux de FH_y de 1% elle diminue de 10.31 Pa.s pour un BAP de référence à 9.52 Pa.s et 8.86 Pa.s respectivement pour 15% et 25% de laitier. Cela est confirmé par Yahiaoui et al. [215] qui ont observé une décroissance de la viscosité de l'ordre de 29% et 45% correspondant à des dosages de substitution du ciment par le laitier de 15% et 25%, respectivement par rapport au béton autoplaçant de référence.

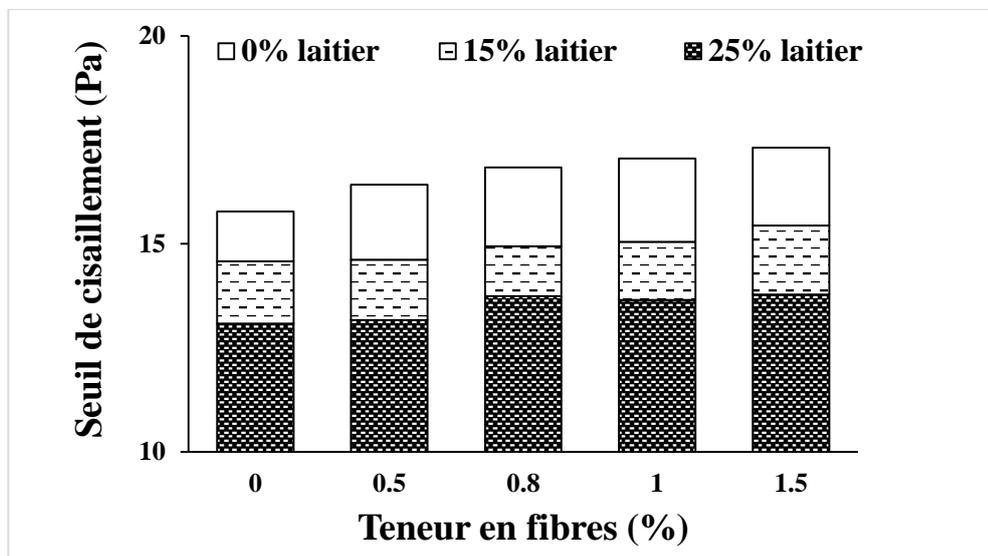


Figure 6. 14: Effet du laitier sur le seuil de cisaillement des BAP fibrés.

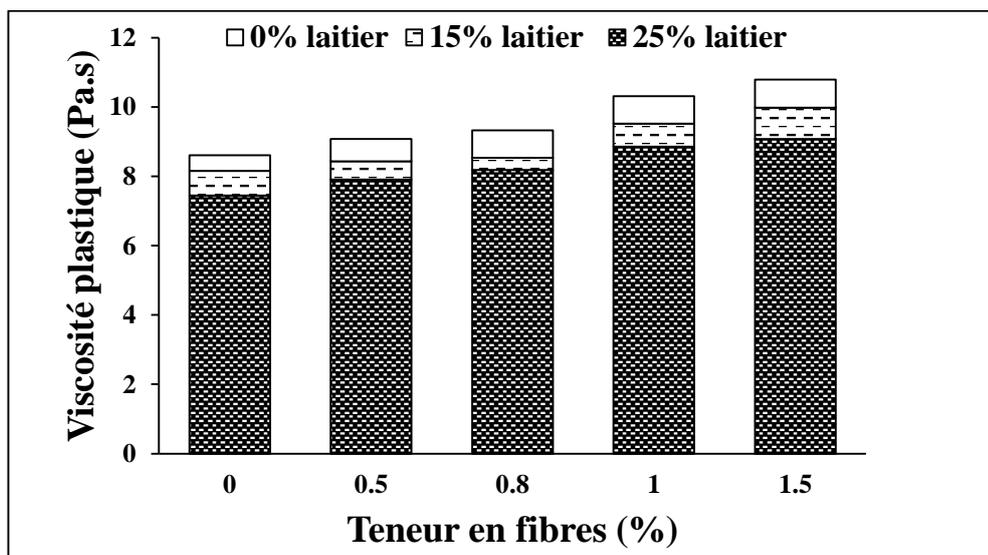


Figure 6. 15 : Effet du laitier sur le seuil de cisaillement des BAP fibrés.

6.5. Effet du laitier sur les propriétés mécaniques du BAP fibrés

6.5.1. La résistance à la compression

L'effet de la substitution du ciment par le laitier sur la résistance à la compression des BAP fibrés avec les FHy à 28 et 90 jours de cure sont illustré sur les figures 6.16 et 6.17, respectivement. La variation de la résistance à la compression des BAP fibrés avec laitier est comparée à celle du BAP de référence.

D'après les figures 6.16 et 6.17, on constate que l'ajout jusqu'à 1% de FHy apporte une augmentation de la résistance et de la rigidité. Par contre avec l'augmentation du volume des fibres à 1.5%, diminue la résistance en compression. D'un autre côté, on remarque sur la figure 6.16 que l'ajout de laitier au béton, conduit à une diminution de la résistance à 28 jours en fonction de la teneur en laitier. Pour 1% FHy les valeurs de la résistance sont de 51.7, 48.7 et 46.3 MPa pour les BAPs fibrés conçus respectivement à base de 0%, 15% et 25% de laitier. Par contre les résultats de la figure 6.17 montrent une amélioration de la résistance à 90 jours apportée par l'utilisation de 15% du laitier. Cela est dû à l'hydratation du laitier qui s'effectue à long terme lentement mais régulièrement. On constate aussi que l'augmentation de la teneur en laitier à 25% affecte la résistance à la compression par rapport au béton témoin. D'une manière générale, l'amélioration de la résistance a été observée avec l'utilisation des FHy avec un optimum de 15% de laitier.

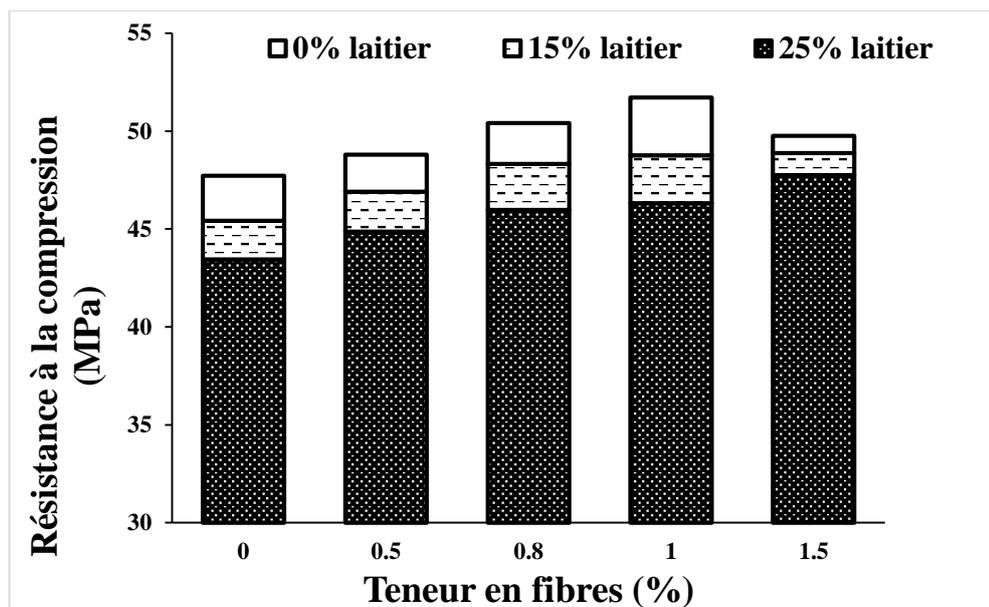


Figure 6. 16: Effet du laitier sur la résistance à la compression des BAP fibrés à 28 jours.

Boukendakdji [147] a trouvé que l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange du BAP provoque une chute de la résistance à la compression à 28 jours. Cette diminution arrive à 7.4%, 11%, 23.9% et 28.9% pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25% respectivement. Cependant, la chute de la résistance à la compression est moins importante à long terme. La diminution de la résistance à la compression à 90 jours est de l'ordre de 4.3 MPa pour 15% de laitier.

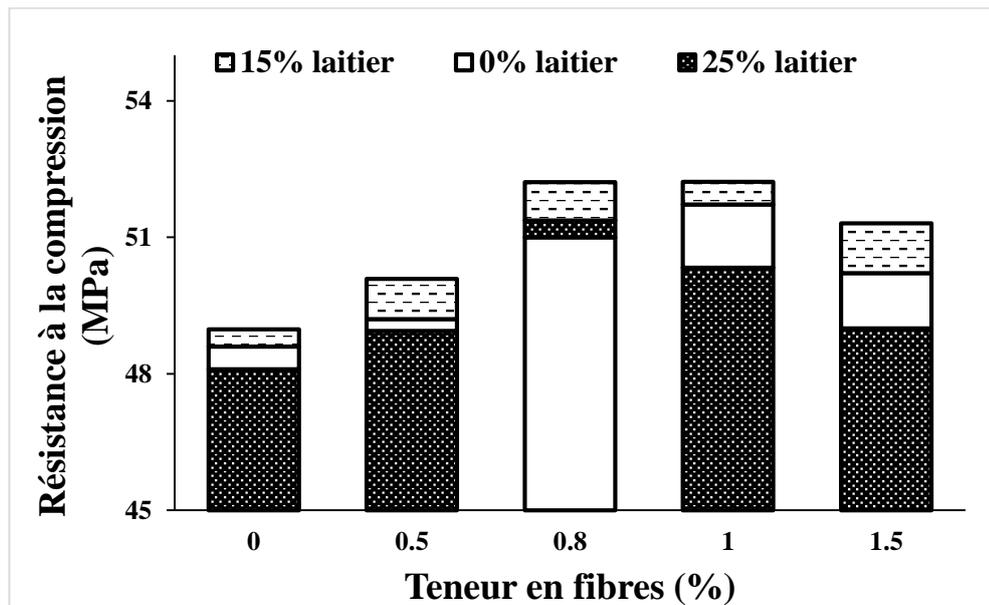


Figure 6. 17: Effet du laitier sur la résistance à la compression des BAP fibrés à 90 jours.

Selon Wang et Lin [43], la substitution de 15% de ciment par du laitier n'a pas d'influence sur la résistance à la compression du BAP au jeune âge (7 jours). Cependant, les mélanges conçus avec 15% de laitier présentent à long terme (90 jours) les valeurs les plus élevées de la résistance à la compression atteignant 13% par rapport au BAP témoin.

6.5.2. La résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion des BAP fibrés à base de laitier à 28 et 90 jours sont respectivement illustrés dans les figures 6.18 et 6.19. Nous remarquons, d'après la figure 6.18, que la résistance à la flexion augmente avec l'accroissement de la teneur en fibres FH_y. Mais, nous remarquons aussi une diminution de la résistance à 28 jours en fonction de la teneur en laitier de 0% à 25%, respectivement, pour le même dosage des FH_y, alors qu'à long terme (90 jours), la substitution du ciment par le laitier jusqu'à 25% offre un gain dans la résistance à la flexion pour les BAP fibrés jusqu'à 1%.

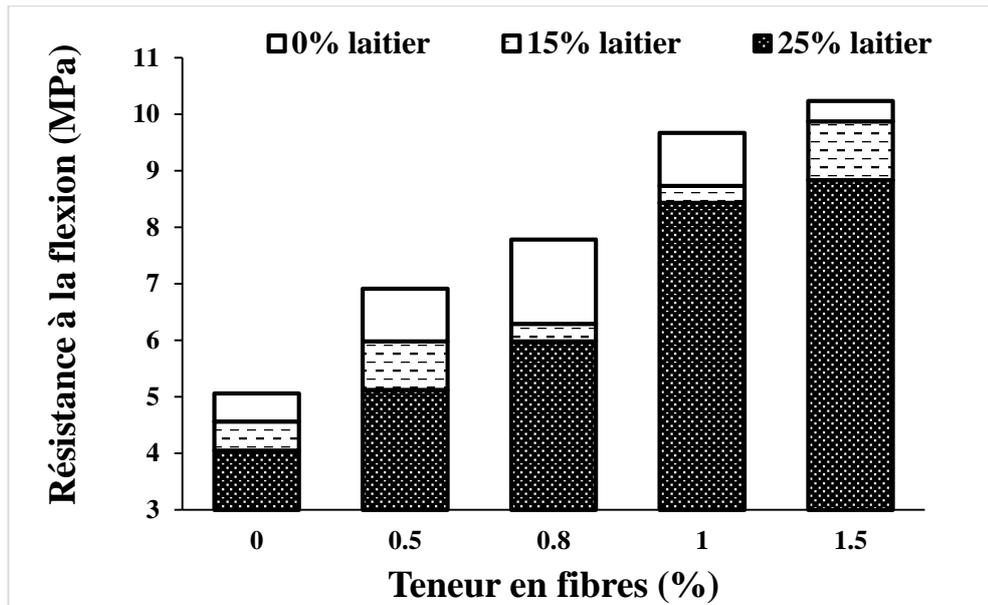


Figure 6. 18: Effet du laitier sur la résistance à la flexion des BAP fibrés à 28 jours.

Contrairement à nos résultats, Kaïkea et al. [204] ont constaté une augmentation de la résistance à la flexion du béton à haute résistance fibré avec 1% FM à 28 jours en substituant 20% de ciment par la fumée de silice ou par le laitier algérien. L'augmentation de la résistance maximale à la flexion était d'environ 53% et 49% dans les mélanges avec 20% de laitier et de fumée de silice respectivement, par rapport au béton témoin.

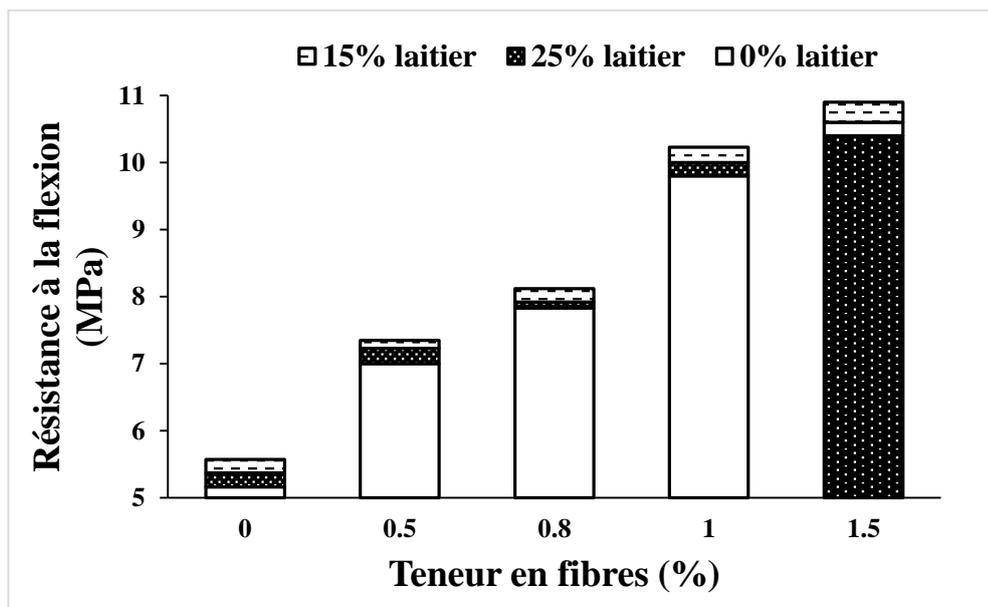


Figure 6. 19: Effet du laitier sur la résistance à la flexion des BAP fibrés à 90 jours.

6.6. Effet des FH_y sur les propriétés mécaniques du BAP

6.6.1. La résistance à la compression

La figure 6.20 montre l'effet du type de fibres sur la résistance à la compression des BAP à 28 jours. On remarque que l'addition de FH_y de 0 à 1,5% dans la formulation du BAP améliore considérablement la résistance par rapport aux mélanges préparés avec des FMR, mais elle reste toujours inférieure à celle obtenue avec l'incorporation de FM. La combinaison entre les fibres réduit la quantité des FMR qui causent la diminution de la résistance comme il est montré dans le chapitre précédent d'une part, et d'autre part la présence de certaines quantités de FM de fort élancement dans les FH_y augmentent la résistance à la compression par rapport aux FMR.

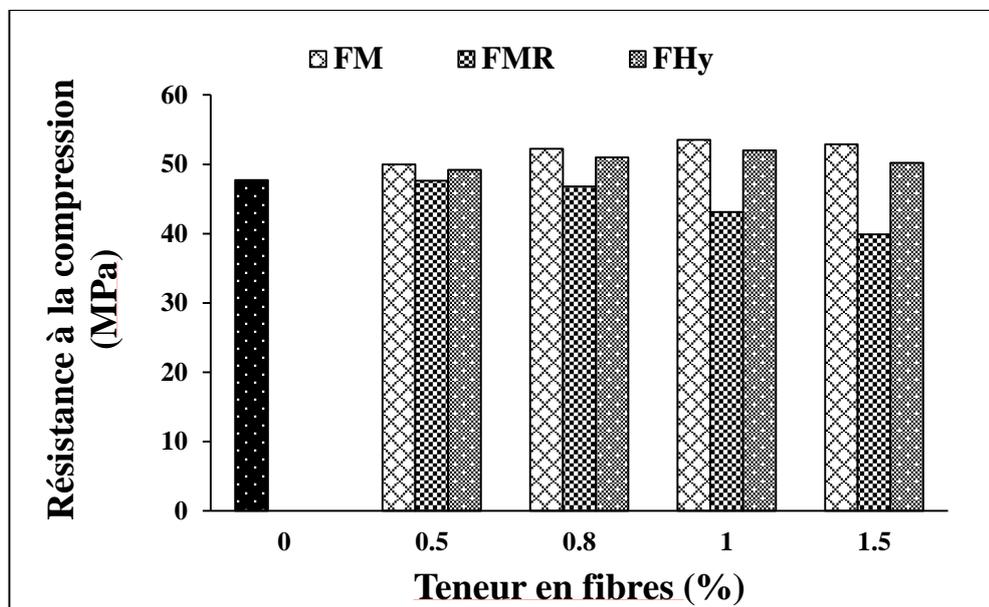


Figure 6. 20: Effet du type de fibres sur la résistance à la compression des BAP à 28 jours.

En termes de comparaison entre les FH_y et FM, Clifford et al ont abouti à la même constatation. Ils ont constaté qu'ils n'ont bénéficié d'aucun avantage en matière de résistance à la compression avec l'hybridation de fibres par rapport au BAP avec uniquement des FM. Cependant, la résistance à la compression est plus élevée dans le cas où des fibres FM à double extrémités crochues ont été employées.

Par contre Mastali et al. [217] ont trouvé que l'incorporation séparément de 1,5% de FM et de FMR provoque une augmentation de la résistance à la compression du BAP de 55 et 40%, respectivement, tandis que le remplacement systématique des FM par des fibres FMR

apporte des valeurs de résistance plus élevées que pour le BAP de référence, mais elles restent toujours inférieures de 15% environ à celles obtenues par l'ajout de FM et FMR. Cela pourrait être dû à la difficulté de compacter les mélanges contenant des quantités plus élevées de FMR.

Selon, Caggiano et al. [218], la présence de FHy influe positivement sur la résistance à la compression par rapport à l'incorporation de FM ou FMR séparément. On sait que, des quantités croissantes de FHy où les rapports d'élançement sont plus élevés peuvent améliorer la résistance à la compression du béton jusqu'à un certain seuil. Cette résistance dépend principalement des granulats et de la qualité de la matrice cimentaire. Cependant, une plus grande quantité de FHy, c'est-à-dire de ce seuil, pourrait avoir un effet défavorable sur la résistance à la compression, générant ainsi une perte de résistance. Ils ont mentionné que la présence des FHy entraîne une augmentation de la résistance à la compression entre 5% et 10% par rapport au béton témoin. En fait, le mélange de 30%FM et de 70%FMR constitue la seule exception à cette tendance générale, en effet, une légère réduction de la résistance de 5% environ a été observée. Cela peut être dû à la grande quantité de fibres caractérisant ce mélange (soit 1,25% volume).

De plus, Martinelli et al. [219], ont signalé qu'aucune différence significative n'a été observée en termes de résistance à la compression entre le béton renforcé par les FHy et le béton de référence. Cela signifie que la résistance à la compression des bétons fibrés est principalement contrôlée par les propriétés de la matrice cimentaire. Cependant, les fibres ne jouent de rôle que dans le régime de post-fissuration.

D'après Hu et al. [220], l'utilisation des fibres hybrides (combinaison entre les FMR et les FM ondulées de 60mm de longueur) présente la plus forte amélioration, de l'ordre de 20% dans la résistance à la compression. Cependant, cette amélioration est légère, de l'ordre de 6%, lorsque les FMR ou les FM sont utilisées séparément. Ils ont indiqué que l'addition des fibres peut emprisonner l'air et dégrader le compactage du béton, ce qui réduit sa résistance. Les fibres peuvent retarder la formation et la propagation de fissures ce qui va augmenter sa résistance.

6.6.2. La résistance à la flexion

La figure 6.21 montre l'effet de l'ajout des différents types de fibres d'acier de 0 à 1,5% en volume total du béton sur la résistance à la flexion du BAP. Comme le montre la figure 6.18, plus la quantité de fibres d'acier est importante et plus la résistance à la flexion est

grande. La résistance la plus grande est obtenue avec l'addition des FHy. L'augmentation de la teneur en fibres de 0 à 1.5% conduit à une augmentation de la résistance à la flexion de 5.06 à 7.9, 8.11 et 10,23 MPa pour les échantillons conçus avec FMR, FM et FHy respectivement. L'efficacité des fibres hybrides sur la résistance résulte de la distribution aléatoire des fibres de différentes géométries. Il est probable que les fibres de faible élanement empêchent la propagation des microfissures, et ce, avant leur transformation en macro-fissures, et celles de fort élanement contribuent à arrêter la propagation des macro-fissures et à transférer la localisation des fissures d'un endroit à l'autre. Par contre Mastali et al. [192] ont constaté l'inverse. L'addition de 1.5% de FM ou FMR augmente la résistance à la compression, tandis que la combinaison des deux fibres réduit cette augmentation qui reste quand-même supérieure à celle que le du BAP de référence.

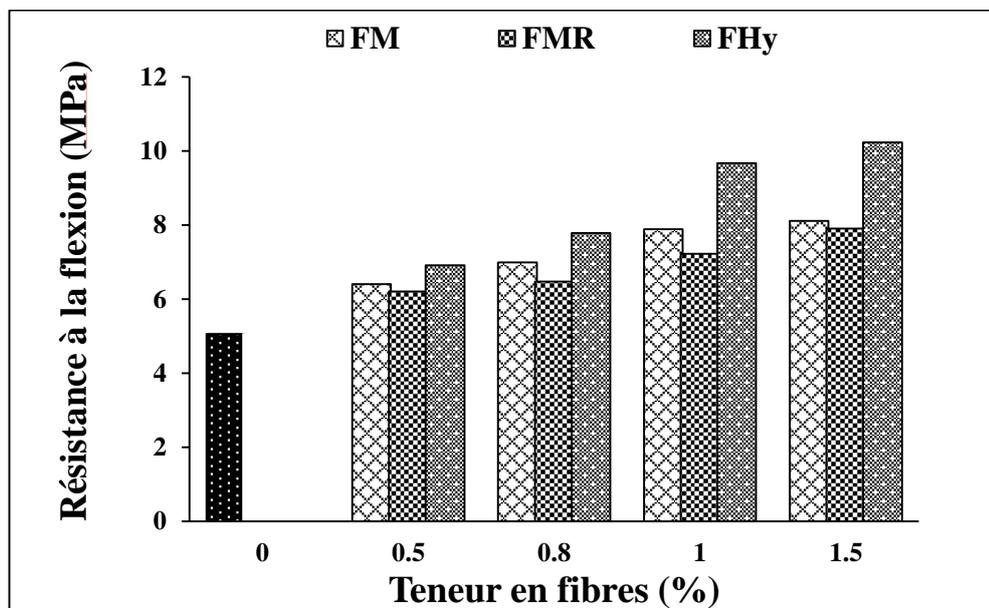


Figure 6. 21: Effet du type de fibres sur la résistance à la flexion du BAP à 28 jours.

En termes d'utilisation de FM, des résultats similaires ont été obtenus par Mastali et al. [217] qui ont constaté que la résistance à la flexion et la résistance résiduelle des éprouvettes renforcées par les fibres d'acier avaient augmenté de 25% à 40% par rapport au BAP témoin. Cette amélioration était régie par l'ancrage mécanique fourni par les fibres. La résistance à la flexion la plus élevée enregistrée est de l'ordre de 9 MPa pour l'échantillon avec 1.5% de FM. Le remplacement partiel des FM par des FMR a légèrement réduit la résistance à la flexion jusqu'à 8 MPa dans l'échantillon avec 1.5% de FMR. Cependant, cette réduction reste supérieure à celle obtenue dans le BAP de référence de 25% environ. Mais Hu et al.

[220] ont trouvé l'inverse. Aux mêmes doses en fibres, tous les mélanges avec les fibres hybrides (FM+FMR) ont présenté de meilleures performances en flexion par rapport aux mélanges avec FM uniquement.

Mohammadi et al. [208] ont trouvé qu'une combinaison entre deux FM de 50 et 25 mm donne une résistance à la flexion variant de 34% à 42%, 44% à 76% et 52% à 100% pour les mélanges de béton contenant des fractions de fibres de 1, 1.5 et 2%, respectivement. L'augmentation maximale de la résistance statique à la flexion de 100% a été observée pour le béton contenant 100% de fibres de 50 mm pour une fraction volumique de 2%.

Martinelli et al. [219] ont signalé que la réponse post-fissuration lors de l'essai de la flexion des éprouvettes renforcées uniquement par des FM était caractérisée par une ténacité importante due à l'action de pontage des fibres. Alors que le remplacement d'une quantité croissante de FM par une quantité égale de FMR montre un comportement après la fissuration caractérisé par une plage de ramollissement plus prononcée. Ceci s'explique par la moindre efficacité des fibres recyclées par rapport aux fibres industrielles. Les fibres recyclées ne sont pas droites, ne possèdent pas de crochets et ont des élancements plus bas.

6.6.3. Le retrait total

Afin d'illustrer l'impact des fibres hybrides sur le retrait total du BAP, nous avons montré dans la figure 6.22, la variation dimensionnel des échantillons des BAP fibrés de 0 à 1.5%. On constate une diminution du retrait total des BAP fibrés en fonction de l'augmentation de la teneur en fibres. L'utilisation de 1.5% de FHy provoque une diminution de l'ordre de 28.78% à l'âge de 180 jours par rapport au béton de référence.

Selon Choi et al.[221] le béton renforcé avec un seul type de fibre (micro fibres ou macro fibres de 12 et 30mm de longueur respectivement) présente un changement de longueur plus petit que celui du béton de référence. Le renfort en micro fibre fournit, en particulier, un effet plus remarquable sur le retrait de séchage du béton. Tandis que la variation de longueur est réduite de plus de 2 fois à tous les niveaux (0.2 et 0.3%) de renforcement par rapport au béton non renforcé lorsque les fibres hybrides sont adoptées.

D'un autre côté, Bywalski et al. [222] ont mentionné que l'augmentation de la teneur en fibres d'acier de 12mm de longueur et 0.2 mm de diamètre provoque une diminution dans la déformation due au retrait dès le premier jour. De plus, ils ont indiqué également que malgré l'augmentation du dosage en SP, qui va augmenter automatiquement le retrait libre du béton,

pour obtenir la même consistance, l'addition des fibres aide à contrôler et à diminuer le retrait libre du béton.

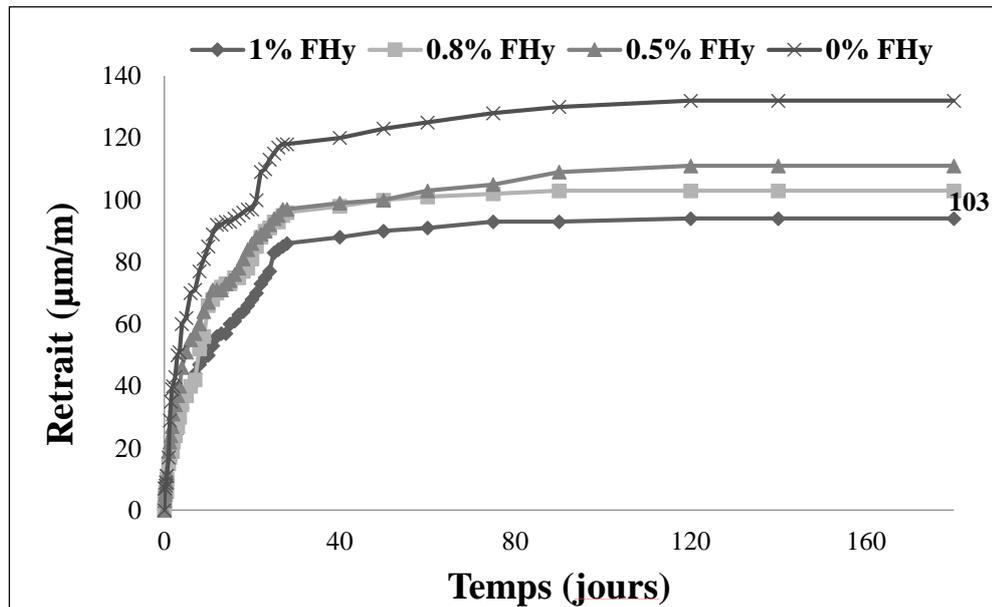


Figure 6. 22: Effet des FHy sur le retrait du BAP.

6.6.4. La perméabilité à l'eau

Les résultats de la profondeur de pénétration de l'eau des BAP fibrés avec différents types de fibres sont illustrés dans la figure 6.23. D'après l'histogramme de la figure 6.20, on constate que, quelque soit le type employé, l'incorporation des fibres dans la fabrication du BAP entraîne une augmentation de la profondeur de pénétration d'eau. Cela peut être dû à la porosité produite par les fibres à l'intérieur du béton. De plus, les fibres aident à augmenter la connectivité entre les pores à l'intérieur du béton ce qui va augmenter la profondeur de pénétration, et la valeur la plus faible étant celle obtenue par l'utilisation des FMR quelque soit le taux ajouté. Cela est probablement dû à la présence d'une certaine quantité de caoutchouc imperméable résiduel dans les FMR ce qui est considéré comme un obstacle pour la pénétration de l'eau à l'intérieur du BAP. Il convient de souligner que les fibres FHy ont montré des valeurs intéressantes par rapport aux fibres FM. Les augmentations étaient de l'ordre de 16.66, 31.48 et 25.92% lorsque 1.5% de FMR, FM et FHy ont été ajoutés respectivement.

D'autre part, Zhang et Li [125] ont mentionné une tendance à la diminution de la profondeur de la perméabilité à l'eau avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres. Lorsque la fraction de fibres de polypropylène augmente de 0% à 0.12%, la longueur de la

perméabilité à l'eau diminue de 20% à 8.7 mm et à 7 mm. Cela est attribué à un grand nombre de fibres de polypropylène qui se répartissent uniformément dans le composite de béton pour former une structure en grille qui exerce un effet de soutien sur le granulat et réduit le ressuage et la ségrégation du mélange de béton frais. Ainsi, les fibres de polypropylène réduisent le nombre de microfissures dans le béton qui peuvent être considérées comme des canaux d'infiltration d'eau dans le béton. Par conséquent, la perméabilité du béton à l'eau peut être améliorée avec l'ajout de fibres de polypropylène.

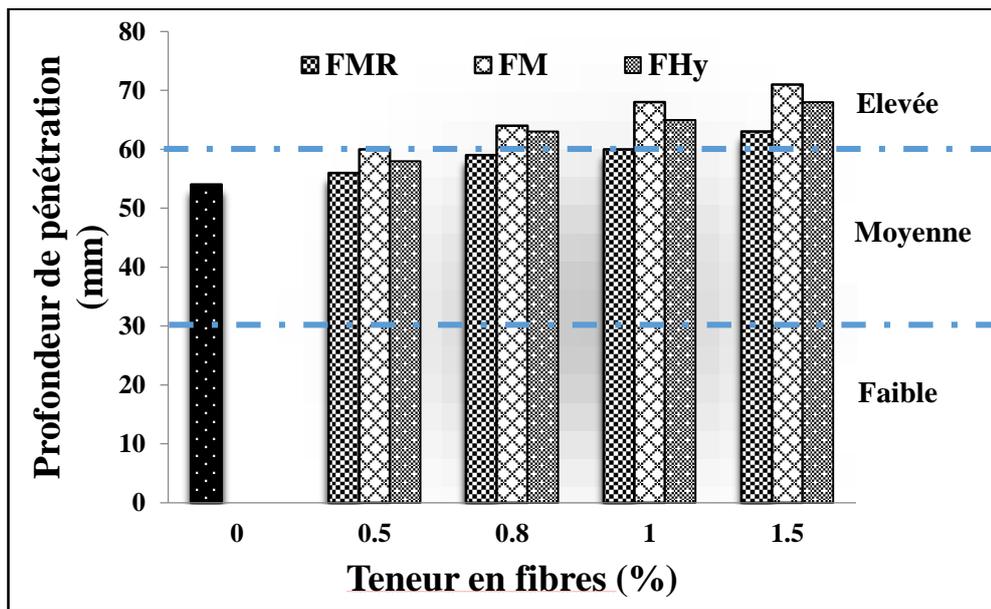


Figure 6. 23: Effet du type de fibres sur la perméabilité à l'eau du BAP.

6.6.5. Pénétration aux ions de chlorure

Les résultats de la perméabilité aux ions de chlorure sont illustrés dans la figure 6.24. Les résultats représentés sous forme d'histogramme indiquent que, quel que soit le type de fibres utilisé, la charge passante augmente proportionnellement en fonction de la teneur en fibres. Tous les mélanges présentent une perméabilité aux ions de chlorure moyenne selon la norme ASTM C1202. Cela est dû à la conductivité électrique des fibres en acier distribuées aléatoirement et à d'autres qui traversent l'échantillon longitudinalement. L'effet des FHy sur la charge passante est plus bas par rapport aux FM, ce qui peut être expliqué par la réduction de certain pourcentage de fibres qui ont une longueur de 50mm.

Ganesan et al. [223] ont indiqué le contraire. L'ajout de fibres n'a pas d'effet négatif sur la résistance aux chlorures et que la pénétrabilité aux ions de chlorure des bétons géo-

polymères fibrés était faible. De même, Corinaldesi et Moriconi [224] ont constaté que l'ajout de fibres d'acier droites de 11 mm de longueur réduit le taux de diffusion des ions de chlorure dans les échantillons du BAP. En raison de la très faible porosité de sa matrice cimentaire, le taux de diffusion des ions de chlorure est faible.

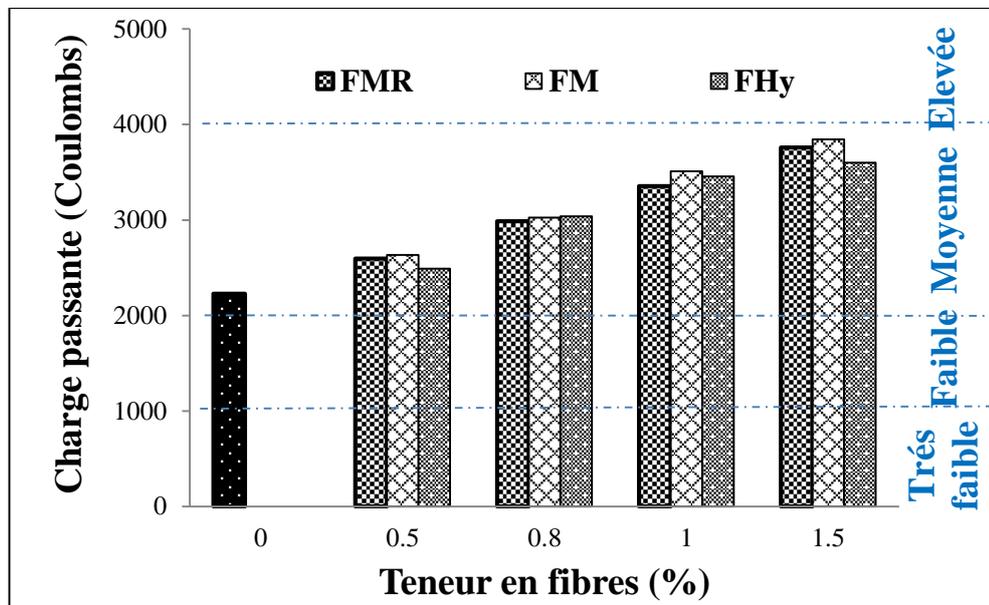


Figure 6. 24: Effet du type de fibres sur la perméabilité aux ions de chlorure du BAP.

Mais, El-Dieb [126] a confirmé nos résultats. Une augmentation de la charge totale passante avec l'augmentation de la fraction volumique de fibres d'acier dans le BAP a été enregistrée. Ce qui pourrait être attribué à la conductivité électrique des fibres. De plus, toutes les valeurs de perméabilité aux ions chlorure enregistrées indiquent une très faible perméabilité selon la classification ASTM C1202. Ils ont noté également que les valeurs de résistivité enregistrées pour tous les mélanges sont très élevées, et constitue, par conséquent, une très bonne protection des armatures en acier contre la corrosion.

6.6.6. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est due à l'action des capillaires. LA figure 6.25 montre les résultats de l'effet des FHy sur le taux d'absorption par capillarité pour les échantillons du BAP à l'âge de 180 jours. On remarque que l'addition de ce type de fibres augmente le degré d'absorption d'eau par l'action de capillarité. L'augmentation était de l'ordre de 7.84%, 11.76%, 12.74% et 14.7% lorsqu'une teneur en FHy de 0.5, 0.8, 1 et 1.5% a été utilisée respectivement. Il convient de noter que l'incorporation des FHy montre une augmentation

du taux d'absorption inférieure à celle obtenue avec des FM mais supérieure à celle obtenue avec les FMR.

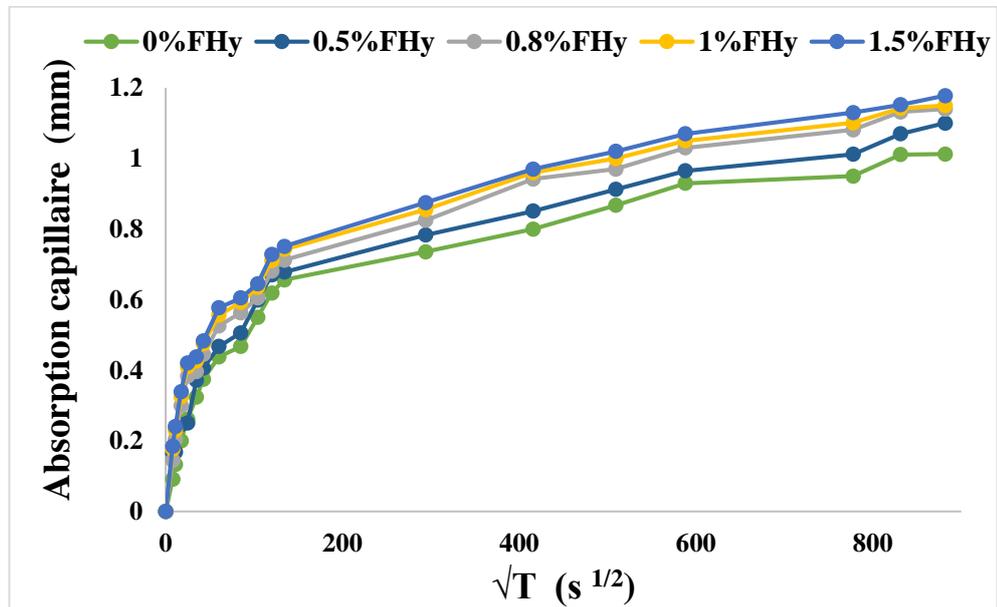


Figure 6. 25: Effet des FHv sur l'absorption capillaire du BAP.

Par contre, Afroughsabet et al. [225] ont montré que les bétons renforcés par des fibres en acier et des fibres polypropylène montrent une absorption capillaire inférieure à celle du béton témoin. De plus, une augmentation de la fraction volumique des fibres entraîne une diminution de l'absorption d'eau du béton, et que le plus faible taux d'absorption d'eau a été enregistré pour un mélange contenant 1.0% de fibres d'acier. En outre, l'addition d'un mélange de (0.7% FM + 0.3% polypropylène) réduit considérablement l'absorption d'eau.

Nili et Afroughsabet [226] ont également montré que l'addition de 0.5 et 1% de fibres d'acier FM de longueur de 60 mm réduit le taux d'absorption d'eau par capillarité. Les meilleures performances sont obtenues lorsque les fibres d'acier et la fumée de silice sont utilisées ensemble dans le béton. L'inclusion de 1.0% de fibres dans les échantillons conçu avec la fumée de silice a entraîné une diminution de l'absorption d'eau à 30 min et à 7 jours de 25% et 34%, respectivement.

6.7. Conclusion

Les résultats obtenus sur les BAP fibrés avec les fibres hybrides à base de laitier, révèlent que :

- L'addition des fibres hybrides (FHy) améliore les paramètres à l'état frais du BAP par rapport aux BAP fibrés avec FMR et FM.
- La substitution du ciment par le laitier améliore les paramètres rhéologiques des BAP fibrés avec un dosage optimal de 15% de laitier.
- L'ajout de fibres FHy réduit la maniabilité du BAP, malgré cela, elle reste meilleure par rapport aux ajouts de fibres FM et FMR.
- La résistance à la compression du BAP augmente proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de FHy, en raison de la présence d'un pourcentage de FM de fort élancement par rapport au FMR.
- Les fibres FHy améliorent considérablement la résistance à la flexion par rapport aux FM et FMR. En effet, l'action de pontage due aux fibres d'acier empêche la propagation des fissures, les FMR empêchant la propagation des microfissures alors que les et FM celle des macro-fissures.
- L'addition de fibres d'acier FHy dans la fabrication du BAP réduit de manière significative le retrait total par rapport aux FMR et FM, la distribution aléatoire des fibres de différentes géométries permettant de ralentir le mouvement du squelette du fait de l'évaporation de l'eau ou de l'évolution de la microstructure.
- Aucun effet considérable de l'utilisation des fibres FHy sur les propriétés de durabilité n'a été rapporté par rapport aux FMR et FM. Le coefficient d'absorption capillaire ainsi que la profondeur de pénétration d'eau augmente avec l'augmentation du taux de fibres incorporé dans le BAP,
- La diffusion des ions de chlorure du BAP avec FHy reste toujours dans la catégorie perméabilité moyenne aux ions de chlorure en raison de la conductivité électrique des fibres.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de la présente étude était la possibilité de valoriser les déchets d'origine pneumatique dans la fabrication du béton autoplaçant, ainsi que d'approfondir les connaissances du comportement des bétons autoplaçants à base de caoutchouc et de fibres d'acier à l'état frais et à l'état durci.

L'étude a porté sur des voies pour examiner l'influence du caoutchouc comme substituant partiel du sable naturel sur les performances du BAP et de renforcer les BAP par des fibres d'acier de différentes natures. L'utilisation de fibres d'acier recyclées (FMR) et de fibres d'acier industrielles (FM) a été envisagée afin de comparer l'effet de la nature des fibres sur le comportement du BAP. Nous avons étudié l'influence de chacune des natures des fibres, en faisant varier leur fraction volumique pour différentes formulations du BAP. Puis l'influence des deux types de fibres (FHy) sur les performances du BAP à base de laitier a été envisagée pour une seule combinaison de fraction volumique (50% de chaque type). Des bétons autoplaçants, et d'autres contenant des grains de caoutchouc, des fibres recyclées, des fibres d'acier industrielles et un mélange de fibres recyclées et industriel ont été confectionnés. Le dosage en superplastifiant de 1% du poids de ciment et le rapport S/M à 0.5 et E/L=0.422 ont été fixés dans le but d'observer l'effet réel du caoutchouc et les fibres sur les performances du BAP. Les propriétés rhéologiques telles que la teneur en air, la densité à l'état frais, le diamètre d'étalement, le temps T50, le temps à l'entonnoir en v, le rapport de blocage, la résistance à la ségrégation, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement ont été analysées. Les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et à la flexion, et les propriétés physiques telles que le retrait et la conductivité thermique ont été évaluées. De plus, les propriétés de la durabilité c'est-à-dire la perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire et la diffusion des ions chlorure ont été également étudiées. L'étude expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le dosage nécessaire pour la formulation du BAP a été optimisé sur des essais sur mortier et évalué par l'essai de mini cône et celui de V-funnel. Le dosage optimal est de 1% du poids de ciment.
- La quantité de l'air occlus augmente avec la substitution partielle du sable par des granulats en caoutchouc en raison de son potentiel de piéger l'air à leur surface. De plus, la densité du caoutchouc qui est plus faible permet de produire un matériau plus léger, ce qui est avantageux pour les structures de bâtiments.

- L'incorporation du caoutchouc dans le béton réduit sa capacité de remplissage et de passage. En revanche, elle crée une cohésion apparente qui contribue à améliorer la résistance à la ségrégation. Si le taux de substitution du sable par le caoutchouc est limité à 15%, les exigences des directives européennes relatives à l'ouvrabilité sont satisfaites.
- Une chute dans les résistances à la compression et à la flexion a été observée avec l'inclusion du caoutchouc. Cette dernière augmente aussi le retrait total des mélanges de BAP. Ce comportement est dû au faible module d'élasticité du caoutchouc et à la réduction de la quantité de matériau solide.
- L'incorporation du caoutchouc réduit considérablement la conductivité thermique, en raison de sa structure amorphe et sa faible conductivité thermique qui est de l'ordre de 0,4 W/m.°C en comparaison à celle des granulats naturels qui présentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à 1,5 W/m.°C. Donc, le caoutchouc pourrait être utile pour l'isolation par temps chaud dans les panneaux de façade des bâtiments.
- L'absorption capillaire de l'eau et la pénétration de l'eau dans les mélanges de BAP diminue proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, ce qui améliore la durabilité des structures à base de BAP caoutchouteux.
- L'ajout de fibres d'acier FMR ou FM réduit l'ouvrabilité du BAP. Le pourcentage de fibres ajoutées est corrélé négativement à la maniabilité du béton et entraîne, par conséquent, une augmentation de la viscosité, une diminution de la fluidité et un blocage possible, mais il augmente la résistance à la ségrégation. Cependant, l'incorporation de fibres FH_y à la formulation du BAP améliore considérablement l'ouvrabilité du BAP par rapport aux fibres FM et FMR. Jusqu'à un taux de 0,8% de FH_y, les exigences des directives européennes relatives à l'ouvrabilité du BAP sont satisfaites.
- La substitution du ciment par le laitier améliore plus les paramètres rhéologiques du BAP contenant les fibres FH_y ; 15% de laitier constitue le dosage optimal.
- La résistance à la compression du BAP avec les fibres recyclées diminue avec l'augmentation du pourcentage de FMR en raison de la présence d'une partie de particules de caoutchouc à la surface des fibres qui constituent des zones faibles dans le béton. Mais les fibres d'acier FM améliorent la résistance à la compression et la présence des FH_y augmente la résistance à la compression du BAP, en raison de la présence d'un certain pourcentage de FM ayant un élancement élevé par rapport aux FMR.
- La substitution partielle du ciment par 15 et 25% de laitier conduit à une réduction dans les propriétés mécaniques des BAP fibrés à 28 jours. Toutefois, l'effet pouzzolanique du

laitier à long terme c'est-à-dire 90 jours aide les mélanges du BAP à base de laitier à rattraper la chute de la résistance observée à 28 jours.

- La présence de fibres d'acier améliore la résistance à la flexion quelque soit leurs natures du fait de l'action de pontage de la fibre d'acier qui empêche les fissures de s'ouvrir plus. Cependant, les fibres FH_y améliorent plus la résistance à la flexion, en raison de l'effet combiné des FMR et des FM qui est d'empêcher la propagation des microfissures et des macro-fissures.
- Quelque soit la nature des fibres, l'addition de fibres d'acier au BAP réduit le retrait total, le rôle de fibres étant de ralentir le mouvement du squelette du fait de l'évaporation de l'eau ou de l'évolution de la microstructure. La réduction du retrait total est plus importante en cas d'utilisation des fibres FH_y par rapport à l'utilisation des FMR et FM. Cela est dû à la distribution aléatoire des fibres de différentes géométries qui permettent d'empêcher le glissement de la matrice grâce à la résistance au frottement.
- Le coefficient d'absorption capillaire, la profondeur de pénétration d'eau augmentent en fonction du taux de fibres incorporé dans le BAP, en raison de la connectivité entre les pores et des micro-canaux engendrés par les fibres. Ces derniers facilitent la pénétration d'eau à l'intérieur du béton. La conductivité électrique des fibres, quant à elle, permet d'augmenter la diffusion des ions de chlorure dans les BAP.

Recommandations et perspectives

À travers cette étude, nous avons mis en lumière l'influence des déchets d'origine pneumatique sur certaines propriétés du BAP. L'influence des fibres recyclées a été comparée à celle des fibres industrielles. Cette étude peut être complétée par d'autres investigations :

- Des observations microscopiques seraient utiles pour mieux étayer nos propositions sur la faible adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment, ainsi que sur la connectivité des pores entre eux sous l'effet des fibres.
- Des essais phonique et thermique seraient utiles pour mettre en évidence la capacité du caoutchouc à amortir les ondes phoniques et à réduire le transfert de la chaleur à travers un BAP caoutchouté.
- L'effet des ajouts cimentaires pour améliorer les propriétés rhéologiques du BAP caoutchouteux reste à étudier.
- Des essais complémentaires sur le module d'élasticité, la résistance aux chocs et la résistance résiduelle dans la phase de post-fissuration en flexion des BAP fibrés restent à réaliser.

RÉFÉRENCES

- [1] Rubber Manufacturer's Association, USA; 2014.
- [2] International Rubber Study Group 2015.
- [3] Abraham, E., Cherian, B.M., Elbi, P.A., Pothan, L.A. and Thomas, S., "Recent advances in the recycling of rubber waste. Recent Developments in Polymer Recycling", Transworld Research Network, Kerala, India, (2011), 47-100.
- [4] Trouzine, H., Asrouna, A., Asrouna, N., Belabdelouhab, F. and Longd, N.T, "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie", *Nature & Technologie Problématique*, (2011), 28–35.
- [5] Batayneh, M.K., Marie, I. and Asi, I, "Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries", *Waste Manag*, V. 28, (2008), 2171–2176.
- [6] Siddique, R. and Naik, T.R., "Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview". *Waste management (New York, N.Y.)*, V. 24(6), (2004), 563–9.
- [7] Faten, S., "Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : Application au recyclage des déchets pneumatiques", Thèse de doctorat. Université du Maine., (2010).
- [8] Aliapure, *Le taux résiduel de fils métalliques dans les granulats*, 2010.
- [9] Meddah, A., "Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques", Thèse de Doctorat en Sciences, École Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2015.
- [10] Ademe, *Bilan du Recyclage 2001 - 2010 volume 2 : Filières Matériaux et Filières REP Rapport Final*, (2012).
- [11] De Brito, J. and Saikia, N., "Recycled Aggregate in Concrete". In *Green Energy and Technology*. London: Springer London, (2013).
- [12] Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, M., Justyna, Janik, H. and Balas, A., "Progress in used tyres management in the European Union: a review", *Waste management (New York, N.Y.)*, V. 32, (2012), 1742–51.
- [13] Garrick, G.M., "Analysis and Testing of Waste Tire Fiber Modified Concrete", Master Thesis, Louisiana State University, USA, (2005).
- [14] Oikonomou, N. and Mavridou, S., "The use of waste tyre rubber in civil engineering works", WoodHead Publishing Limited, (2009), 213-238.
- [15] L'Association Nationale pour la Formation Automobile (ANFA), *Le Commerce et La Réparation Des Pneumatiques, PORTRAIT SECTORIEL : N. 72*, (Avril 2018).
- [16] Flores-Medina, D., Flores Medina, N. and Hernández-Olivares, F., "Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from

- crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes”, *Materials and Structures*, V. 47, (2013), 1185–1193.
- [17] Edeskär, T., “Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications Technical and Environmental Properties”, Phd Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, (2006).
- [18] Torgal, F.P., Shasavandi, A. and Jalali, S., “Tyre rubber wastes based concrete : a review”, *First International Conference of WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, Portugal, (2011).
- [19] Khatib, Z.K. and Bayomy, F.M., “Rubberized Portland Cement Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 11(3), (1999), 206–213.
- [20] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Felieu, M., and Hernandez, M., “Influence of Scrap Rubber Addition to Portland I Concrete Composites: Destructive and Non Destructive Testing”, *Composite Structures*, V. 71(3-4), (2005), 439–446.
- [21] Khaloo, A.R., Dehestani, M. and Rahmatabadi, P., “Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire – rubber particles”, *Waste Management*, V. 28(12), (2008), 2472–2482.
- [22] Elchalakani, M., “High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers”, *Structures*, V. 1, (2015), 20–38.
- [23] Holmes, N., Browne, A., Montague, C., “Acoustic properties of concrete panel with crumb rubber as a fine aggregate replacement”, *Construction and Building Materials*, V. 73, (2014), 195–204.
- [24] Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özturan, T., “Properties of rubberized concretes containing silica fume”, *Cement and Concrete Research*, V. 34(12), (2004), 2309–2317.
- [25] Youssf, O., El Gawady, Ma., Mills, J.E., and MaX ., “An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes”, *Construction and Building Materials*, V. 53, (2014), 522–532.
- [26] Boudaoud, Z. and Beddar, M., “Effects of Recycled Tires Rubber Aggregates on the Characteristics of Cement Concrete”, *Open Journal of Civil Engineering*, V. 02(04), (2012), 193–197.
- [27] Aiello, Ma., Leuzzi, F., “Waste tyre rubberized concrete :Properties at fresh and hardened state”, *Waste Manag*, V. 30, (2010), 1696–704.
- [28] Gesoglu, M., Güneyisi, E., “Permeability properties of self-compacting rubberized concretes”, *Construction and Building Materials*, V. 25, (2011), 3319–3326.
- [29] Erdogan, Ö., Khandaker, M., A. Hossain, Mohamed Lachemi, and Cengiz D. Atis “Fresh, Mechanical, Transport, and Durability Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete”, *ACI Materials Journal*, V. 109, No. 4, July-August (2012).

- [30] Garros, M., “Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation”, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, (2007).
- [31] Bignozzi, MC., Sandrolini., “Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete”, *Cem. Concr. Res.* 36, (2006), 735–739.
- [32] Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A.P., “Flexural fatigue behavior of self-compacting rubberized concrete”, *Construction and Building Materials*, 44, (2013), 7–14.
- [33] Rahman, M.M., Usman, M., Al-Ghalib, A.A., “Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC)”, *Construction and Building Materials*, V. 36, (2012), 630–637.
- [34] ACI-213R-14, “Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete”, (2014).
- [35] Kaloush, K., Way, G., Zhu, H., “Properties of Crumb Rubber Concrete”, *Transportation Research Board*, 1914 (2005) 8–14.
- [36] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M., “Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes”, *Cem. Concr. Compos.*, V. 29, (2007), 732–740.
- [37] Turatsinze, A. and Garros, M., “On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates”, *Resour. Conserv. Recycl.*, V. 52, (2008), 1209–1215.
- [38] Fedroff, D., Ahmad, S., and Savas B. Z., “Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber”, *Transportation Research Board*, 1532, (1996), 66-72.
- [39] Eldin, N.N., Senouci, A.B., “Rubber-tire particles as concrete aggregate”, *J. Mater. Civ. Eng.*, V. 5, (1993), 478–496.
- [40] Thomas, B.S., Gupta, R.C., “A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, V. 54, (2016), 1323–1333.
- [41] Topçu. I.B, “The properties of rubberized concretes”, *Cem. Concr. Res.*, V. 25, (1995), 304–310.
- [42] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A., “Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete”, *Constr. Build. Mater.*, V. 23, (2009), 1828–1836.
- [43] Wang, H., Lin, C., “A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC)”, *Constr. Build. Mater.*, V. 42, (2013), 132–136.
- [44] Su, H., Yang, J., Ling, T.C., Ghataora, G.S. and Dirar, S., “Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes”, *J. Clean. Prod.*, V. 91, (2015) 288–296.
- [45] Oikonomou, N., Mavridou, S., “Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires”, *Cem. Concr. Compos.* V. 31, (2009), 403–407.

- [46] Najim, K.B., Hall, M.R., “Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete”, *Constr. Build. Mater.* V. 27, (2012), 521–530.
- [47] Segre, N., Joekes, I., “Use of tire rubber particles as addition to cement paste”, *Cem. Concr. Res.*, V. 30, (2000), 1421–1425.
- [48] Xi Y., Li Y., Xie Z., and Lee J.S, “Utilization of Solid Wastes (Waste Glass and Rubber Particles) As Aggregates in Concrete”, *Proc. of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, May 20-21, (2004), 45-54.
- [49] Lee, HS., Lee, H., Moon, JS. and Jung, HW., “*Development of tire-added latex concrete*”, *ACI Mater J*, V. 95, (4), 1998.
- [50] Colom, X., Cañavate, J., Carrillo, F., Velasco, JI., Pagès, P., Mujal, R., “Structural and mechanical studies on modified reused tyres composites”, *Eur Polym J*, V. 42(10), (2006), 2369–78.
- [51] Turatsinze, A., Bonnet, S. and Granju, J.L., “Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance”, *Constr. Build. Mater.*, V. 21, (2005), 176–181.
- [52] Sukontasukkul, P. and Chaikaew, C., “Properties of concrete pedestrian block mixed with crum rubber”, *Construction and Building Materials*, V. 20, (2006), 450–457.
- [53] Hobbs, D.W, “The dependence of the bulk modulus, Young’s modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration”, *Mat. Struct.*, V. 4, (1971), 107–114.
- [54] Raghavan, D., Huynh, H. and Ferrari, CF., “Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite”, *J. MATERIALS Sci*, V. 33, (1998), 1745–1752.
- [55] Nehdi, M. and Khan, A., “Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber : An Overview of Engineering Properties and Potential Applications”, *Cem. Con- Crete, Aggregates*, V. 2, (2001), 3–10.
- [56] Neville, A.M., “*Propriétés des bétons*”, Quatrième édition, Edition française par CRIB, Editions Eyrolles, 2000.
- [57] Document Technique Unifié, “Règle de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction”, Etablies par Le Groupe de coordination des textes techniques, Novembre (1977).
- [58] Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B., Quéneudec, M., “Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling”, *Constr. Build. Mater.*, V. 22, (2008), 573–579.
- [59] Marie, I., “Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate – Rubberized concrete”, *Constr. Build. Mater.*, V. 133, (2017), 516–524.
- [60] Issa, C.A, and Salem, G., “Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design”, *Constr. Build. Mater.* V. 42, (2013), 48–52.

- [61] Benazzouk, A., Douzane, O., Quéneudec. and t’Kint M., “Transport of fluids in cement–rubber composites”, *Cem. Concr. Compos.* V. 26, (2004), 21–29.
- [62] Hesami, S., Salehi Hikouei, I., Emadi, S.A.A., “Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber”, *J. Clean. Prod.*, V. 133, (2016), 228–234.
- [63] Sukontasukkul, P. and TiamlomK., “Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size”, *Constr Build Mater*, V. 29, (2012), 520–526.
- [64] Blessen S. T., Ramesh, C. G., “Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber”, *J. Clean. Prod.*, V. 113, (2016), 86–92.
- [65] Miguel, B. and de Brito, J., “Concrete made with used tyre aggregate: Durability-related performance”, *J. Clean. Prod.*, V. 25, (2012), 42–50.
- [66] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P., Kumar, S., “Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment”, *Constr. Build. Mater*, V. 83, (2015), 320–326.
- [67] Onuaguluchi, O., Panesar, DK., “Properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume”, *J Clean Prod*, V. 82, (2014), 125–131.
- [68] Diederich, P., “Contribution à l’étude de l’influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton“, Thèse de doctorat de l’université de Toulouse III - Paul Sabatier, (2010).
- [69] Petersson, O., Billberg, p., and Van, b.k., “A model for Self-Compacting Concrete “, International Rilem Conference on ‘Production methods and workability of concrete, RILE Proceedings 32, (1996).
- [70] Oh, S.G., Noguchi, T., and Tomosawa, F., “Towards mix design for rheology of self-compacting concret”, First International Symposium on SCC, Stockholm, Edited by Sharendahl and Petersson, RILEM publications PRO7, (1999), Cachan, 361-372.
- [71] Abdi, B., “La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures”, Mémoire de Maîtrise des sciences Appliquées, Spécialité : génie civil, Sherbrooke, Québec, Canada, (2005).
- [72] Fiches Techniques, Tome2, les Bétons : Formulation, Fabrication et mise en œuvre”, centre d’information sur le ciment et ses applications, (2005), 108-119.
- [73] Baron J., and Ollivier J.P., *Les bétons – Bases et données pour leur formulation*”, Editions Eyrolles, (1996).
- [74] NF EN 206-9, Règles complémentaires pour le béton autoplaçant”, (2014).
- [75] AFGC, *Recommandations pour l’emploi des bétons auto plaçants*”, Document scientifique et technique, (2008).
- [76] El-Barrak, M., “Contribution à l’étude de l’aptitude l’écoulement des bétons autoplaçants à l’état frais”, Thèse de Doctorat d’Université de Toulouse III – Paul Sabatier, France, (2005).

- [77] Soualhi, H., “Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental”, Thèse de doctorat de l’université de Cergy –Pontoise, France, (2014).
- [78] Adjoudj, M., “Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton”, Thèse en cotutelle, université de Cergy-Pontoise (France) et Université Hassiba-Ben Bouali de Chlef, Algérie, (2015.)
- [79] Couaraze, G., et Grossiord, J., “Initiation à la rhéologie”, Paris 3e Ed. Lavoisier. (2000).
- [80] Coussot, P. et Grossiord, L., “Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton”, EDP Sci. (2001).
- [81] Amziane, S., “Contribution à l’étude des matériaux cimentaires à l’état frais”, rapport de l’Habilitation, Université de Bretagne sud, France, (2005).
- [82] Elhilali A., “Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fines calcaires et des fibres végétales”, Thèse de doctorat de l’université de Cergy Pontoise, France, (2009).
- [83] Assié, S., “Durabilité des Bétons Autoplaçants”, L’institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, France, (2004).
- [84] De Larrard, F., Sedran, T., Hu C., Szitkar, J., Joly, M. and Derkx, F., “Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with BTRHEOM rheometer Glasgow”, Scotland, (June 1996).
- [85] Wallevik, O., et Gjorv, O., “Development of a coaxial cylinder viscometer for fresh concrete, Properties of Fresh Concrete”, Proc. Rilem Colloquium, Chapman Hall, Hanover. (1990).
- [86] Romualdi, J.P. and Batson, G.B., “Mechanics of Crack Arrest in Concrete”, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, V. 89, (1963), 147-168.
- [87] Fritih, Y., “Apport d’un renfort de fibres sur le comportement d’éléments en béton autoplaçant armé”, Thèse doctorat de l’université de Toulouse, France, (2009).
- [88] Sukontasukkul, P., Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending, *Thammasat Int. J. Sci. Technol.* V. 9, (2004), 35–41.
- [89] Cotterell, B., Mai, Y.W., “Fracture Mechanics of Cementitious Materials. Blackie Academic & Professional”, London/Chapman and Hall, (1996), 294.
- [90] Gopalaratnam, V.S. and Shah S., “Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete, Fiber Reinforced Concrete – Properties and Applications”, SP 105, ACI, Detroit, Michigan, (1987), 1-25.
- [91] Rossi, P., Acker P. and Malier Y., “Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure”, *Materials and structures*, V. 20, (1987), 436-439.
- [92] Deng, Z., Li, J., “Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete” *Computers and Concrete*”, V. 4, (2007), 19-31.

- [93] Cusens A.R., “The measurement of the workability of dry concrete mixes”, *Magazine of Concrete Research*, V. 8, (22), (1956), 23-30.
- [94] Yun, H.D., Yang, I.S., Kim, S.W., Jeon, E., Choi C.S., Fukuyama H (2007) “Mechanical properties of high-performance hybrid-fibre-reinforced cementitious composites (HPHFRCCs)” *Magazine of Concrete Research*, V. 59, (4), (2007), 257–271.
- [95] Dhonde, H.B., Mo, Y.L., Hsu, T.T.C., “Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams”, Technical Report 0-4819-1. Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration Project 0-4819 Department of Civil & Environmental Engineering University of Houston, Texas December (2005).
- [96] Grunewald, S., Walraven, J.C., “Rheological Study on the Workability of Fiber Reinforced Mortar,” *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, University of Tokyo, Japan, (2001), 127-136.
- [97] Johnston, C.D, “Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes”, *Production Methods and Workability of Concrete*, in: edited by M. and C. Bartos (Ed.), *Proc. Int. RILEM Conf.*, London, (1996), 155–179.
- [98] Rossi, P., “Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques”, *Annales de l’ITBTP*, N° 492, Série Béton 279, (1991), 90–107.
- [99] Baron, J. et Lesage, R., “Méthode expérimentale de composition des bétons hydrauliques”, *Bulletin de liaison de LPC*, Juillet-aout, (1976), 130-140.
- [100] Rossi, P, “Etude de Contribution des fibres métalliques à l’amélioration du comportement du béton au cisaillement”, *Thèse Doct. Ing : Ecole national des Ponts et Chaussées*, Paris (France), (1984).
- [101] Rossi, P., Harrouche, N., (1990) “Mix design and mechanical behaviour of some steel-fibre-reinforced concretes used in reinforced concrete structures”, *Materials and Structures*, V. 23, (1990), 256-266.
- [102] Löfgren, I., “Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, (2005).
- [103] Soroushian, P., Lee C.D., “Distribution and orientation of fibres in steel fiber reinforced concrete”, *ACI Materials Journal*, V. 87 (5), (1990), 433-439.
- [104] Kooiman, A.G., “Modelling Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design, PhD-thesis, Department of Structural and Building Engineering, Delft University of Technology. (2000).
- [105] Markovic, I., Walraven, J.C. and Van Mier J.G.M., “Self-compacting hybrid-fibre concretemix design”, workability and mechanical properties, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 17-20 August (2003).

- [106] Kawamata, A., Mihashi, H. and Fukuyama, H., “Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement-based Composites”, *Journal of advanced concrete technology*, V. 1, (2003), 283-290.
- [107] Li, V.C. and Leun, G.C.K.Y., “Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites”, *Journal of engineering mechanics*, ASCE, V. 118 (11), (1992), 2246-2264.
- [108] Kawamata A., Mihashi H., Fukuyama H., “Flexural failure properties of hybrid fiber reinforced cementitious composites”, *Proceeding of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting*, V. 63, (2000), 69-72.
- [109] Casanova, P., “Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure”, LCPC. (1996).
- [110] Groth, P., “Fibre reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders”, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology (Sweden), (2000).
- [111] Grunewald, S., Walraven, J.C., “Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, V. 31, (2001), 1793-1798.
- [112] Khaloo, A., Molaei, E.R., Payam, H. and Tahsiri, H., “Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers”, *Constr. Build. Mater.* V. 51, (2014), 179–186.
- [113] Seddik, M. and Bencheikh, M., “Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials”, *Constr. Build. Mater.* V. 23, (2009), 3196–3205.
- [114] Zamri, N.F., Mohamed, R.N, Khalid, N.H.A., Mansor, S., Shukri, N.A., Mahmoor, M.S.N. and Awalluddin, M D K., *Performance of Medium Strength of Steel Fibre Reinforced Self- Compacting Concrete (SFRSCC) Performance of Medium Strength of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC)*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. (2018), 431 042002.
- [115] Gülsan, M.E., Alzebaree, R., Rasheed A. A., Nis, A. and Kurtog A.E., “Development of fly ash / slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber”, V. 211, (2019), 271–283.
- [116] Mastali, M. and Dalvand, A., “Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC)”, *Constr. Build. Mater.* 125, (2016), 196–209.
- [117] Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F, Sellier, A., “Metallic Fiber Reinforced Concrete: Effect of Fiber Aspect Ratio on the Flexural Properties ARP”, *J. Eng. Appl. Sci.* V. 4, (2009), 67–72.
- [118] Siddique, R., Kaur, G. and Kunal, “Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres”, *Constr. Build. Mater.* V. 103, (2016), 15–22.

- [119] EFNARC, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”, in: Eur. Guidel. Self Compacting Concrete, 2005.
- [120] Alcantara, M., “Béton auto-plaçant et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique”, Thèse doctorat LMDC, Toulouse, France, (2004).
- [121] Alcantara, M., Mouret, M., Pons, G. and Granju, J-L., “Self-compacting concrete with hybrid fiber reinforcement: workability and mechanical behaviour”, 4th International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Chicago, USA, (2005).
- [122] Pons, G., Mouret, M., Alcantara, M. and Granju, J.L., “Mechanical behaviour of selfcompacting concrete with hybrid fibre reinforcement”, *Materials and structures*, V. 40, (2007), 201-210.
- [123] Negin, Y., Alireza, J., Erfan, H. and Shekarchi, M., “Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete”, *Constr. Build. Mater.* V. 148, (2017), 833–845.
- [124] Bolooki, H., Behravan, A., Tabatabaei, S.T.A., and Gholami, A., “A study on the durability parameters of concrete structures reinforced with synthetic fibers in high chloride concentrated shorelines”, *Constr. Build. Mater.*, V. 200, (2019), 578–585. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.155.
- [125] Zhang, P. and Li, Q., “Composites : Part B Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume”, *Compos. Part B.*, V. 45, (2013), 1587–1594. doi:10.1016/j.compositesb.2012.10.006.
- [126] El-Dieb, A.S., “Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers”, *Materials and Design*, V. 30, (2009), 4286–4292. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.024.
- [127] Frazão, C., Camões, A., Barros, J. and Gonçalves, D., “Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, V. 80, (2015), 155–166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.061.
- [128] Yehia, S., Douba, A.E., Abdullahi, O., Farrag, S., “Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete”, *Constr. Build. Mater.*, V. 121, (2016), 120–133. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.127.
- [129] Koushkbaghi, M., Jafar, M., Mosavi, H. and Mohseni, E., “Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, V. 202, (2019), 266–275. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.224.
- [130] Afroughsabet, V., Biolzi, L. and Ozbakkaloglu, T., “Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete”, *Compos. Struct.*, (2017). doi:10.1016/j.compstruct.2017.08.086.
- [131] Derabla, R., “Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons autoplaçants traités thermiquement”, Thèse de doctorat de l’université 8 Mai 1945 – Guelma, 2015.

- [132] Almuwbber, M.I., Haldenwang, O., Mbasha W. R. and Masalova, I., “The influence of variation in cement characteristics on workability and strength of SCC with fly ash and slag additions”, *Constr. Build. Mater.* V. 160 (2018) 258–267.
- [133] Khayat, K. H., “Workability testing, and performance of self-consolidating concrete”, *ACI Mater. J.*, V. 96, (1999), 346–353.
- [134] Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., and Venkatasubramani, R., “Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures”, *KSCE J. Civ. Eng.*, V. 17, (2013), 465–472.
- [135] Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E.H., and Rouis, F., “Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete”, *Constr. Build. Mater.*, V. 23, (2009), 2593–2598. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.029.
- [136] Dinakar, S.M., Kartik P. and Reddy, M., “Behaviour of self-compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash”, *Mater. Desig.* (2013), 609–616.
- [137] De Larrard, F., Sedran, T., Hu, C., Szitkar J., Joly, M. and Derkx, F., “Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with BTRHEOM rheometer Glasgow”, Scotland, June 3-5, (1996).
- [138] Gesoglu, M., Güneyisi, E. and Özbay, E., “Properties of self-compacting concretes made with binary , ternary , and quaternary cementitious blends of fly ash , blast furnace slag , and silica fume”, *Constr. Build. Mater.*, V. 23, (2009), 1847–1854. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015.
- [139] Gesoglu, M., Guneyisi, E., Kocabag, M.E., Bayram V. and Mermerdas K., “Fresh and hardened characteristics of self-compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash”, *Constr. Build. Mater.*, V. 37, (2012), 160–170.
- [140] Kostrzanowska-Siedlarz A. et Gołaszewski J., “Rheological properties and the air content in fresh concrete for self-compacting high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, V. 94, (September 2015), 555-564.
- [141] Saric-Coric, M., “Interactions superplastifiant - laitier dans les ciments au laitier. Propriétés des bétons”, thèse de doctorat de l’Université de Sherbrooke (Canada), (2001).
- [142] Menéndez, G., Bonavetti.V. and Irassar, E.F., “Strength development of ternary blended cement with limesotone filler and blast furnace slag”, *Cement and Concrete Research*, V. 25, (2003), 61-67.
- [143] Bernal, J., Reyes, E., Massana, J., León, N. and Sánchez E., “Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures”, *Construction and Building Materials*, V. 160, (January 2018), 196-210.

- [144] EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances, Septembre. (2016).
- [145] Okamura, H., Ouchi, M., "Self-Compacting Concrete", *J. Adv. Concr. Technol.* V.1, (2003), 5–15. doi:10.3151/jact.1.5.
- [146] Okamura, H., Ouchi, M., "Self-compacting concrete: development, present use and future", in: *Frst Int. Conf. Self-Compacting Concr.*, (1999). 3–14.
- [147] Boukendakdji, O., "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires", l'université de Blida, (2010).
- [148] Domone P.L.J. et Jin J., "Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete", Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, Paris, (1999), 109–120.
- [149] NF EN 12390-3, Essai pour béton durci, Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, (Février 2003).
- [150] ASTM C78-07, Standard test method for flexural strength of concrete using simple beam with third-point loading, West Conshohocken, Pennsylvania, USA. (2007).
- [151] ASTM C157, Standard Test Method for Length change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete, USA, (2014).
- [152] NF EN 993-15, Méthodes d'Essai pour Produits Réfractaires Façonnés Denses Partie 15 : Détermination de la Conductivité Thermique par la Méthode du Fil Chaud, (Octobre 2005).
- [153] ASTM C1585 – 11, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes, (2012).
- [154] DIN 1048, Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure, (2000).
- [155] ASTM C1202 – 12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, (2012).
- [156] Thomas, B., Gupta, R. and Panicker, V., "Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance", *J. Clean. Prod.* V. 112, (2016), 504–513.
- [157] Sukontasukkul, P., "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel", *Constr. Build. Mater.* V. 23, (2009), 1084–1092. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021.
- [158] Uygunoglu, T. and Topçu, I.B., "The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars", *Constr. Build. Mater.* V. 24, (2010), 1141–1150. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027.

- [159] Khalil, E., Abd-Elmohsen, M. and Anwar A.M., “Impact Resistance of Rubberized Self-Compacting Concrete”, *Water Sci*, V. 29, (2015), 45–53. doi:10.1016/j.wsj.2014.12.002.
- [160] Güneyisi, E, “Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash”, *Mater. Struct*, V. 43, (2010), 1037–1048. doi: 10.1617/s11527-009-9564-1.
- [161] Bideci, A., Öztürk, H., Bideci, Ö.S. and Emiroğlu, M., “Fracture energy and mechanical characteristics of self-compacting concretes including waste bladder tyre”, *Constr. Build. Mater*, V. 149, (2017), 669–678. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.191.
- [162] Hilal, N.N., “Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content”, *Int. J. Sustain. Built Environ*. V. 6, (2017), 191–206. doi:10.1016/j.ijsbe.2017.03.001.
- [163] Li, Z., Li, F. and Li, J.S.L., “Properties of concrete incorporating rubber tyre particles”, *Mag. Concr. Res*, V. 50, (1998), 297–304.
- [164] Meddah, A., Bensaci, H., Beddar, M. and Bali, A., “Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement”, *Innov. Infrastruct. Solut*, V. 2, (2017), 17. doi:10.1007/s41062-017-0068-5.
- [165] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Kalla, P. and Cseteneyi, L, “Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates”, *Constr Build Mater*. V. 59, (2014), 204-212.
- [166] Lutz, M. P., Monteiro, P.J.M.,and Zimmerman, R.W., “Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar”, *Cem Concr Res*. V. 27, (1997), 1113- 1122.
- [167] Bonnet, S., “Matériaux cimentaires à haute déformabilité par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés”, Université Paul Sabatier, Toulouse, (2003).
- [168] Bensaci, H., Menadi, B., Kenai, S. and Yahiaoui, W., “Performance of self-compacting rubberized concrete Performance du béton autoplaçant à base de granulats en caoutchouc”, *MATEC Web Conf*. 01070 (2018).
- [169] Gül, R., Uysal, H. and Demirboğa, R., “Investigation of The Thermal Conductivity of Lightweight Concrete Made with Kocapınar’s Pumice aggregate”, *Adv. Civ. Eng, III Tech. Congr*. V. 2, (1997), 553–562.
- [170] Blanco, F., Garcia, P., Mateos, P. and Ayala, J., “Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres”, *Cem. Concr. Res*, V. 30, (2000), 1715–1722.
- [171] Yung, W.H., Chin, L., Hsien, L., “A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 41, (2013), 665–672. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019.

- [172] Huang, X., Ranade, R., Ni, W. and Li, V.C., “On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durability concrete repairs”, *Constr. Build. Mater.* 46 (2013) 134–141.
- [173] Chunlin, L., Kunpeng, Z. and Depeng, C., “Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: a preliminary study”, *Proc. Eng.*, V. 24 (2011) 412–416.
- [174] Meddah, A., Beddar, M. and Bali, A., “Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement, *J. Clean. Prod.* V. 72, (2014), 187–192. doi:10.1016/j.jclepro.2014.02.052.
- [175] Gesoğlu, M., Güneyisi, E. Khoshnaw, G. and Ipek, S., “Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers”, *Constr. Build. Mater.*, V. 63, (2014), 206–213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046.
- [176] Ganesan, N., Bharati R. J. and Shashikala, A.P., “Strength and durability studies of self-compacting rubberised concrete, *Indian Concr. J.*, V 86, (2012), 15–24.
- [177] Gencel, O., Ozel, C. Brostow, W., “Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres”, V. 15, (2011), 216–225. doi:10.1179/143307511X13018917925900.
- [178] Bolat, H., Osman, S. and Can, Ö, “The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete”, V. 61, (2014), 191–198. doi:10.1016/j.compositesb.2014.01.043.
- [179] Aslani, F. and Nejadi, S., “Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers : Compressive and tensile strengths , moduli of elasticity and rupture , compressive stress – strain curve , and energy dissipated under compression”, *Compos. Part B.* V. 53, (2013), 121–133. doi:10.1016/j.compositesb.2013.04.044.
- [180] Bensaci, H., Menadi, B. and Kenai, S., “The influence of recycled steel fibers on self-compacting concrete performance The influence of recycled steel fibers on self-compacting concrete”, 14th International Conference on Concrete Engineering and Technology, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 431, (2018).
- [181] Mastali, M. and Dalvand, A., “Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, V. 125, (2016), 196–209. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046.
- [182] Han, J., Zhao, M., Chen, J. and Lan X., “Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater.*, V. 209, (2019), 577–591. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.086.
- [183] Khaloo, A.R., Eshrafi, A., Kalani, M. and Mobini, M.H., “Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.*, V. 80, (2015), 31–37. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.011.

- [184] Sahmaran, M. and Yaman, I.O. “Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash”, *Constr. Build. Mater*, V. 21, (2007), 150–156. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.06.032.
- [185] Anastasiou, E.K., Papayianni, I. and Papachristoforou, M., “Behavior of self-compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement”, *Mater. Des.* V. 59, (2014), 454–460. doi:10.1016/j.matdes.2014.03.030.
- [186] Sholihin A., Purnawan G. and Syarif M. A., “Fresh State Behavior of Self Compacting Concrete Containing Waste Material Fibres”, *Procedia Eng*, V. 14, (2011), 797–804. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.101.
- [187] Kamal, M.M., Safan, M.A., Etman, Z.A. and Kasem, B.M, “Mechanical properties of self-compacted fiber concrete mixes”, *Hous. Build. Natl. Res. Cent.* (2013). doi:10.1016/j.hbrej.2013.05.012.
- [188] Rambo, D. A, S., Silva, F.D.A., Dias, R. and Filho, T., “Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete : Materials and structural aspects”, *J. Mater*, V. 54, (2014), 32–42. doi:10.1016/j.matdes.2013.08.014.
- [189] Grabois, T.M., Cordeiro, G.C., Dias, R. and Filho, T., “Fresh and hardened-state properties of self- compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers”, *Constr. Build. Mater*, V. 104, (2016), 284–292. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060.
- [190] Mahmud, H.M., Ammar, N., Hanoon, H. and Abed, J., “Flexural Behavior of Self-Compacting Concrete Beams Strengthened with Steel Fiber Reinforcement”, *J. Build. Eng*, (2018). doi:10.1016/j.jobe.2018.01.006.
- [191] da Silva, A.M., Pepe, M., X De Andrade, R.G.M., Schubert, M. P. and Filho, R.D.T., “Rheological and mechanical behavior of High Strength Steel Fiber-River Gravel Self Compacting Concrete”, *Construction and Building Materials*, V. 150, (2017), 606–618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.030.
- [192] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A.R., Abdollahnejad, Z. and Illikainen, M., “Characterization and optimization of hardened properties of self- consolidating concrete incorporating recycled steel , industrial steel , polypropylene and hybrid fibers”, *Compos. Part B*, V. 151, (2018), 186–200. doi:10.1016/j.compositesb.2018.06.021.
- [193] Centonze, G, Leone, M. and Aiello, M.A., “Reuse of steel fibres from scrap tires in FRC”, *BEFIB2012 – Fibre reinforced concrete*, Guimarães, (2012) 0–10.
- [194] Najim, K.B., Saeb, A. and Al-azzawi, Z., “Structural Behaviour and Fracture Energy of Recycled Steel Fibre Self-Compacting Reinforced Concrete Beams”, *J. Build. Eng*, (2018). doi:10.1016/j.jobe.2018.02.014.
- [195] Aghaee, K., Yazdi, M. and Tsavdaridis, K., “Mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires”, *Mag. Concr. Res*, V. 67, (2015), 197–205. doi:http://dx.doi.org/10.1680/macr.14.00232.

- [196] Aiello, M.A., Leuzzi, F., Centonze, G. and Maffezzoli, A., “Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour , compressive and flexural strength”, *Waste Manag*, V. 29, (2009), 1960–1970. doi:10.1016/j.wasman.2008.12.002.
- [197] Taylor, P., Gencil, O., Brostow, W., Datashvili, T. and Thedford, M., “Workability and Mechanical Performance of Steel Fiber- Reinforced Self-Compacting Concrete with Fly Ash”, *Composite Interfaces*, (2012), 169–184. doi:10.1163/092764411X567567.
- [198] Lim, D.H., “Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams”, *Engineering Structures*, V. 21, (1999), 937–944.
- [199] Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K. and Bier, T.A., “Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC)”, *Constr. Build. Mater*, V. 98, (2015), 325–333. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.112.
- [200] Bensaci, H., Menadi, B. and Kenai, S., “Comparison of Some Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete Composites Containing Rubber and Steel Fibers Recovered from Waste Tires”, *Nano Hybrids Compos*, V. 24, (2019), 8–13. doi:10.4028/www.scientific.net/NHC.24.8.
- [201] Mangat, P.S. and Azari, M.M., “Plastic shrinkage of steel fibre reinforced concrete”, *Mater. Struct. Constr*, (1990), 186–195.
- [202] Cao, M., Zhang, C. and Haifeng, Lv, “Mechanical response and shrinkage performance of cementitious composites with a new fiber hybridization”, *Constr. Build. Mater*, V. 57, (2014), 45–52. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.088.
- [203] Yoo, D. Park, J. Kim, S. and Yoon, Y., “Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra-high performance fiber reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 41, (2013), 427–438. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.015.
- [204] Kaïkea, A., Achoura, D., Duplan, F. and Rizzuti, L., “Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete”, *Materials and Design*, V. 63, (2014), 493–499. doi:10.1016/j.matdes.2014.06.066.
- [205] Toledo, R.D., Ghavami, K. and Sanjua, M.A., “Free , restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres”, *Cement & Concrete Composites*, V. 27, (2005), 537–546. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005.
- [206] Aruntaş, H.Y., Cemalgil, S., Şimşek, O. and Durmuş G. and Erdal, M., “Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber”, *Mater. Lett*, V. 62, (2008), 3441–3443. doi:10.1016/j.matlet.2008.02.064.
- [207] Clifford A.O.O., Begg, D.W. and Barnett, S.J., “Behaviour of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete using innovative hooked-end steel fibres under tensile stress”, *Constr. Build. Mater*, V. 202, (2019), 753–761. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.067.

- [208] Mohammadi, Y., Singh, S.P. and Kaushik, S.K., “Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state”, *Constr. Build. Mater*, V. 22, (2008), 956–965. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004.
- [209] Tabatabaeian, M., Khaloo, A., Joshaghani, A. and Hajibandeh, E., “Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC”, *Constr. Build. Mater*, V. 147, (2017), 497–509. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.181.
- [210] Malgorzata, P. and Ponikiewski, T., “Experimental investigation on hybrid steel fibers reinforced self-compacting concrete under flexure”, *Procedia Eng*, V. 193, (2017), 218–225. doi:10.1016/j.proeng.2017.06.207.
- [211] Akcay, B. and Ali, M., “Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 28, (2012), 287–293. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.044.
- [212] Rambo, D.A.S., Silva, F.D.A. and Filho, R.D.T., “Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes”, *Cem. Concr. Compos*, V. 54, (2014), 100–109. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.02.004.
- [213] Aarre, T., Domone, P., “Reference concretes for evaluation of test methods for SCC”, in: *Int. Proc. 3rd RILEM Int. Symp. Self-Compacting Concr*, (2003), 495–505.
- [214] Uysal, M., Yilmaz, K. and Ipek, M., “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 27, (2012), 263–270. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.049.
- [215] Yahiaoui, W., Kenai, S., Menadi, B. and Kadri, E., “Durability of self-compacted concrete containing slag in hot climate”, *Adv. Concr. Constr*, V. 5, (2017), 271–288.
- [216] Sideris, K.K. and Chatzopoulos, C.T.A. and Manita, P., “Mechanical characteristics and durability of self-compacting concretes produced with ladle furnace slag”, *Constr. Build. Mater*, V. 170, (2018), 660–667. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.091.
- [217] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A.R. and Illikainen, M., “Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial / recycled steel fibers”, *Constr. Build. Mater*, V. 166, (2018), 214–226. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147.
- [218] Caggiano, A., Folino, P., Lima, C., Martinelli, E. and Pepe, M., “On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers”, *Constr. Build. Mater*, V. 147, (2017), 286–295. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160.
- [219] Martinelli, E., Caggiano, A. and Xargay, H., “An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial / Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 94, (2015), 290–298. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.007.

- [220] Hu, H., Papastergiou, P., Angelakopoulos, H., Guadagnini, M. and Pilakoutas, K., “Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and Recycled Tyre Steel Fibres (RTSF)”, *Constr. Build. Mater*, V. 187, (2018), 553–564. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.206.
- [221] Choi, S.Y., Park, J.S. and Jung, T.W., “A Study on the Shrinkage Control of Fiber Reinforced Concrete Pavement”, *Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering*, V. 14, (2011), 2815–2822. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.354.
- [222] Bywalski, C., Kami, M., Maszczak, M. and Balbus, L., “Influence of steel fibres addition on mechanical and selected rheological properties of steel fibre high-strength reinforced concrete”, *Arch. Civ. Mech. Eng*, (2014), 1–9. doi:10.1016/j.acme.2014.05.013.
- [223] Ganesan, N., Abraham, R. and Raj, S.D., “Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 93, (2015), 471–476. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014.
- [224] Corinaldesi, V. and Moriconi, G., “Durable fiber reinforced self-compacting concrete”, *Cem. Concr. Res*, V. 34, (2004), 249–254. doi:10.1016/j.cemconres.2003.07.005.
- [225] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T., “Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers”, *Constr. Build. Mater*, V. 94, (2015), 73–82. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
- [226] Nili, M. and Afroughsabet, V., “Property assessment of steel – fibre reinforced concrete made with silica fume”, *Constr. Build. Mater*, V. 28, (2012), 664–669. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.027.

Annexe A

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

A.1. Les Données :

Pour un volume du mortier de $V=1.31$ (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_C = 3080 \text{ kg/m}^3$
- Sable : $\rho_S = 2500 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $A_b = 1,34$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$ (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.42$ ou (par volume) $E/C = 1.301$

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $Sp\% = 0,8\%$ du poids de ciment (ou poudres).

A.2. Calcul d'humidité du sable :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1 = 100$ grs (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse $M_2 = 100$ grs et on calcul l'humidité du sable μ_S

$$\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_S - A_b$$

A.3. Calcul des quantités de chaque constituant :

A.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment %C:

$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{par\ volume})} * 100$$

La quantité de ciment C en kg:

$$C(\text{kg}) = \frac{V \times E / C_{\text{par volume}}}{100} \times \rho_c$$

A.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S

$$S(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\text{Correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100}\right)$$

A.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

$$Sp(\text{kg}) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

A.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E_1 , qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : $\%E_{vol}$

$$\%E_{vol} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E / C_{\text{par volume}}}{(1 + E / C_{\text{par volume}})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%E_{vol} \times \rho_E}{100} \times \frac{\rho_E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{1000} \times \frac{\text{correction}}{100}\right)$$

Eau1

$$E_1 = E \times 0.70$$

Eau2

$$E_2 = E \times 0.30$$

Annexe B

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier (ANNEXE A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

B.1. Les Données

Pour un volume de béton de $V = 40$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : $\rho_G = 1440 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : $\rho_{AG} = 2570 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2580 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3080 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - Coefficient d'absorption du sable : $AbS = 1.3$
- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.5$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A = 1\%$ du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}} = 1.419$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.422$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : $\%Sp = 1\%$ du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

B.2. Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_I et un échantillon de gravier de masse M'_I et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et

une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

$$\text{L'humidité du sable : } \mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

$$\text{L'humidité du gravier : } \mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

B.3. Calcul des différents composants

B.3.1. Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3) \times V}{1000} \left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

B.3.2. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3)}{\rho_{AG}} \times 10$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable S dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(1 + \frac{\mu_s - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

B.3.3. Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \%P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(\text{kg}) = \%C \times \rho_c \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

$$Sp(\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_c \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(\text{kg}) = Sp(\text{kg} / \text{m}^3) \times V$$

B.3.5. Eau :

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E₁) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E₂), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{\text{volume}}}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e₁

$$e_1(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(\frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier : e₂

$$e_2(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3) \times V}{1000} \left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant : e₃

$$e_3 = \frac{Sp(\text{kg}) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(\text{kg}) = \frac{\% E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

Eau1

$$E_1(\text{kg}) = 0.70 \times E$$

Eau2

$$E_2(\text{kg}) = 0.30 \times E$$