UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo-matériaux et génie civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Matériaux et structures

PERFORMANCES DE BÉTON À BASE DE GRANULATS ET FIBRES RECYCLÉS

Par

Nor El-Houda MAAMERI

Devant le jury composé de :

YAHIAOUI WALID	M.C.A	U. de Blida 1	Président
BENTCHIKOU MOHAMED	Prof.	U. de Médéa	Examinateur
SAFIDDINE SALIM	M.C.A	U. de Médéa	Examinateur
KENAI SAID	Prof.	U. de Blida 1	Rapporteur
BENSACI HAMZA	M.C.A	U. de Blida 1	Co-Rapporteur

Blida, 2024

الملخص

تقدم هده الدراسة تحقيقا تجريبيا لتقييم جدوى استخدام نفايات الخرسانة على شكل رمل و حصى في انتاج الخرسانة المرصوصة ذاتيا. يتميز هذا الأخير بحجم كبير من العجين الذي يمكن أن يعوض بإضافات معدنية محلية مثل البازولين وخبث فرن الانفجار. من جهة أخرى، تعتبر الإطارات القديمة نفايات ضخمة وملوثة للبيئة. لذلك يمكن أن يساعد الاستخدام المتزامن للمجمعات المعاد تدويرها الناتجة عن نفايات الخرسانة، الخبث في الاستبدال الجزئي للإسمنت و الألياف الحديدية من الإطارات القديمة في انتاج خرسانة ذات تأثير بيئي منخفض. الغرض من هذه الدراسة هو دراسة تأثير الاستخدام المشترك للألياف الحديدية المعاد تدويرها المعالجة والخبث على الريولوجيا والخصائص الفيزيائية، الميكانيكية، الديمومة والبنية المجهرية للخرسانة المرصوصة ذاتيا المصنوعة من بقايا الخرسانة. تحقيقًا لهذه الغرض، تم تصميم خليط يعتمد على الرمل والحصى الطبيعيين وثلاث مجموعات من الخرسانة المرصوصة ذاتيا؛ الأولى تعتمد على 25% من الرمل المعاد تدويره، 50% و100% من الحصى المعاد تدويره. تحتوي المجموعة الثانية على نفس النسب المئوية من الرمل والحصى المعاد تدويرهما بالإضافة إلى 0.3% و0.5% و0.8% من الألياف، من حجم الخرسانة، و15% من الخبث. تحتوي المجموعة الثالثة على نفس النسب المئوية من نفايات الخرسانة والإطارات مثل الثانية، ولكن مع 25% من الخبث. أدى التأثير التآزري للألياف الحديدية المعاد تدويرها المعالجة حتى نسبة 0.8 % والخبث حتى نسبة 25 % في الخرسانة المرصوصة ذاتيا المصنوعة من بقايا الخرسانة إلى تحسين الريولوجيا، مقاومة الانضغاط، مقاومة الانحناء و معامل المرونة. بالإضافة إلى ذلك، فقد أتاح أيضًا الحصول على جودة أفضل، تقليل الانكماش الكلي، المسامية، امتصاص الماء الشعري، نفاذية الماء واختراق أيونات الكلوريد ، مقارنة بـالخرسانة المرصوصة ذاتيا المصنوعة من بقايا الخرسانة فقط. كذلك، كشفت كشفت صور المسح الإلكتروني للبنية المجهرية للألياف الحديدية المعاد تدويرها المعالجة في الخرسانة المصنوعة من بقايا الخرسانة عن وجود ارتباط جيد بين واجهة الألياف و المصفوفة.

كلمات المفاتيح: المجمعات المعاد تدويرها، الألياف الحديدية المعاد تدويرها المعالجة، الخبث، المقاومة، معامل المرونة، الانكماش الكلي، الديمومة.

RÉSUMÉ

Cette étude présente une investigation expérimentale visant à évaluer la faisabilité de l'utilisation des déchets de béton sous forme de sable et gravier dans la production du béton autoplaçant (BAP). Ce dernier se caractérise par un grand volume de pâte qui peut être compensé avec des additions minérales locales telles que la pouzzolane et le laitier de haut fourneau. D'autre part, les pneus usés sont considérés comme des déchets encombrants et polluants pour l'environnement. Pour cela, l'utilisation simultanée des granulats recyclés (GR) provenant de déchets de béton, du laitier en substitution partielle au ciment et des fibres d'acier des pneus usés peut contribuer à produire un béton à faible impact environnemental. Cette étude a pour but d'étudier l'effet de l'utilisation combinée des fibres d'acier recyclées traitées (FART) et du laitier (L) sur la rhéologie, les propriétés physico-mécaniques, la durabilité et la microstructure du BAP à base de GR (BAPR). À cet effet, on a conçu un mélange à base de sable et de gravier naturels et trois séries de BAP; dont la première à base de 25% de sable recyclé, 50% et 100% de gravier recyclé. La deuxième série contient les mêmes pourcentages de sable et de gravier recyclés auxquels on a ajouté 0.3%, 0.5% et 0.8% de fibres, en volume du béton, et 15% de laitier. La troisième série présente les mêmes pourcentages de déchets de béton et de pneus que la deuxième, mais avec 25% de laitier. L'effet synergique des fibres d'acier recyclées traitées jusqu'à 0.8% et du laitier jusqu'à 25% dans les BAPR a amélioré la rhéologie, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module d'élasticité. Par ailleurs, il a permet, aussi, d'obtenir une meilleure qualité, de diminuer le retrait total, la porosité, l'absorption d'eau capillaire, la perméabilité à l'eau et la pénétration aux ions de chlorure, par rapport aux BAPR contenant des GR seuls. En outre, les images de microscope électronique par balayage (MEB) de la microstructure des FART dans le BAPR ont révélé une bonne liaison de l'interface fibre-matrice.

Mots-clés : granulats recyclés, fibres d'acier recyclées traitées, laitier, résistance, module d'élasticité, retrait total, durabilité

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation aimed at assessing the feasibility of using concrete waste in the form of sand and gravel in the production of self-compacting concrete (SCC). The latter is characterized by a large volume of paste, which can be compensated with local mineral additions such as puzzolan and blast furnace slag. On the other hand, used tires are considered bulky and environmentally polluting waste. For this reason, the simultaneous use of recycled aggregates (RA) from concrete waste, slag (S) as a partial substitute for cement, and steel fibers from used tires can help to produce concrete with a low environmental impact. The aim of this study was to investigate the effect of the combined use of treated recycled steel fibers (TRSF) and slag (S) on the rheology, physical-mechanical properties, durability and microstructure of RA-based SCC (RSCC). To this end, we designed a mixture based on natural sand and gravel and three series of SCC; the first of which is based on 25% recycled sand, 50% and 100% recycled gravel. The second series contains the same percentages of recycled sand and gravel to which 0.3%, 0.5% and 0.8% fibers have been added, by volume of concrete, and 15% slag. The third series has the same percentages of concrete and tire waste as the second, but with 25% slag. The synergistic effect of treated recycled steel fibers up to 0.8% and slag up to 25% in RSCC improved rheology, compressive strength, flexural strength and modulus of elasticity. In addition, it improved quality and reduced total shrinkage, porosity, capillary water absorption, water permeability and chloride ion penetration, compared with RSCC containing RA alone. In addition, scanning electron microscope (SEM) images of the TRSF microstructure in RSCC revealed good bonding of the fiber-matrix interface.

Keywords: recycled aggregates, treated recycled steel fibers, slag, strength, modulus of elasticity, total shrinkage, durability.

REMERCIEMENTS

À mes deux directeurs de la thèse, Monsieur Said KENAI, Professeur à l'université de Blida 1, et à Monsieur Hamza BENSACI, Maitre de conférences à l'université de Blida 1, je vous remercie pour votre disponibilité indéfectible, votre aide inestimable et votre guide qui ont été essentiels à ma réussite et à ma diligence, et je suis vraiment reconnaissante de votre contribution afin d'améliorer et de finaliser ce travail. Espérant avoir l'occasion de travailler avec eux dans des futurs travaux.

Je remercie aussi Monsieur Belkacem MENADI, Professeur à l'université de Blida 1 et Monsieur Walid YAHIAOUI, Maitre de conférences et Directeur de laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux de l'université de Blida 1, pour leur aide, leur disponibilité, leur gentillesse et leur modestie.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres du jury de bien vouloir juger mon travail :

Docteur YAHIAOUI Walid	Président du jury de thèse
Professeur BENTCHIKOU Mohamed	Examinateur de thèse
Docteur SAFIDDINE Salim	Examinateur de thèse

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mes collègues de promotion, Asma BOUBAKEUR, Chahrazed MOUHOUS et Ines BOUTELDJA, pour leurs aides, leurs encouragements et leurs soutiens tout au long de ces années de recherche.

Je remercie également Mr. Abderkader FORTAS et Mme. Ahlem Gout et toute l'équipe de laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux de l'université de Blida 1.

Je voudrais également remercier toute l'équipe de GRANITEX qui ont mis à ma disposition des produits nécessaires pour l'élaboration de mon travail de recherche.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ

REMERCIMENTS

TABLE DES MAITIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GÈNÈRALE ……..….16

CHAPITRE I : REVUE BIBIOGRAPHIQUE_BÉTON AUTOPLAÇANT À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ET DE LAITIER DE HAUT FOURNEAU 19

1.1 Introduction 19

1.2 Les déchets 19

1.3 Avantages d'utilisation des granulats recyclés 22

1.4 Propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés.....22

1.5 Béton autoplaçant à base de granulats recyclés 25

1.6 Influence des granulats recyclés sur les propriétés du BAP à l'état frais 26

1.6.1 Effet des granulats recyclés sur la densité 26

1.6.2 Effet des granulats recyclés sur l'ouvrabilité.....26

1.7 Influence des granulats recyclés sur les propriétés du BAP à l'état durci 28

1.7.1 Effet des granulats recyclés sur la résistance à la compression.....28

1.7.2 Effet des granulats recyclés sur la résistance à la traction.....31

1.7.3 Effet des granulats recyclés sur le module d'élasticité 33

1.7.4 Effet des granulats recyclés sur le retrait 35

1.7.5 Effet des granulats recyclés sur la vitesse de pulsation ultrasonique 36

1.8 Influence des granulats recyclés sur les propriétés de transport du BAP 37

1.8.1 Effet des granulats recyclés sur l'absorption d'eau 37

1.8.2 Effet des granulats recyclés sur la perméabilité au gaz et à l'eau.....38

1.8.3 Effet des granulats recyclés sur la diffusion des ions chlorures 39

1.9 Influence du laitier sur les propriétés du BAP 40

1.10 Influence du laitier sur les propriétés du BAP à l'état frais 41

1.11 Influence du laitier sur la résistance à la compression du BAP 45

1.12 Influence du laitier sur la durabilité du BAP 47
1.12.1 Effet du laitier sur la porosité 47
1.12.2 Effet du laitier sur l'absorption d'eau capillaire 49
1.12.3 Effet du laitier sur la perméabilité à l'eau 49
1.12.4 Diffusion aux ions de chlorure 50
1.13 1.13 Conclusion 50
CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE_ VALORISATION DES FIBRES DE PNEUS USÉS DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE 52
2.1 Introduction 52
2.2 Pneus usés 52
2.3 Nécessité de traitement 53
2.4 Valorisation des pneus usés 54
2.5 Méthodes et potentiel de valorisation des pneus usés 55
2.5.1 Caoutchouc : 56
2.5.2 Fibres d'acier recyclées: 57
2.6 Caractéristiques physiques des fibres d'acier recyclées 59
2.7 Avantages des fibres d'acier recyclées 60
2.8 Bétons fibrés 61
2.9 Influence des fibres d'acier recyclées sur les propriétés des bétons à l'état frais 63
2.9.1 Ouvrabilité des bétons fibrés 63
2.9.2 Teneur en air 66
2.9.3 Ouvrabilité du BAP fibré 66
2.9.4 Capacité de passage 68
2.10 Influence des fibres d'acier recyclées sur les propriétés des bétons à l'état durci 69
2.10.1 Résistance à la compression 69
2.10.2 Résistance à la flexion 73
2.11 Béton recyclé fibré 74
2.12 Conclusion 76
CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS 77
3.1 Introduction 77
3.2 Caractérisation des matériaux 77
3.2.1 Ciment 77

3.2.2 Laitier 77
3.2.3 Granulats naturels 78
3.2.4 Granulats recyclés 79
3.2.5 Fibres d'acier recyclées traitées 80
3.2.6 Adjuvant 82
3.3 Formulations 83
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 le béton autoplaçant à l'état durci 88
3.4 Récapitulatif des essais réalisés 92
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 95
4.1 Introduction 95
4.2 Optimisation de dosage de superplastifiant 95
4.2.1 Essais d'étalement au mini-cône et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V…….. 95
4.3 Effet des fibres d'acier recyclées traitées et du laitier sur les propriétés des BAP à base de granulats recyclés à l'état frais 96
4.3.1 Etalement 98
4.3.2 Temps d'étalement T50 101
4.3.3 Temps en entonnoir en V 105
4.3.4 Résistance à la ségrégation 109
4.4 Effet des fibres recyclées et du laitier sur les propriétés des BAP de granulats recyclés à l'état durci 113
4.4.1 Résistance à la compression 113
4.4.2 Résistance à la flexion 117
4.4.3 Module d'élasticité 122
4.4.4 Vitesse de pulsation ultrasonique 125
4.4.5 Retrait total 128
4.4.6 Porosité accessible à l'eau 131
4.4.7 Absorption d'eau capillaire 134
4.4.8 Pénétration de l'eau 137
4.4.9 Pénétration aux ions de chlorure 140

4.5 Microstructure 142
4.6 Conclusion..... 145

CONCLUSION GÉNÉRALE ……...……...……..…...……..... 147

RÉFÉRENCES ……...……...…….……...…...…....150

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : REVUE BIBIOGRAPHIQUE_BÉTON AUTOPLAÇANT À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ET DE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

Figure 1. 1 : Composition typique des déchets de construction [7]. 21
Figure 1. 2 : Les différentes types de ZTI : (a) FGN et (b) FGR [12]. 23
Figure 1. 3 : Images du MEB : (a) FGN ; (b) FGR [13]. 24
Figure 1. 4 : Image du MEB du BAP à base de GR [40]. 30
Figure 1. 5 : Image du MEB de ZTI entre les GR et nouveau mortier ; (a) béton de 100% de GN ; (b) béton de 25% de GR [43]. 30
Figure 1. 6 : Influence du taux de substitution de GGR sur la résistance à la traction par fendage [45]. 32
Figure 1. 7 : Influence du taux de substitution de GGR sur la résistance à la traction par fendage [40]. 32
Figure 1. 8 : Corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAP [51]. 34
Figure 1. 9 : Retrait de séchage pour les BAP à base de GR [31]. 35
Figure 1. 10 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction des GR [38]. 37
Figure 1. 11 : Absorption d'eau des mélanges de BAP [44]. 38
Figure 1. 12 : Evolution de la perméabilité à l'eau des BAP en fonction des dosages de FGR et de GGR [58]. 39
Figure 1. 13 : Effet du laitier sur : a) la viscosité plastique et b) le seuil de cisaillement [74]. 44
Figure 1. 14 : Structure des pores des BAP [87]. 48

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE_ VALORISATION DES FIBRES DE PNEUS USÉS DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE

Figure 2. 1 : Zones de combustion des pneus usés en Espagne [99]. 54
Figure 2. 2 : Gestion des déchets pneumatiques en Europe [101]. 55
Figure 2. 3 : Traitement des pneus usés [109] : (a) pneu usé, (b) gros morceaux déchiquetés de caoutchouc, (c) fibres d'acier et (d) miettes de caoutchouc. 58
Figure 2. 4 : Nature ductile du béton renforcé par des fibres d'acier [119]. 62

Figure 2. 5 : Schéma descriptif des relations d'ouverture des fissures sous contrainte du béton fibré [112]. 62
Figure 2. 6 : Effet des fibres d'acier recyclées sur l'ouvrabilité du béton [126]. 64
Figure 2. 7 : Effet de la fumée de silice et des FAR sur l'étalement des BAP [131]. . 67
Figure 2. 8 : Effet des fibres recyclées sur la capacité de passage du BAP [137]. 69
Figure 2. 9 : Image de microscopie électronique à balayage pour la topologie de surface des FAR aux différents grossissements [144]. 70
Figure 2. 10: Morphologie de la surface de (a) FAI, (b) FAR [146]. 71
Figure 2. 11 : Pontage des fissures par les fibres [147]. 72
Figure 2. 12 : Empreinte d'ancrage des fibres [147]. 72
Figure 2. 13: Effet des FAR sur le comportement charge-déflexion des BAP [131]. . 74
Figure 2. 14 : (a) Microstructure des bétons recyclés et (b) Granulat recyclé et matrice environnante [151]. 75

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

Figure 3. 1 : Courbe granulométrique de sable et de gravier. 78
Figure 3. 2 : Préparation des granulats recyclés. 81
Figure 3. 3 : Caractérisation géométrique des FART : (a) variation des diamètres et (b) variation des longueurs. 82
Figure 3. 4 : Essai d'étalement au mini-cône pour mortier. 84
Figure 3. 5 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier. 85
Figure 3. 6 : Essai d'étalement. 86
Figure 3. 7 : Essai d'entonnoir en V. 87
Figure 3. 8 : Dispositif de l'essai de flexion à trois points. 89
Figure 3. 9 : Mesure de la profondeur de pénétration de l'eau. 91
Figure 3. 10 : Dispositif du MEB. 92
Figure 3. 11 : Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état frais et à l'état durci. 94

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Figure 4. 1 : Variation de l'étalement et de temps d'écoulement en fonction de dosage en SP. 96
Figure 4. 2 : Étalement des BAP. 98
Figure 4. 3 : Temps T50 des BAP. 102

Figure 4. 4 : Temps Tv des BAP. 105
Figure 4. 5 : Résistance à la ségrégation des BAP. 109
Figure 4. 6 : Résistance à la compression des BAP à 28 jours. 114
Figure 4. 7 : Résistance à la compression des BAP à 90 jours. 114
Figure 4. 8 : Résistance à la flexion à 28 jours. 118
Figure 4. 9 : Résistance à la flexion à 90 jours. 118
Figure 4. 10 : (a) Echantillons sans fibre, (b) Echantillons avec fibres et (c) Pontage des fissures. 120
Figure 4. 11 : Module d'élasticité des BAP à 28 jours. 123
Figure 4. 12 : Module d'élasticité des BAP à 90 jours. 123
Figure 4. 13 : Vitesse de pulsation ultrasonique à 28 jours. 125
Figure 4. 14 : Vitesse de pulsation ultrasonique à 90 jours. 126
Figure 4. 15 : Corrélation entre la résistance à la compression, le module d'élasticité et la vitesse d'impulsion ultrasonique à 90 jours. 127
Figure 4. 16 : Retrait total des BAPR1. 129
Figure 4. 17 : Retrait total des BAPR2. 129
Figure 4. 18 : Absorption d'eau par capillarité des BAPR1. 135
Figure 4. 19 : Absorption d'eau par capillarité des BAPR2. 135
Figure 4. 20 : Corrélation entre : (a) la porosité accessible à l'eau et la résistance à la compression à 90 jours, (b) la profondeur de pénétration de l'eau et la résistance à la compression à 90 jours. 139
Figure 4. 21 : Résistance aux ions de chlorure. 140
Figure 4. 22 : Images de MEB de la matrice de BAP fibré. 144

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

Tableau 3. 1 : Composition chimique du ciment. 77
Tableau 3. 2 : Composition chimique du laitier. 78
Tableau 3. 3 : Propriétés physiques et mécaniques du sable naturel. 79
Tableau 3. 4 : Propriétés physiques du gravier naturel. 79
Tableau 3. 5 : Propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés. 80
Tableau 3. 6 : Propriétés de MEDAFLOW-30. 83
Tableau 3. 7 : Classes d'étalement des BAP selon l'AFGC [164]. 87

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau 4. 1 : Compositions des mélanges de BAP. 97
Tableau 4. 2 : Porosité et perméabilité à l'eau des BAP. 131

LISTE DES ABREVIATIONS

AFGC	Association Française de Génie Civil
Al_2O_3	Alumine
BAP	Béton autoplaçant
BAPR	Béton autoplaçant recyclé
BHP	Béton de haute performance
BO	Béton ordinaire
C	Ciment
C_3A	Aluminate tricalcique
CaO	Oxyde de calcium
C_3S	Silicate tricalcique (Alite)
C_2S	Silicate bicalcique (bélite)
Ca $(OH)_2$	Hydroxyde de calcium (Portlandite)
Ca CO_3	Carbonate de calcium
CEM II/B 42.5	Ciment Portland composé de Classe 42.5
Cl^-	Ions chlorures
CO_2	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
CV	Cendres volantes
E	Eau
E	Module d'élasticité
E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
FS	Fumée de silice
FAI	Fibres d'acier industrielles
FAR	Fibres d'acier recyclées
FART	Fibres d'acier recyclées traitées
FGN	Fins granulats naturels
FGR	Fins granulats recyclés
GN	Granulats naturels
GR	Granulats recyclés
GGN	Gros granulats naturels

GGR	Gros granulats recyclés
G/S	Gravier/Sable
H_2/H_1	Rapport de la boite en L
HR	Humidité relative
I	Coefficient d'absorption d'eau capillaire (mm)
L	Laitier de haut fourneau
MAP	Mortier autoplaçant
MEB	Microscopie électronique par balayage
Mf	Module de finesse
R^2	Coefficient de corrélation
SCC	Self-Compacting Concrete
SiO_2	dioxyde de silicium (Silice)
SO_3	Trioxide de soufre
S/M	Sable/Mortier
SP	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T	Température (°C)
T50	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec)
Tv	Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec)
ZTI	Zone de transition interfaciale
ρ_{app}	Masse volumique apparente
ρ_{abs}	Masse volumique absolue

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Algérie vit un développement économique et démographique sans précédent et l'accroissement de la population a engendré une urbanisation accélérée, ce qui engendrera, inévitablement, des conséquences graves sur l'environnement. De manière générale, le secteur de la construction est considéré comme le plus grand émetteur de dioxyde de carbone et le plus grand consommateur d'énergie.

D'autre part, les granulats naturels représentent environ 70% de volume du béton. Cette consommation peut provoquer, potentiellement, l'épuisement alarmant des ressources naturelles non renouvelables à savoir le sable et le gravier. L'utilisation de granulats recyclés obtenus à partir de béton de déchets de construction et de démolition, sous forme de fins et gros granulats, dans le béton autoplaçant (BAP) est considérée comme une solution prometteuse et appropriée dans le domaine de la construction pour réduire leur impact négatif sur l'environnement, pour contrôler la consommation excessive des ressources naturelles et créer de nouvelles sources de matériaux. Néanmoins, d'après la littérature, l'incorporation de granulats de béton recyclés (GR) dans les BAP réduit, non seulement, les propriétés fraîches et mécaniques, mais aussi, dégrade la durabilité.

Vu les effets négatifs de l'utilisation des granulats recyclés sur les performances du BAP, et afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de ces granulats dans la fabrication du BAP, des ajouts cimentaires (fumée de silice, fillers de calcaire, laitier de haut fourneau, pouzzolane, cendres volantes) peuvent être utilisés en substitution partielle du ciment dans le but d'améliorer certaines propriétés. Parmi ces ajouts, le laitier granulé de haut fourneau, qui est un déchet local des usines sidérurgiques, peut remplacer et diminuer la quantité de ciment et celle des émissions en CO_2 et permet de réduire les effets préjudiciables sur l'environnement, en améliorant la rhéologie et la durabilité des BAP de GR (BAPR), d'une part.

D'autre part, les fibres d'acier sont, généralement, les plus utilisées pour le renforcement des bétons, en vue de leur capacité de contrôler et d'empêcher le développement des fissures, améliorant ainsi les performances physico-mécaniques et le comportement ductile. Ces dernières années, plusieurs chercheurs ont utilisé les fibres d'acier recyclées (FAR) récupérées à partir de pneus usés comme substitut aux fibres d'acier industrielles

(FAI), car elles présentent des propriétés équivalentes à celles des FAI et elles sont plus écologiques et plus économiques. Comparée aux FAI, l'utilisation de FAR présente certains avantages, tels que de faibles émissions de gaz à effet de serre, une bonne solution pour l'élimination des pneus usés et un prix inférieur.

En effet, l'incorporation séparée de fibres d'acier recyclées (FAR) et de laitier (L) dans le BAPR est largement étudiée. Cependant, l'effet combiné du laitier et des FAR dans les BAPR reste à éclaircir. Donc, l'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'effet des granulats issus de recyclage du béton, et analyser l'influence de la combinaison des fibres d'acier recyclées traitées (FART) et du laitier sur la rhéologie, les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du BAPR, afin de valoriser le maximum de GR. Pour atteindre notre objectif, quinze mélanges ont été préparés, dont un est un BAP de référence; deux sont des BAPR dans lesquels 25% de fins granulats naturels (FGN) ont été substitués par des fins granulats recyclés (FGR) et les gros granulats naturels (GGN) ont été remplacés partiellement (50%) et complétement (100%) par de gros granulats recyclés (GGR). Pour arriver aux objectifs fixés, les FART sont ajoutées séparément aux BAPR avec des fractions volumiques de 0.3%, 0.5% et 0.8%, et le ciment a été remplacé par le laitier une fois à 15% et une autre à 25%, gardant les mêmes pourcentages de granulats et de fibres recyclées. Un vaste programme expérimental a été mené pour évaluer les propriétés à l'état frais des BAPR renforcés à savoir : l'étalement, le temps d'écoulement et la résistance à la ségrégation; ainsi que la résistance à la compression et à la flexion, le module d'élasticité, la vitesse de pulsation ultrasonique, le retrait total, la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité à l'eau et aux ions chlorures à l'état durci, complété par des images au microscope par balayage.

La présente thèse est composée de quatre chapitres dont le premier est un état de l'art pour le recyclage des granulats de béton démolis et celui du laitier, montrant leurs influences sur le comportement du BAP à l'état frais et à l'état durci.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur le recyclage des fibres d'acier recyclées récupérées à partir de pneus usés. Il présente l'impact de l'addition de ces fibres sur les propriétés des bétons fibrés.

Le troisième chapitre présente les résultats de caractérisation des matériaux utilisés dans les différents mélanges de BAP, suivie par les méthodes de formulation adoptées pour la confection des mélanges et les différents essais réalisés.

Le dernier chapitre expose les résultats de l'effet des fibres d'acier recyclées traitées et du laitier sur l'ouvrabilité, les performances physico-mécaniques et la durabilité des BAPR.

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

CHAPITRE I : REVUE BIBIOGRAPHIQUE_BÉTON AUTOPLAÇANT À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ET DE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

1.1 Introduction

Ce chapitre de synthèse vise à résumer les travaux de recherche antérieurs qui ont été menés sur l'utilisation de granulats de béton recyclés provenant de déchets de construction et de démolition et leur influence sur les propriétés frais et durci des bétons autoplaçants, ainsi qu'une description des caractéristiques des bétons autoplaçants lors du remplacement du ciment par du laitier.

1.2 Les déchets

L'Algérie connait, actuellement, un développement économique et démographique sans précédent, le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, et cela ne s'est pas fait sans conséquences graves sur l'environnement. Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 millions de dollars [1], pour atteindre les objectifs inscrits dans le plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable. Selon la réglementation Algérienne, la loi 01-19 du 12 décembre 2001 définit le déchet comme tout résidu du processus de production, de transformation ou d'utilisation, abandonné par le détenteur et qui, par sa nature, produit des effets nocifs sur les écosystèmes naturels.

Le déchet est défini du point de vue économique comme tout objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur. Pour s'en débarrasser, il paye un service ou s'en charge lui-même. Du point de vue juridique, la définition du déchet permet de distinguer une conception subjective et une conception objective. Selon la conception subjective, une propriété devient un déchet lorsque le détenteur a la volonté de s'en débarrasser. Elle lui appartient aussi longtemps qu'elle demeure dans son espace privé. Cette propriété appartient à la municipalité lorsqu'elle est déposée sur la voie publique car, en effet, par cet acte, le détenteur manifeste clairement sa volonté de l'abandonner. Selon la conception objective, un déchet est tout objet dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté

du propriétaire et de sa valeur économique [2]. Le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 suggère une classification des déchets comme suit:

- déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux ;
- déchets ménagers et assimilés ;
- déchets inertes.

Selon le rapport de la gestion des déchets en Algérie [3], l'Algérie génère 2.550.000 tonnes/an de déchets industriels. Les stocks de déchets spéciaux en Algérie sont estimés à 2.8 millions de tonnes et la production de déchets spéciaux est estimée, quant à elle, à 325.000 tonnes/an. Compte tenu de la législation en vigueur et conformément au principe du pollueur payeur défini dans le cadre du Fonds National de l'Environnement et de Dépollution (FEDEP), chaque industriel est responsable des déchets qu'il produit et, à ce titre, il est tenu de les traiter. Néanmoins, le cadre législatif n'est pas encore suffisamment contraignant puisque les industriels préfèrent encore s'acquitter de la taxe de déstockage plutôt que traiter leurs déchets. Le gisement de déchets spéciaux est essentiellement centré dans les régions Est (1ère région productrice de déchets spéciaux), Centre et Ouest à savoir les wilayas d'Alger, Bejaïa, Skikda, Annaba, Tlemcen et Oran, en effet, 87% des déchets produits proviennent de ces zones, soient 282.000t/an et elles détiennent, à elles seules, 95% des déchets en stock [3]. D'autre part, le décret exécutif 541-8 n° 17 du 17 novembre 2011, classe les déchets du bâtiment et des travaux publics, c'est-à-dire les déchets provenant du secteur du bâtiment et des travaux publics (construction, réhabilitation, démolition et déconstruction dans les domaines du bâtiment et des travaux publics), comme des déchets inertes.

Le secteur de la construction a connu récemment une formidable expansion et l'utilisation du béton devrait doubler d'ici 2050 en raison du besoin croissant d'urbanisation [4]. Les granulats naturels représentent environ 70 % du volume de béton, ce qui laisse prévoir des taux d'épuisement alarmants des ressources naturelles non renouvelables telles que le sable et le gravier. Pendant une année, plus de 30 milliards de tonnes de granulats naturels ont été consommés dans le monde afin de produire du béton, cette consommation aurait atteint 66.3 milliards de tonnes en 2022, avec une estimation de 5% de l'augmentation moyenne de l'utilisation des granulats par an au niveau mondial [5].

Le secteur de la construction est considéré comme le plus grand émetteur de dioxyde de carbone et le plus grand consommateur d'énergie, représentant jusqu'à 45% du total du CO_2

mondial et 40 % environ de la consommation énergétique mondiale [6]. En outre, l'augmentation de la production de déchets de construction et de démolition, due à l'accroissement de la population, a suscité de nombreuses préoccupations dans le monde entier. Les déchets de béton représentent 70% des déchets de construction et de démolition (figure 1.1) [7] et plus de 6 milliards de tonnes de béton sont produits chaque année dans le monde [8]. Cette situation devient encore plus insoutenable lorsque le volume élevé de déchets de béton générés pendant la construction et à la fin de vie de toutes les formes de structures en béton est éliminé dans les décharges.

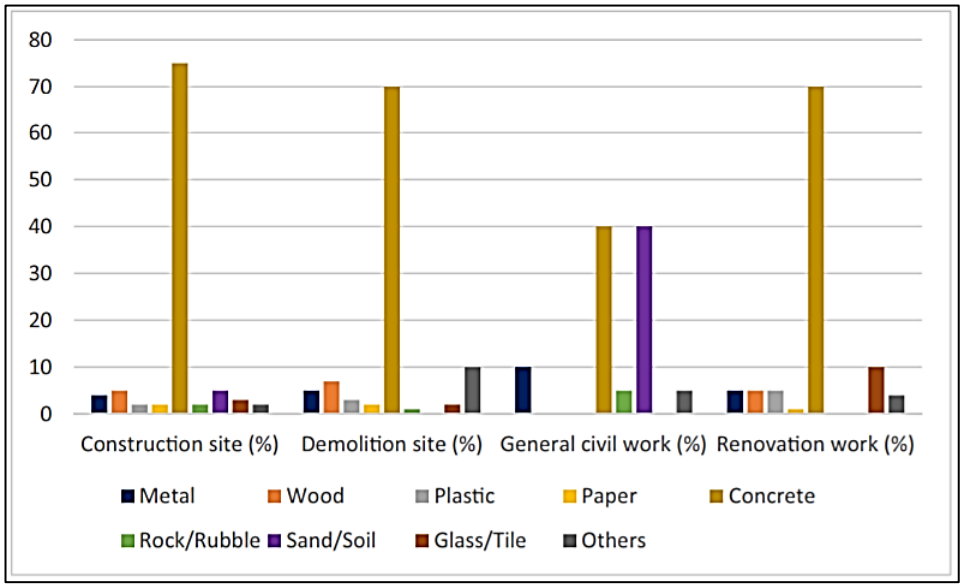


Figure 1. 1 : Composition typique des déchets de construction [7].

L'élimination de ces déchets pose plusieurs problèmes et a entraîné une dégradation des environnements locaux, de plus, le coût du transport pour jeter ces déchets dans les décharges est très élevé. Grâce à la sensibilisation croissante et à l'adoption de stratégies plus écologiques dans le domaine de la construction, l'utilisation des déchets de construction et de démolition comme granulats recyclés en remplacement des granulats naturels est la meilleure solution pour minimiser la consommation des ressources naturelles. Cela permet de réduire la demande de granulats naturels qui est une ressource naturelle non renouvelable et en voie d'épuisement, de résoudre aussi les problèmes de mise en décharge et d'amoindrir la pollution environnementale locale suite à la diminution de l'exploitation des carrières.

1.3 Avantages d'utilisation des granulats recyclés

Les arguments de l'utilisation des fins et gros granulats recyclés des déchets de construction et de démolition sont les suivants :

-la réduction du CO_2 : au cours de la dernière décennie, l'extraction de matières premières (sable et gravier naturels), l'expansion des infrastructures, l'accumulation des déchets de construction et de démolition augmentent les émissions de CO_2. Le recyclage des granulats recyclés permet d'économiser une quantité importante d'énergie et de réduire la quantité de CO_2 et d'autres polluants atmosphériques émis par la fabrication des granulats. En effet, la production d'une tonne de granulats naturels (sable et gravier concassé) émet 23 kg à 33 kg de CO_2, tandis que la production d'une tonne de fins granulats recyclés génère 12 kg de CO_2 [9].

-la réduction de l'extraction des matières premières : les fins et gros granulats sont les composants les plus importants du béton. En raison de l'augmentation rapide de la production et l'utilisation excessive du béton, la consommation de granulats naturels augmente également. Cependant, leurs quantités diminuent et leur extraction pose des sérieux problèmes, ainsi, l'utilisation des fins et gros granulats recyclés peut résoudre ces problèmes.

-le coût : les fins et gros granulats recyclés sont moins coûteux que les granulats naturels. Il est souhaitable d'utiliser des granulats de béton recyclés dans la production de béton du moment qu'ils sont moins chers que les granulats naturels et ils n'augmentent pas la demande de composants coûteux du béton, en particulier le ciment. En outre, en réduisant l'extraction de granulats naturels, les coûts d'aménagement et de valorisation peuvent diminuer [10].

1.4 Propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés

Les granulats recyclés (GR) sont produits par concassage et tamisage. En général, les GR dont la taille des particules est supérieure à 5 mm sont appelés gros granulats recyclés (GGR) et les GR dont la taille des particules est inférieure à 5 mm sont appelés fins granulats recyclés (FGR) [11]. Les GGR ont été largement utilisés pour remplacer les gros granulats naturels (GGN) dans la préparation du béton recyclé, mais les FGR sont rarement adoptés.

A l’échelle macroscopique, les granulats recyclés sont considérés comme des matériaux biphasés, cela veut dire que les agrégats et le mortier sont collés ensemble. A l'échelle microscopique, il existe une troisième phase de granulats recyclés, qui est une interface entre les granulats et le mortier adhéré "zone de transition interfaciale" (ZTI), elle est représentée dans la figure 1.2. Ces deux composants influencent les propriétés physiques et mécaniques des GR.

Le mortier fixé sur les GR est la cause profonde de la différence de porosité et de l'absorption d'eau entre les GR et les GN. En outre, une grande porosité représente généralement une grande absorption d'eau. La variation dans l'absorption d'eau a été observée par Ma et al. [14] qui ont rapporté une absorption d'eau aussi importante, de l’ordre 11.63% pour les FGR mais de 4.9% seulement pour les GGR provenant du même béton. Cela montre une augmentation de 137% d'absorption d'eau des FGR par rapport à celle des GGR. La capacité élevée d'absorption d'eau des FGR affecte directement le rapport eau/ciment effectif de la pâte dans les matériaux à base de ciment, ce qui donne une mauvaise ouvrabilité à l'état frais [15]. Par ailleurs, les GR ont une densité inférieure à celle du GN. Comme le mortier a une porosité plus élevée et une densité plus faible que celles des agrégats naturels, la densité des granulats de béton recyclés est toujours inférieure à celle des granulats naturels [16].

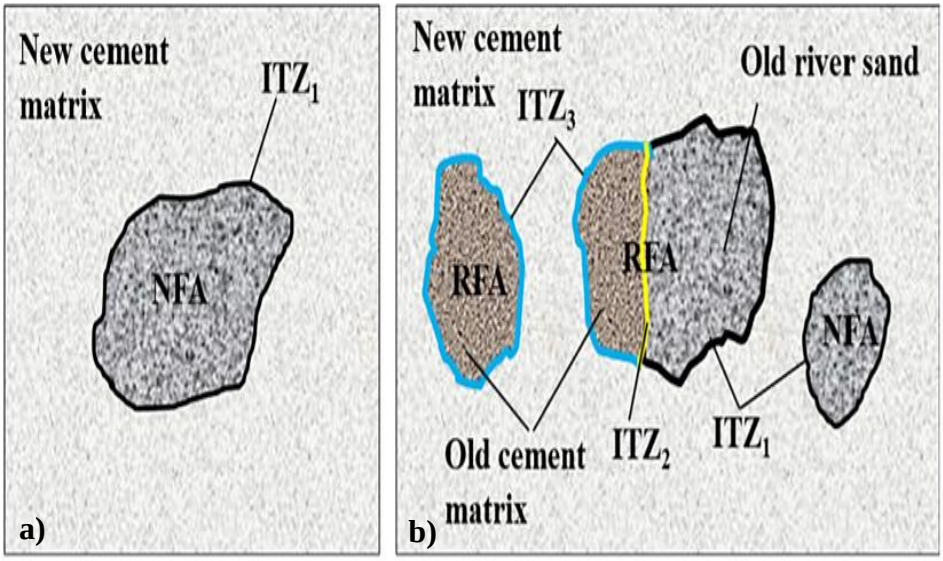


Figure 1. 2 : Les différentes types de ZTI : (a) FGN et (b) FGR [12].

Généralement, les granulats recyclés sont rugueux et de forme angulaire (figure 1.3), en raison du mortier adhéré et du processus de concassage. Le granulat recyclé constitué de granulats et d'ancien mortier obtenu à partir du concassage de déchets de béton et dépend du béton d'origine.

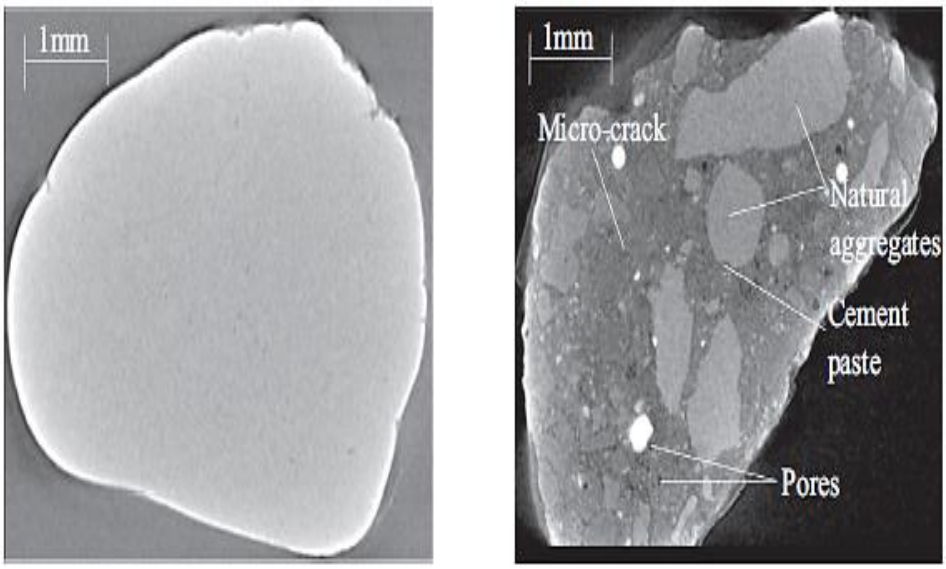


Figure 1. 3 : Images du MEB : (a) FGN ; (b) FGR [13].

D'autre part, le squelette principal du béton est représenté par des granulats. Les granulats peuvent aussi jouer un rôle majeur dans la résistance à la déformation due au retrait, qui dépend essentiellement de son module d'élasticité [17]. De plus, le module d'élasticité du béton dépend de ses granulats car le module d'élasticité des granulats est supérieur à celui du ciment. Le module d'élasticité du granulat recyclé est inférieur à celui du granulat naturel, ce qui peut se traduire par une diminution du module d'élasticité du béton de granulats recyclés. En effet, le module élastique du vieux mortier attaché aux agrégats est inférieur à celui du granulat naturel [18]. En outre, la réduction du module d'élasticité diminue la contrainte fournie par le granulat et augmente le retrait de séchage. Les FGR ont un module d'élasticité plus faible en raison d'une plus grande quantité de mortier adhéré [19], par rapport au GGR, cependant, l'utilisation de FGR peut entraîner un retrait de séchage plus important dans le béton recyclé.

1.5 Béton autoplaçant à base de granulats recyclés

L'utilisation du béton autoplaçant (BAP) s'est étendue dans le monde entier en raison des avantages de la production et de sa haute performance et pour résoudre les problèmes engendrés par l'industrie de la construction [20].

Le terme "béton autoplaçant" désigne un béton qui peut être coulé dans un coffrage et se consolider sous son poids sans vibrations supplémentaires ou externes. Le BAP, ayant une excellente fluidité et capacité de remplissage, peut s'écouler autour des coffrages complexes et des armatures, disposées avec de petits espacements, avec une haute résistance à la ségrégation [20], ces propriétés sont généralement renforcées par l'ajout de superplastifiants. Les différences les plus significatives entre un BAP et un béton ordinaire (BO) sont liées à leurs comportements à l'état frais. Afin de respecter les exigences d'ouvrabilité d'un BAP, les caractéristiques suivantes doivent être analysées : la capacité d'écoulement (remplissage), la capacité de passage (fluidité), la viscosité et la stabilité (résistance à la ségrégation) [21].

L'élimination des vibrations lors la mise en place du BAP, permet d'obtenir des économies n'ayant plus besoin d'équipement de vibration ni de main-d'œuvre qualifiée. Afin d'accroître l'utilisation des BAP par l'industrie de la construction, il est essentiel de réduire le coût des matières premières. Par exemple, la réduction du superplastifiant et le remplacement d'un pourcentage de ciment par des ajouts cimentaires peut maintenir les propriétés d'auto-compactage et permet d'obtenir un BAP plus économique [22]. D'autre part, ce type de béton a un impact écologique sur l'environnement car il facilite l'ajout de sous-produits industriels et de matériaux recyclés (d'où réduction de CO_2), à savoir, l'incorporation de déchets de construction et de démolition dans les BAP.

Le développement du BAP est considéré comme une réalisation importante et, en raison de ses propriétés améliorées par rapport au béton ordinaire, il est possible d'incorporer des GR pour compenser la réduction des performances du béton ordinaire fabriqué avec des GR. Le BAP est un matériau composite à deux phases, où la phase granulaire est dispersée dans la phase de la pâte [23], il est possible de modifier l'une ou l'autre pour obtenir des propriétés personnalisées ou meilleures du béton. La réduction des propriétés finales due à la faible qualité des granulats provenant de déchets de construction et de démolition peut être optimisée en ajustant la poudre et la teneur en eau, ce qui permet d'améliorer la force d'adhérence et la compatibilité élastique entre le mortier de ciment et les gros granulats

[24]. Pour cela, le BAP peut être le meilleur récepteur pour les GR, vu la précision de la quantité de pâte [25], qui donne un meilleur comportement d'écoulement, un meilleur raffinement de la microstructure et du réseau de pores qui permettent, ainsi, d'atteindre une perméabilité plus faible [24].

1.6 Influence des granulats recyclés sur les propriétés du BAP à l'état frais

1.6.1 Effet des granulats recyclés sur la densité

En termes de densité, Manzi et al. [16] ont déclaré que la masse volumique apparente fraîche du béton de granulats recyclés était inférieure à celle du béton vibré ordinaire et inférieure à la densité apparente fraîche du BAP conçu avec des GN. Ils ont obtenu une valeur de 2.22 g/cm^3 avec une utilisation de 100% de GGR, comparée à 2.34 g/cm^3 pour le béton témoin. Ce résultat a été attribué à la densité plus faible des GR, causée principalement causée par le mortier attaché.

Singh et al. [26] ont abouti aux mêmes constatations, en utilisant des GGR d'une densité de 1.371 g/cm^3, qui est inférieure à celle des GGN (1.542 g/cm^3). Par conséquent, les auteurs ont constaté que la substitution par des granulats recyclés engendre une diminution négligeable qui ne dépasse pas 5% lorsque 50% et 100% de GGR ont été remplacés.

1.6.2 Effet des granulats recyclés sur l'ouvrabilité

Les propriétés fraîches sont mesurées par des formules empiriques et des méthodes d'essai spécifiques; pour la fluidité : essai d'affaissement; pour la viscosité : le temps T50 ainsi que le temps de l'entonnoir en V. Pour la capacité de passage : L-Box et J-Ring sont les plus courants; enfin, pour la résistance à la ségrégation, l'essai de ségrégation sur tamis est le plus utilisé.

Plusieurs chercheurs ont analysé les différents aspects qui affectent l'ouvrabilité des BAP : les variations de l'eau, de ciment, de superplastifiant dans la formulation du mélange et des caractéristiques de granulats recyclés (coefficient de forme, module de finesse, teneur en fines). Il a été conclu que de petits changements dans ces paramètres affectaient plus le BAP recyclé que le béton vibré ordinaire. Les dosages de ce type de béton doivent être étudiés avant et les conditions du lieu de mélange (par exemple, l'humidité ambiante) doivent être parfaitement contrôlées [27, 28].

Concernant l'effet des granulats recyclés sur l'ouvrabilité des BAP, Fiol et al. [29] ont montré que les différentes formulations des BAP recyclés (BAPR) sont conçues pour donner un étalement par le cône supérieur de 550 mm ± 01 mm. Cela ne peut être atteint que par l'utilisation d'une quantité variable et croissante de superplastifiant, car l'utilisation des GR a entraîné une réduction du rapport E/C en fonction de la teneur en GGR, en raison du coefficient d'absorption d'eau élevé des GR et du frottement interne entre les GR dans la matrice de ciment. Cependant, l'augmentation du taux de GGR de 50 à 100% a fait passer le dosage d'adjuvant de 1.8 à 2.85 kg/m^3 de béton frais. L'augmentation de la teneur des GR a augmenté le temps d'étalement (T50) qui correspond au moment où le béton s'étale jusqu'à un diamètre de 50 cm et il s'agit aussi d'une mesure de la vitesse d'écoulement, d'une indication de la viscosité relative du BAP et de la résistance à la ségrégation.

D'autre part, Kou et Poon [30] ont constaté que l'étalement d'un BAP augmente avec l'accroissement de la quantité de FGR, plus la teneur en FGR augmente, plus la quantité d'eau ajoutée augmente. L'étalement minimal est de 760 mm et le rapport de remplissage varie entre 0.85 et 0.94. D'après Revilla-Cuesta et al. [31], l'ajout d'eau dans les BAPR à base de 100% des GGR et des FGR (0%, 25%, 50%, 75% et 100%) a conduit à un étalement et une capacité de passage plus élevés. Cependant, il n'a pas été possible de compenser tous les effets négatifs des GR en augmentant la proportion d'eau, car la viscosité a été affectée négativement, ce qui a entraîné une augmentation du temps de vidange de l'entonnoir en V (Tv).

De nombreuses tentatives pour répondre aux critères d'ouvrabilité ont été rapportées dans la littérature. Elles peuvent être classées en quelques catégories, pré-saturation des granulats avant leur utilisation, modification de la composition du mélange ou bien introduction des ajouts minéraux dans le BAP.

Différentes conditions d'humidité des GR ont été analysées par Gonzalez-Taboada et al. [32, 33], des BAP ont été conçus avec des GGR (20 %, 50 % et 100 %) et trois situations différentes ont été considérées : granulat sec et eau supplémentaire (M1), granulat pré-saturé (M2) et granulat avec 3 % d'humidité naturelle et eau supplémentaire dans le mélange de béton (M3). La principale conclusion était que M2 était effectivement adapté à la fabrication des BAP et que la meilleure méthode pour garantir la fluidité dans le temps était de pré-saturé le granulat. Bien que M2 ait été la meilleure méthode, les auteurs ont affirmé que la pré-saturation des granulats, en tant que procédure industrielle, nécessiterait

un temps excessif et pourrait ne pas être rentable, ce qui explique pourquoi M3 a été la méthode la plus utilisée.

Dans la littérature, à l'exception des mesures d'ouvrabilité, très peu d'études associées aux paramètres rhéologiques ont été effectuées afin d'étudier l'écoulement du béton incorporant des GR. Carro-López et al. [34] ont étudié le comportement d'écoulement du béton qui traite des paramètres rhéologiques du BAP. Les résultats montrent que l'absorption élevée d'eau des FGR qui élimine l'eau du mélange avec le temps modifie la rhéologie du béton en béton vibré, et, ne se comporte plus comme un BAP. La limite d'élasticité dans le temps et la viscosité plastique de tous les remplacements ont enregistré une augmentation avec une perte complète de la capacité de passage après 45 minutes, sauf pour un ratio de remplacement de 20% qui n'a montré aucun changement dans l'ouvrabilité.

1.7 Influence des granulats recyclés sur les propriétés du BAP à l'état durci

1.7.1 Effet des granulats recyclés sur la résistance à la compression

La littérature a montré que l'effet de l'incorporation des GR sur les propriétés mécaniques du BAP dépend de différents paramètres tels que l'état hybride, le pourcentage de remplacement, la taille et la qualité (béton d'origine) des GR, les matériaux cimentaires supplémentaires et le rapport E/C.

Tang et al. [35] ont constaté que le remplacement des GGN par du béton recyclé de l'ordre de 100% dans un BAP, a entraîné une réduction de la résistance à la compression de 10%. Les auteurs ont considéré que la réduction de la résistance est due à la grande quantité d'eau absorbée, qui entraine une teneur en eau insuffisante et une mauvaise hydratation réduisant ainsi le développement de la résistance dans le béton. Ils ont, aussi, indiqué que même avec une réduction de 10%, pour une substitution par 100 % de GGR, l'utilisation des GGR est convenable.

Pereira-de-Oliveira et al. [36] et Safuddin et al. [37] ont constaté une légère réduction de la résistance à la compression lorsque le taux d'incorporation des GGR augmente, une différence de 5% pour le BAP avec des GN et 12.2% pour le BAP avec des 100% de GGR, respectivement. Ils ont conclu que les GGR n'avaient pas d'influence significative sur la performance mécanique considérant le volume élevé de pâte qu'ils contiennent. La même tendance a été conclue par Grdic et al. [38] montrant ainsi que l'incorporation de 50% et

100% de GGR a diminué la résistance à la compression du BAPR de 3.88% et 8.55%, respectivement, par rapport au BAP de GN.

Au contraire, Fiol et al. [29] ont analysé des mélanges de béton avec des pourcentages de 50% et 100% de GGR et ont obtenu des valeurs de la résistance à la compression des BAPR supérieures à celles des BAP non recyclés. Pour 100% de GGR (E/C=0.38), la résistance à la compression était supérieure de 20% environ. Les auteurs ont expliqué leurs résultats par l'absorption d'eau élevée des GR par rapport à celles des GN, la quantité constante d'eau ajoutée à tous les mélanges et l'état sec des granulats, tous ces facteurs ont produit un rapport E/C effectif plus faible, ce qui a favorisé une résistance à la compression plus élevée.

D’autre part, l'incorporation de faibles quantités de FGR dans les mélanges de BAP n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression, selon les études de Manzi et al. [16], qui ont utilisé des pourcentages de FGR compris entre 12% et 19%. Ces résultats ont été corroborés par Campos et al. [39], qui ont utilisé un pourcentage de substitution de l’ordre de 20% de FGR et qui ont obtenu une diminution de la résistance à la compression de seulement 5%, qui est principalement attribuée aux FGR. Néanmoins, le même effet était plus prononcé pour des substitutions plus élevées, comme l'ont démontré Carro-Lopez et al. [34] avec un pourcentage de substitution de 100% de FGR et un rapport eau/ciment constant, qui a réduit la résistance à la compression d’environ 40 %.

Dans le cas d'une utilisation combinée de FGR et GGR, Kou et Poon [30] ont montré globalement que la résistance à la compression est relativement insensible au faible taux d'incorporation de FGR et les meilleurs résultats ont été obtenus pour 25% de remplacement de FGR dans les BAP à base de 100% de GGR. Kapoor et al. [40] ont déclaré que les GR n’ont pas d’influence significative sur la résistance à la compression. Ils ont aussi montré que l’incorporation de 25% de FGR dans les compositions des BAP avec 50 et 100% de GGR augmente légèrement la résistance en raison des propriétés auto-cimentaires des FGR.

Des résultats divergents sont, par contre, présentés dans d’autres études. Selon les résultats de Sasanipour et al. [41] l’emploi de GGR à 50% et 100% dans les mélanges des BAP réduit la résistance à la compression de 35% et 42%, respectivement; et le remplacement de 25% de FGR réduit la résistance à la compression de 29% à 90 jours. La diminution de la résistance est attribuée à la formation d'une faible ZTI, à la formation de

fissures dans les GR pendant le processus de préparation des GR et à la porosité du mortier adhéré aux GR.

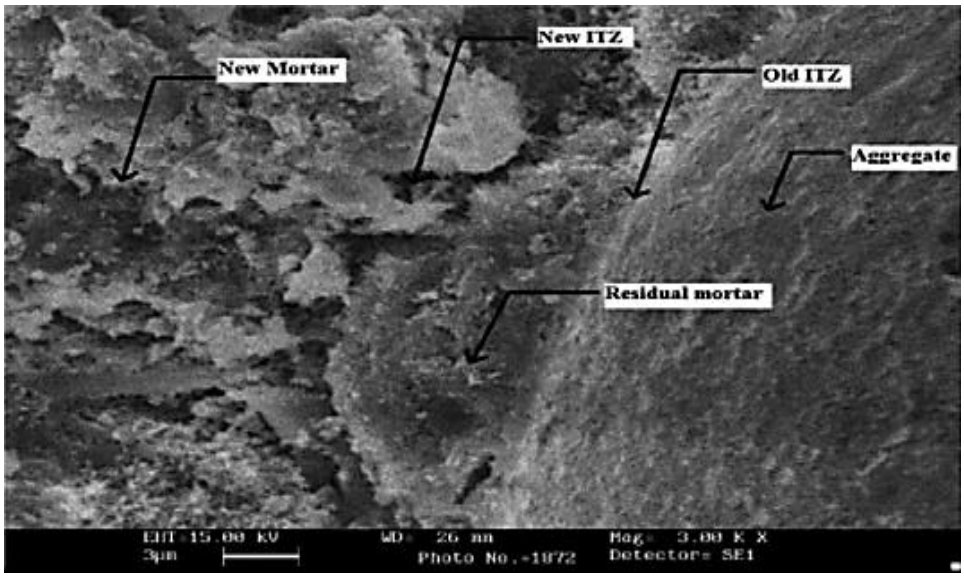


Figure 1. 4 : Image du MEB du BAP à base de GR [40].

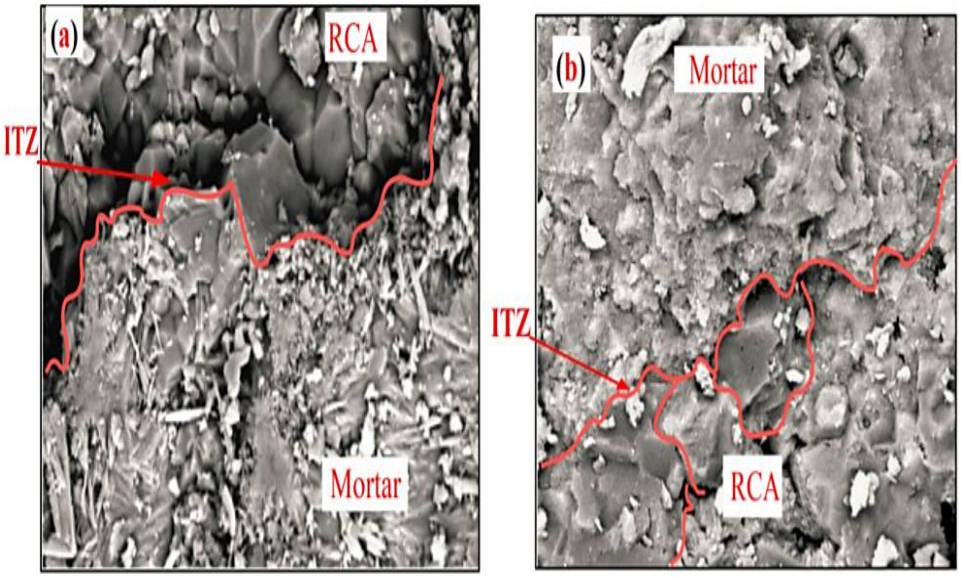


Figure 1. 5 : Image du MEB de ZTI entre les GR et nouveau mortier ; (a) béton de 100% de GN ; (b) béton de 25% de GR [43].

Les résultats de Kouider Djelloul et al. [42] ont montré que la résistance à la compression a diminué en augmentant le taux de substitution des GR avec une chute de la

résistance de l'ordre de 14.6% pour le BAP à base de 100% de GR. En effet, la présence des GR et l'augmentation de leur pourcentage de remplacement engendrent une formation d'un nombre plus élevé des faibles ZTI (Figure 1.4, 1.5) qui peut ainsi entraîner une réduction de la résistance à la compression [40, 43].

1.7.2 Effet des granulats recyclés sur la résistance à la traction

La résistance à la traction (par fendage ou par flexion) du béton est faible par rapport à la résistance à la compression, mais on doit l'établir pour caractériser le béton. L'influence de déchets de bétons sur la résistance à la traction par fendage et sur la résistance à la traction par flexion était similaire à leur effet sur la résistance à la compression.

Tuyan et al. [44] ont constaté que la résistance à la traction par fendage diminue lorsque le taux d'incorporation de GGR augmente, ce qui est justifié par :

-la faible résistance des granulats recyclés par rapport à celle des granulats naturels.

-la grande porosité des granulats recyclés.

-la qualité d'adhérence dans la zone de connexion entre le granulat recyclé- l'ancien mortier et la nouvelle pâte de ciment (faible ZTI).

-la dernière raison est liée au rapport E/C ; lorsque le rapport E/C augmente, la résistance à la traction par fendage diminue de manière significative [44].

Selon Modani et Mohitkar [45], la substitution de 100% de gros granulats naturels par des granulats de béton recyclés engendre une réduction de la résistance à la traction par fendage du BAP de l'ordre de 36% (Figure 1.6). Les auteurs ont constaté que la rupture du BAPR se produit dans la faible ZTI entre le GR et le vieux mortier qui y adhère. L'endommagement se réfère à la modification de la microstructure du matériau qui peut conduire à la fissuration. Les fissures débutent d'abord dans les régions de l'ancienne ZTI et de la nouvelle ZTI, puis, ils ont augmenté en longueur, largeur et en quantité avec l'augmentation de la charge appliquée [46].

Par ailleurs, les résultats de la résistance à la traction par fendage obtenus par Grdic et al. [38] sont présentés dans la figure 1.7. Comme pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage diminue lorsque le taux de remplacement augmente et lorsque le rapport E/C augmente. Cela est dû à la faible liaison entre l'ancien mortier contenu dans les GR et les GN d'origine auxquels le mortier colle.

En outre, d'autres auteurs [16, 29] ont estimé que l'utilisation des bétons démolis sous forme de fins et/ou gros granulats recyclés diminue la résistance à la flexion, ils ont expliqué la chute de la résistance à la traction par flexion par les raisons de la chute de la résistance à la traction par fendage.

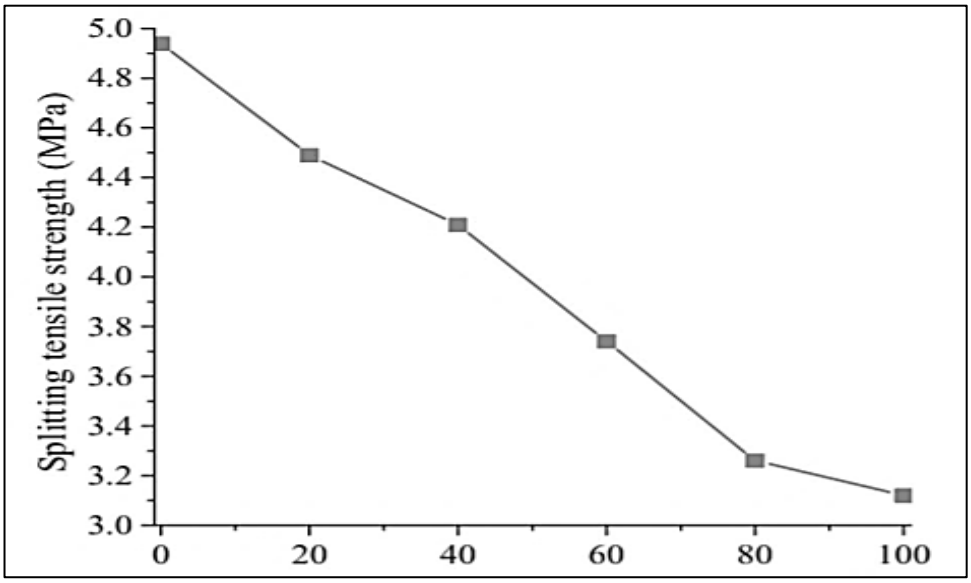


Figure 1. 6 : Influence du taux de substitution de GGR sur la résistance à la traction par fendage [45].

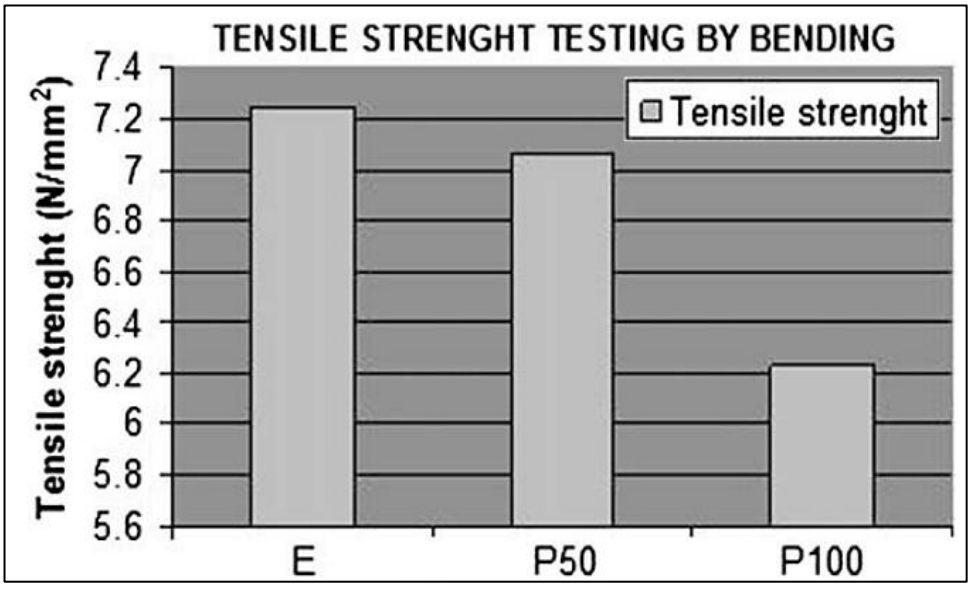


Figure 1. 7 : Influence du taux de substitution de GGR sur la résistance à la traction par fendage [40].

1.7.3 Effet des granulats recyclés sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton est un paramètre fondamental dans la conception des structures en béton car il permet de prévoir le comportement de la structure en cours de service sous l'action d'une charge et de déterminer la répartition des déformations et des déplacements [47]. En outre, le module d'élasticité du béton indique la rigidité et la fragilité du béton. Un module d'élasticité plus élevé entraîne une plus grande rigidité de la structure (il faut plus de force pour déformer ou détruire la structure).

L'analyse du comportement des matériaux sous l'action des charges est exprimée par la relation entre la déformation et l'effort qui la provoque. Cette liaison est obtenue expérimentalement sous forme d'un diagramme. L'allure de ce diagramme est la principale caractéristique des matériaux techniques parce qu'elle permet de classer les matériaux selon leurs possibilités d'utilisation dans divers types d'ouvrages [48].

Le diagramme contrainte-déformation du béton est obtenu en testant des éprouvettes en compression axiale sur des machines, à une vitesse de chargement constante et d'une façon très proche d'un chargement statique. En étudiant la fonction contrainte-déformation représentée sur un diagramme, on considère que l'expression "module élastique statique" d'un matériau, ne peut être appliquée que sur le seul segment linéaire de la courbe contrainte-déformation [49]. Cependant, le module d'élasticité dynamique est déterminé à l'aide d'un test non destructif avec zéro contrainte appliquée et, par conséquent, on n'y relève ni micro fissure, ni fluage pendant le test [50].

Le module d'élasticité du béton augmente lorsque la résistance à la compression augmente. Cette même hypothèse peut être appliquée à un mélange granulaire identique comme le BAP. Le module d'élasticité du béton est conditionné par le module d'élasticité du granulat et de la pâte de ciment et par les proportions volumétriques introduites dans le mélange et cela par analogie à l'idée proposée par Neville sur le béton conventionnel [49].

Dans l'étude de Pereira-de-Oliveira et al. [36], les auteurs ont constaté que l'incorporation de GGR a réduit le module d'élasticité dynamique. La diminution est d'environ 3% pour un remplacement de 40% et de 7% pour un remplacement de 100% à 28 jours. Cette réduction est influencée par la densité du BAP à l'état durci, étant donné que la détermination du module d'élasticité dépend de la densité. La réduction du module d'élasticité dynamique s'explique par la faible rigidité des GGR par rapport aux GGN, en

raison du vieux mortier adhérant au granulat naturel d'origine, et, également, par la faible déformabilité de ce vieux mortier.

La même constatation a été observée par Gesoglu et al. [51], la substitution avec de fins et/ou gros GR a diminué le module d'élasticité statique à cause de la porosité présente dans le mortier adhéré, qui affecte négativement le module des BAPR. Comme pour la résistance à la compression et la résistance à la traction, les granulats recyclés réduisent généralement la valeur du module d'élasticité des BAPR qui diminue lorsque le taux de remplacement augmente. La figure 1.8 montre une forte corrélation, à 56 jours, entre le module d'élasticité et la résistance à la compression : R^2 = 0.93, pour la résistance à la traction et la résistance à la compression R^2 = 0.90, ce qui permet de conclure qu'il existe un lien fort entre les trois propriétés [51].

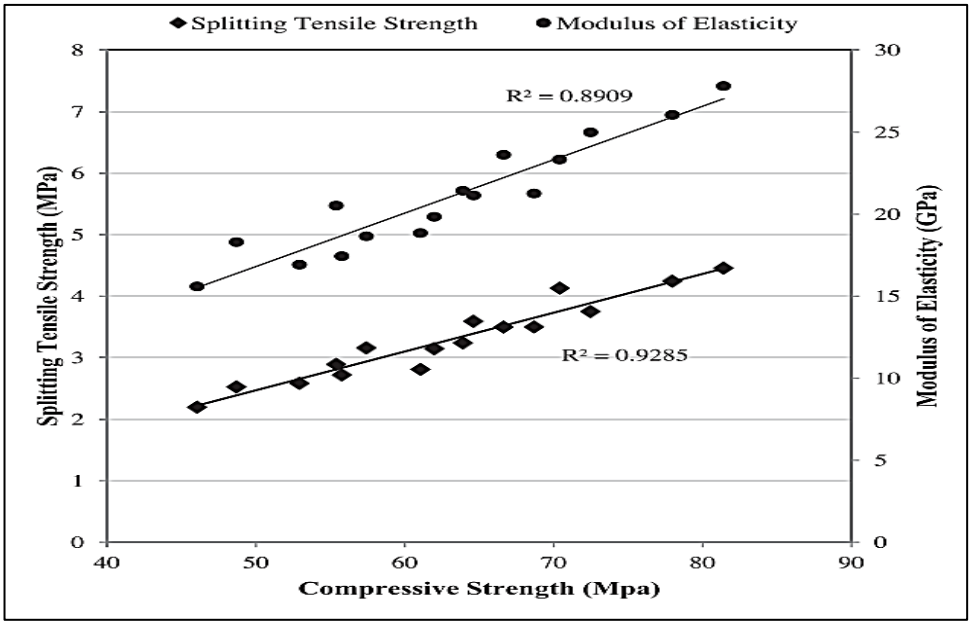


Figure 1. 8 : Corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAP [51].

Uygunoğlu et al [52] ont constaté que les BAP avec de gros granulats de marbre ont un module d'élasticité statique plus faible que ceux avec de gros granulats naturels ou du béton démoli. Cela est justifié par la forme plus allongée de ces agrégats et leur liaison plus faible avec la matrice cimentaire.

1.7.4 Effet des granulats recyclés sur le retrait

Le retrait est fortement influencé par le processus d'hydratation et il est plus prononcé au cours des premières heures et des premiers jours, en raison de la réaction d'hydratation du ciment, appelée retrait de séchage. Par la suite (environ une semaine après l'hydratation), le retrait à long terme commence, il dure pendant toute la durée de vie du béton [53]. Ce processus de retrait est similaire au BAP. Généralement, l'incorporation de GR dans le BAP entraîne une augmentation des valeurs de retrait total et diminue la résistance à la fissuration.

Kou et Poon [31] ont constaté que le retrait total augmente avec le temps et avec le taux d'incorporation des FGR. Le retrait est légèrement plus élevé pour le béton à faible taux de substitution de FGR (25%) par rapport au BAP témoin (uniquement GN) que pour les bétons à fort pourcentage de FGR (50%, 75% et 100%). L'augmentation du retrait total était de 182% (E/C=0.53) et de 100% (E/C=0.44) pour une incorporation de 100% de FGR. Cela s'explique par la très grande porosité, la faible densité et la forte capacité d'absorption d'eau des FGR (en raison du mortier durci contenu dans les FGR), qui réduisent leur rigidité et leur capacité à limiter la déformation. Il a était, également, conclu que l'augmentation du retrait total causée par l'incorporation de FGR peut être contrôlée dans une certaine mesure en réduisant le rapport E/C (Figure 1.9). En effet, la présence du ciment non hydraté dans le mortier adhéré aux granulats a provoqué une diminution du rapport E/C effectif, ce qui a conduit à un excès d'eau et à un retrait moindres.

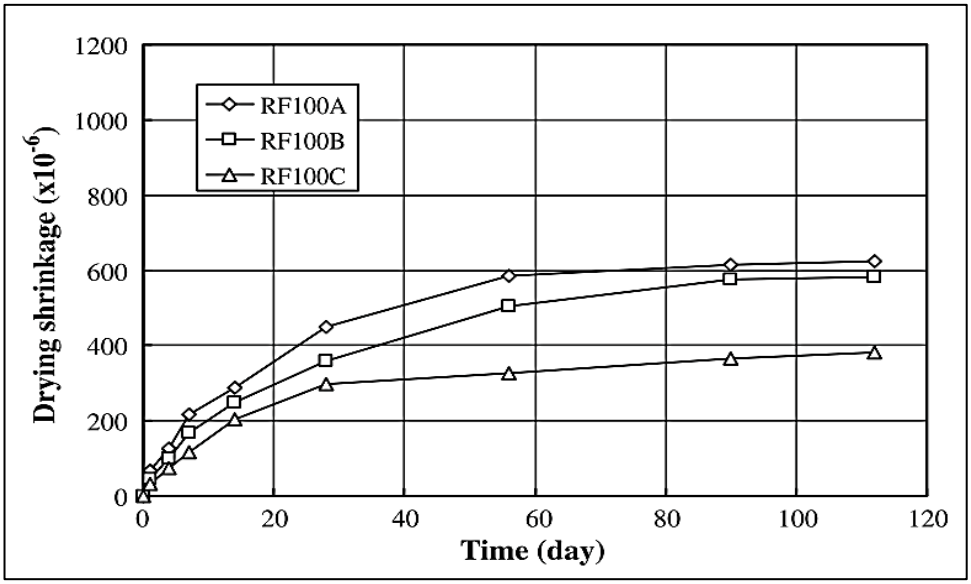


Figure 1. 9 : Retrait de séchage pour les BAP à base de GR [31].

De même, Rajhans et al. [54] ont constaté que plus le pourcentage de substitution de granulats naturels par de GGR est élevé, plus l'absorption d'eau et le retrait de séchage des BAPR sont importants.

Manzi et al. [55, 16] ont observé que le retrait de séchage expérimenté pour tous les BAP était le même quelle que soit la quantité de fins et/ou gros granulats recyclés. Les auteurs ont montré une contrainte rapide de retrait dans les trois premiers mois. Par la suite la pente des courbes diminue avec le temps, devenant presque plate dix mois plus tard.

1.7.5 Effet des granulats recyclés sur la vitesse de pulsation ultrasonique

La vitesse de pulsation ultrasonique (VPU) est, à son tour, liée à la mesure de la porosité et de la qualité de toute zone de transition interfaciale présente dans le béton qui empêche la propagation de l'onde VPU. Elle dépend également de la densité du béton, cette propriété diminue avec des quantités plus importantes de GR. Fiol et al. [62] ont constaté que la réduction de la VPU était, en moyenne, d'environ 5% avec 100% de GGR, elle est attribuée à la faible rigidité des GR par rapport aux GN, réduisant ainsi la vitesse des ondes ultrasoniques.

La VPU peut être évaluée comme un indicateur de la teneur des pores du BAP. En outre, cette dernière est plus grande dans le BAP avec des GN, en raison de la meilleure adhérence entre eux et la pâte, ce qui rend le BAP plus compact. Par contre, le BAP avec des GR présente une faible vitesse vu leur nature poreuse et leur faible densité à cause de l'ancien mortier adhéré qu'ils contiennent [52].

D’autre part, Uygunoğlu et al. [52] ont montré que la VPU est insensible aux variations de E/C, ils ont remarqué une légère diminution de la VPU du BAPR avec 100% de GGR d’environ 6 % et 13.7%.

Par contre, les résultats de Tuyan et al. [44] ont montré que la VPU diminue avec l’accroissement du rapport E/C et du taux d'incorporation de GGR. La diminution de la VPU est de 9%, lorsque E/C égale 0.43 avec 60% de GGR incorporés et une diminution de 4%, avec un rapport E/C égal à 0.48 et 0.53 et 60% de GGR incorporés; cela est justifié par la faible densité des GGR. Lors de l'augmentation du rapport E/C (avec une teneur constante du ciment dans tous les mélanges), la VPU diminue, la matrice étant moins dense.

1.8 Influence des granulats recyclés sur les propriétés de transport du BAP

En termes de propriétés de transport (durabilité), il a été conclu que l'incorporation de granulats recyclés était responsable de mauvais résultats mais ne compromettait pas leur utilisation dans le béton [56].

1.8.1 Effet des granulats recyclés sur l'absorption d'eau

Le mortier attaché aux granulats recyclés a un effet négatif sur l'absorption d'eau du béton conçu. Cela est dû au ciment non hydraté présent dans le mortier attaché, qui augmente les niveaux d'absorption d'eau du béton conçu avec des GR. Cet effet est plus important lors de l'utilisation des FGR [57].

L'absorption d'eau par immersion enregistre une mauvaise performance lors de l'emploi des GR. Grdic et al. [38], en analysant l'absorption d'eau par immersion du BAPR (Figure 1.10), ont constaté que cette dernière augmente avec le taux d'incorporation de GGR, l'augmentation est d'environ 67% pour une incorporation de 100%. Cette tendance est non seulement attribuée à la grande absorption d'eau des GR par rapport aux GN mais aussi à l'augmentation graduelle du rapport E/C. Modani et Mohitkar [45] ont également constaté que l'absorption d'eau par immersion augmente avec l'incorporation de GGR, l'augmentation est d'environ 41% pour une incorporation de 100%.

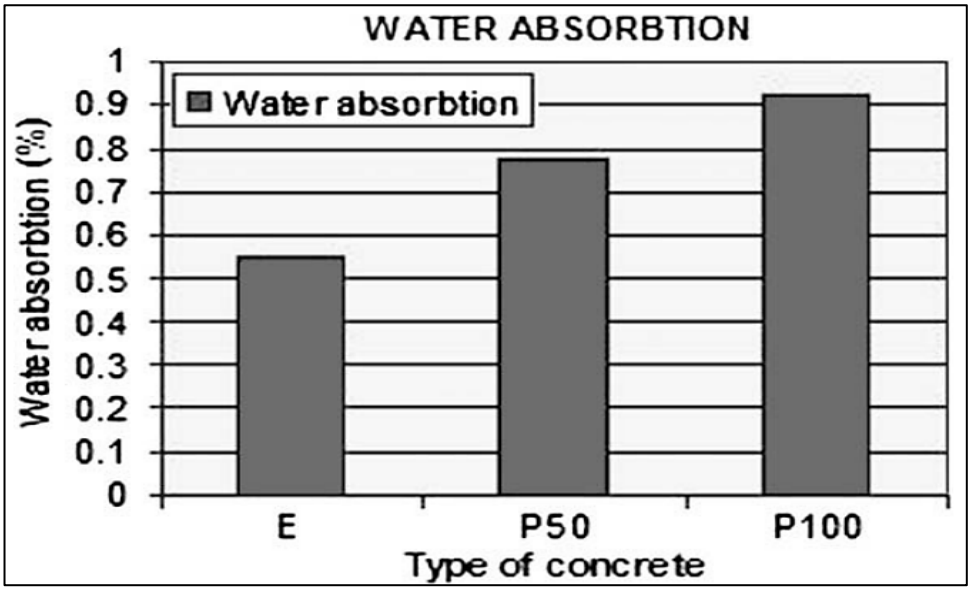


Figure 1. 10 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction des GR [38].

D’autre part, Tuyan et al. [44] ont constaté que l'absorption d'eau par immersion augmente avec l’augmentation de la teneur en GGR (Figure 1.11). Pour un taux d'incorporation de GGR de 60%, ils ont observé une augmentation d’absorption d’eau de 3.0%, 3.5% et 4.5% pour un rapport E/C de 0.43, 0.48 et 0.53, respectivement, par rapport au mélange de référence. Les auteurs indiquent aussi que le remplacement des GN par des GR entraîne une augmentation de l’absorption d’eau par capillarité des BAP.

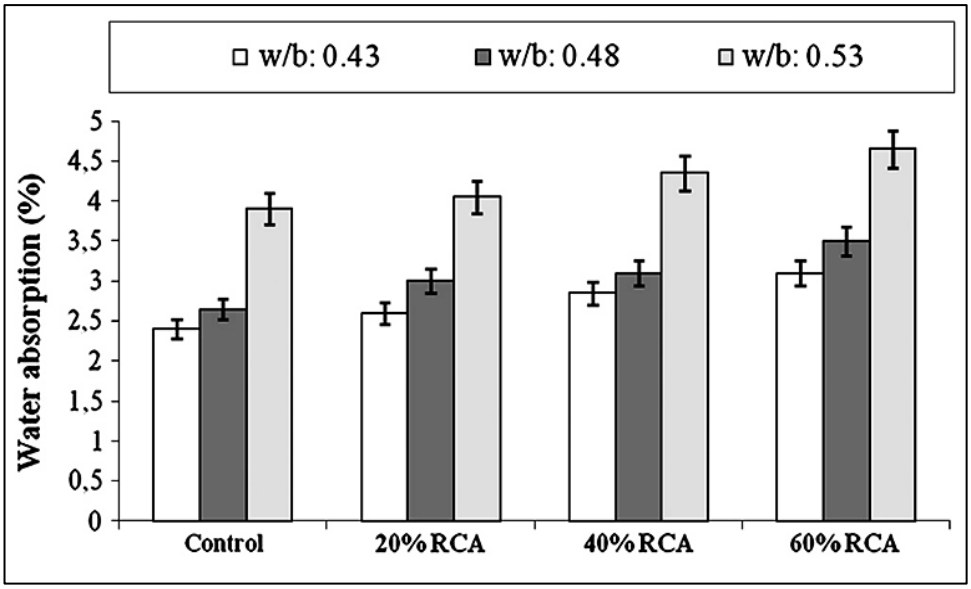


Figure 1. 11 : Absorption d’eau des mélanges de BAP [44].

1.8.2 Effet des granulats recyclés sur la perméabilité au gaz et à l’eau

Pereira-de-Oliveira et al. [36] n'ont pas réussi à obtenir des valeurs de perméabilité à l'oxygène même en soumettant les échantillons à une pression de 3.5 bars. Par conséquent, ils considèrent que le BAP est considéré comme étanche en termes de cette propriété. Cela est confirmé par l'essai de profondeur de pénétration de l'eau sous pression effectué sur les mêmes échantillons après l'essai de perméabilité à l'oxygène. Les auteurs ont obtenu des valeurs relativement faibles du coefficient de la profondeur de pénétration de l'eau sous pression, allant de 2.6×10^{-18} m^2 à 4.3×10^{-18} m^2.

La présence de la couche relativement poreuse du mortier résiduel sur les particules des GGR peut créer un conduit perméable pour le passage de l'eau à travers la matrice du béton. Kapoor et al. [58] ont montré que la profondeur de pénétration d'eau est supérieure de 29.6% lorsque les GGN ont été entièrement remplacés par des GGR, à l’âge de 28 jours, par rapport au mélange témoin, cependant, le remplacement de 25% de FGN par des FGR

a diminué la profondeur de pénétration de 18.5% à 28 jours de cure. Ainsi, pour tous les âges de cure, elle est inférieure à celle du BAP avec seulement des GGR (Figure 1.12). Mais, au-delà de 25%, la profondeur augmente.

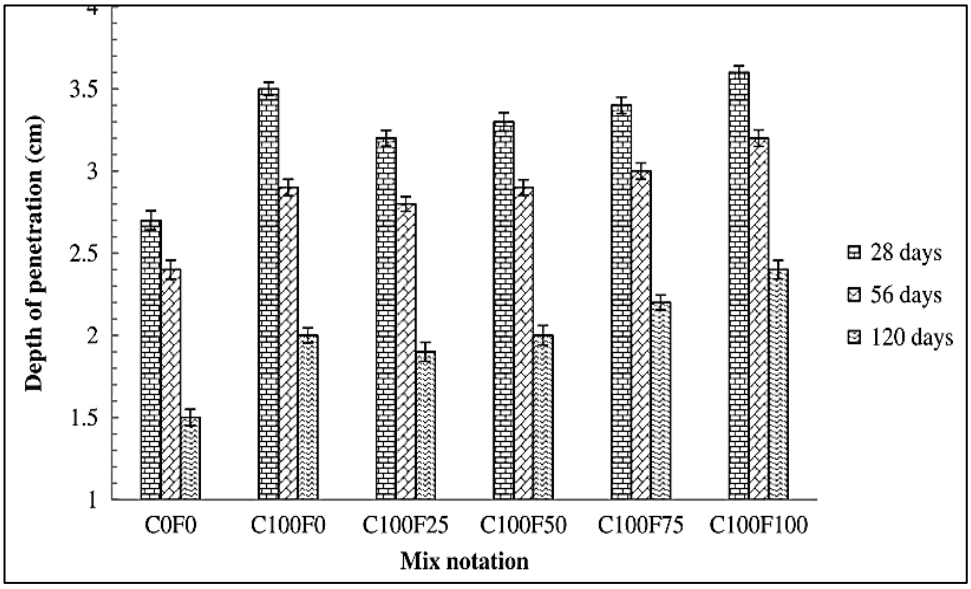


Figure 1. 12 : Evolution de la perméabilité à l'eau des BAP en fonction des dosages de FGR et de GGR [58].

1.8.3 Effet des granulats recyclés sur la diffusion des ions chlorures

La diffusion est définie comme le processus par lequel un liquide, un gaz ou des ions se déplacent à travers un matériau poreux sous l'action d'un gradient. Elle peut se produire dans un béton partiellement ou totalement saturé et constitue un mécanisme de transport important pour la plupart des structures en béton qui sont exposées aux sels [59].

Dans l'étude de Kou et Poon [30], la résistance à la migration des chlorures a été analysée en déterminant la charge électrique passante dans les échantillons pendant 6 h dans des BAPR à base de GGR. Ces chercheurs ont constaté que la résistance à la migration des chlorures augmente avec la teneur en FGR. Elle est expliquée par le grand effet de remplissage des pores provoqué par les FGR, qui contiennent un grand pourcentage des petites particules par rapport au sable naturel. La réduction de la charge passante était de 29% et 49% pour un rapport E/C de 0.53 et 0.44, respectivement, pour un remplacement de 100% de sable par des FGR. D'autre part, les auteurs ont observé que les mélanges qui contiennent 100% de GGR, 25% de FGR présentent la même valeur de charge passante totale que celle présenté par le mélange avec 100% de GGR. Ils ont

déclaré qu'une faible teneur de FGR (25%) n'a pas d'influence sur la résistance aux ions chlorures.

D'après l'étude de Tuyan et al. [44], la résistance à la diffusion des ions chlorures diminue avec l'augmentation de la teneur en GGR, c'est-à-dire que la pénétration des ions chlorures augmente avec le taux d'incorporation de GGR. Cela est justifié par la plus grande porosité des GGR par rapport aux GGN. Comme pour Kou et Poon [30], la pénétration des ions chlorures a également augmenté avec le ratio E/C.

D'après Santos et al. [60], le coefficient de migration des ions chlorures a augmenté avec l'augmentation du taux de remplacement par les fins et gros GR. Ils ont affirmé que les GGR entraînent une faible détérioration des BAPR par les ions chlorures par rapport aux FGR. En effet, avec sa teneur élevée en mortier attaché, les FGR peuvent aider au développement d'un réseau poreux supplémentaire au sein du nouveau béton favorisant ainsi la pénétration des ions du milieu extérieur. Par ailleurs, Omrane et al. [61] ont montré que les BAPR à base de 50% des granulats recyclés ont une faible résistance aux ions de chlorure, cependant, la substitution du ciment par de la pouzzolane a augmenté cette résistance.

1.9 Influence du laitier sur les propriétés du BAP

Au contraire au béton conventionnel, le BAP nécessite plus de pâte pour assurer une grande maniabilité. Ce qui signifie que la préparation des mélanges de BAP consomme plus de matériaux en poudre. Si seul le Ciment Portland est utilisé comme matériau en poudre, une grande quantité de CO_2 sera émise, ce qui aura un impact négatif sur l'environnement. En outre, une grande quantité de ciment génère beaucoup de chaleur d'hydratation pendant le processus d'hydratation, ce qui provoque facilement la fissuration du béton. Par conséquent, le remplacement partiel du ciment par des ajouts minéraux peut effectivement réduire efficacement les émissions de CO_2, le coût et réduire la possibilité de fissuration du béton [62].

Comme les granulats naturels conventionnels, le ciment peut, lui aussi, être remplacé par des matériaux durables (ajouts cimentaires : pouzzolane, cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau), ayant des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques, ce qui réduirait ainsi considérablement l'empreinte de carbone de ciment. Comme exemple, le

laitier granulé broyé de haut fourneau obtenu après immersion dans l'eau pour refroidissement brutal suivi d'un broyage.

Le laitier de haut fourneau est l'un des déchets produits par les usines de fer et d'acier en quantités énormes dans le monde entier. La gestion du laitier devient un défi pour les industries du fer et de l'acier car il est produit à un taux très élevé et il est éliminé. L'usine sidérurgique d'El-Hadjar, en Algérie, produit 700 000 tonnes de laitier par an et devrait produire une quantité bien plus importante dans les décennies à venir, sachant que la production d'une tonne de fonte génère plus de 350 kg de laitier [63].

La composition chimique du laitier est presque similaire à la composition chimique du ciment. Le laitier granulé de hauts fourneaux local Algérien contient généralement des taux élevés de CaO (37.22-44.58) et SiO_2 (33.26-42.2), de faibles teneurs en Al_2O_3 (5.64-10) et MgO (2.12-9.56). Le laitier Algérien est classé comme laitier basique ((CaO + MgO)/SiO_2 >1) et hydraulique ayant des indices décrivant l'hydraulicité modéré [63].

1.10 Influence du laitier sur les propriétés du BAP à l'état frais

La combinaison du laitier avec du ciment dans la formulation d'un BAP a de nombreux effets bénéfiques à l'état frais, améliore la maniabilité, baisse de la chaleur d'hydratation, la demande en superplastifiant et la demande en eau [64].

En général, l'utilisation des cendres volantes (CV) et du laitier, pour remplacer le ciment, améliorent les performances du BAP à l'état frais. Ces mélanges affichent une réduction de la chaleur d'hydratation maximale par rapport au mélange de BAP de contrôle. En outre, un volume de 10% à 30% de cendres volantes ou de laitier a un bon potentiel pour contrôler la chaleur d'hydratation du BAP; de plus, le laitier a une meilleure performance que les cendres dans la réduction de la chaleur d'hydratation du BAP avec 10% et 20% de substitution par du ciment. À 30%, la réduction du pic de la chaleur d'hydratation était presque identique à celui avec 10% et 20% [65].

Les propriétés fraîches du BAP à haute performance conçu avec un remplacement de 5 à 25% de ciment par du laitier sont évaluées par Islam et al. [66]. Les résultats obtenus indiquent, généralement, une amélioration des propriétés fraîches (étalement et T50, capacité de remplissage et de passage) jusqu'à 25% de laitier, par rapport au BAP témoin. L'analyse des coûts suggère que les déchets industriels pourraient être un matériau vert prometteur.

Les études d'Yön et al. [67] ont indiqué que le mortier autoplaçant (MAP) introduisant 10%, 20% et 30 % de laitier a révélé une meilleure ouvrabilité que le mortier sans laitier. Ils ont rapporté que le remplacement du Ciment Portland par du laitier a eu un effet positif sur l'ouvrabilité des MAP, suite aux particules de laitier qui ont des surfaces lisses et sont partiellement rondes.

Al-Oran et al. [68] ont étudié les propriétés fraîches des BAP conçus avec du laitier et du métakaolin en remplacement partiel du ciment. Le ciment a été remplacé par du métakaolin à un niveau constant de 10%, tandis que le laitier a remplacé le ciment à des niveaux différents de 15%, 20%, 25% et 30% comme poudre de mélange ternaire. Les résultats obtenus indiquent que l'inclusion du métakaolin a réduit la maniabilité, en raison de sa forte activité chimique, qui entraîne une plus grande consommation d'eau, cela a ensuite augmenté la friction interne entre les grains, d'où une perte de fluidité (déformabilité) qui, alors, augmente en même temps la viscosité. En revanche, le laitier a montré une amélioration d'ouvrabilité et a compensé la perte d'ouvrabilité. Les auteurs ont conclu que le niveau optimal de remplacement du ciment, pour produire une bonne qualité de BAP, doit être de 10% et 25% de métakaolin et de laitier, respectivement.

Les auteurs d'une étude [69] ont évalué les caractéristiques fraîches des BAP comprenant une combinaison d'ajouts cimentaires. Les chercheurs ont mentionné que ces ajouts cimentaires avaient un impact positif sur la maniabilité du béton. La substitution de 25% et 50% de ciment par des cendres volantes et du laitier a montré une meilleure fluidité, une meilleure capacité de passage et de remplissage, supérieures à celles du BAP de référence, une diminution du temps dans l'entonnoir en V et une augmentation des rapports de la boite en L. En outre, la densité du ciment étant supérieure à celle des cendres volantes et du laitier, la quantité de cendres volantes et de laitier dans les mélanges des BAP est supérieure à celle du ciment, ce qui augmente l'ouvrabilité. Ils ont estimés que 25% de cendres volantes et 25% de laitier, comme pourcentages optimaux de substitution, peuvent être utilisés dans les BAP.

Les mêmes observations ont été faites par Ofuyatan et al. [70], qui ont signalé que les meilleures performances de maniabilité ont été obtenues avec l'incorporation d'ajouts cimentaires. L'évaluation de la déformabilité, de la capacité de remplissage et de passage a été observée pour un remplacement de 25% de métakaolin et 25% de laitier. Parmi les deux ajouts minéraux utilisés, il a été observé que la meilleure déformabilité a été obtenue

avec le laitier. L'étalement observé lors du remplacement avec 25% de laitier avait un diamètre de 770 mm, tandis que celui avec 25% de métakaolin avait un diamètre de 731 mm.

Une étude antérieure [71] a montré que des propriétés acceptables des BAP peuvent être obtenues avec l'utilisation d'un pourcentage fixe de 15% de laitier dans les formulations des BAP à base de granulats recyclés, lequel peut compenser l'effet négatif des GR sur la rhéologie des BAP (étalement et temps T50, l'essai de l'entonnoir en V et l'essai de la boîte en L). En outre, Kouider Djelloul et al. [42] ont observé que le laitier donne une meilleure ouvrabilité aux BAP et la substitution de 15% et 30% de ciment par du laitier, dans les BAP à base de GR, engendre une amélioration très remarquable de l'ouvrabilité.

Boukendakdji et al. [72] ont mené une étude expérimentale sur les effets du laitier et des superplastifiants sur les BAP à l'état frais. Ils ont utilisé du Ciment Portland ordinaire avec des niveaux de remplacement de 10%, 15%, 20%, 25% de laitier. Deux types de superplastifiants ont été utilisés : le type 1, un polycarboxylate couramment utilisé (la teneur en solides est de 30 % et la densité spécifique est de 1.07%) et le type 2, un sulfonate de naphtalène (la teneur en solides est de 40% et la densité spécifique est de 1.1%). Ils ont constaté une augmentation de l'ouvrabilité pour 20% de remplacement par du laitier avec un optimum à 15%; mais, la valeur mesurée de la viscosité plastique et celle du seuil de cisaillement diminuent proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de laitier.

Dans le même contexte, Yahiaoui et al. [73] ont révélé que l'incorporation du laitier, en tant qu'addition minérale jusqu'à 25%, conduit à une réduction de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement, par rapport au béton de référence, d'où une amélioration de l'ouvrabilité.

Saleh et al. [74] ont montré que le laitier diminue la viscosité plastique et le temps de vidange de l'entonnoir en V, par rapport aux mélanges contenant uniquement du ciment. Cependant, ils ont observé une tendance inverse lorsque le métakaolin et les cendres volantes de classe C et F ont été incorporés au BAP. La substitution du ciment par la fumée de silice, le métakaolin et les cendres volantes a augmenté la demande en haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates, dans les mélanges des BAP ayant un diamètre

d'étalement constant. En revanche, le laitier et les cendres volantes ont diminué la demande en superplastifiant par rapport au mélange témoin.

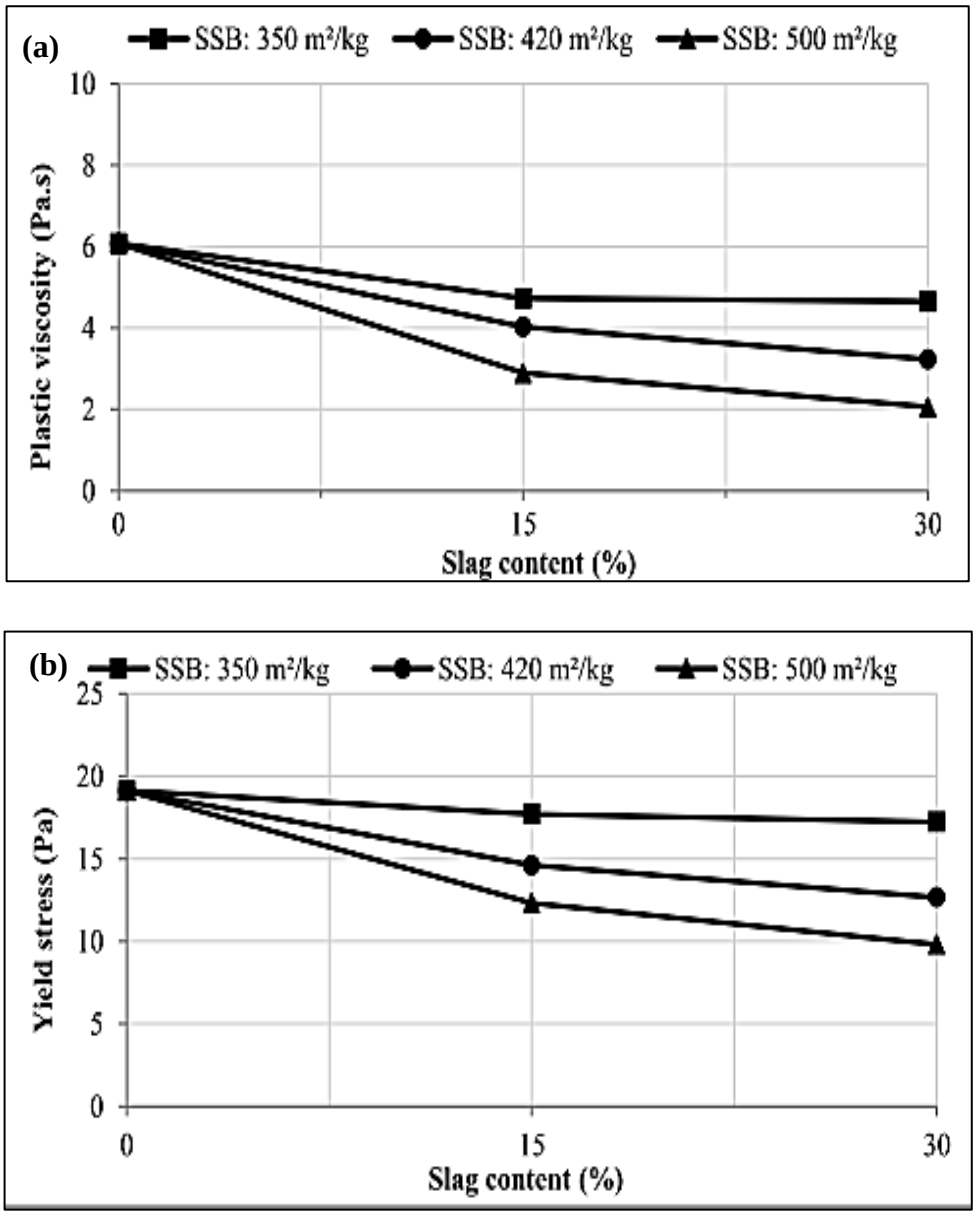


Figure 1. 13 : Effet du laitier sur : a) la viscosité plastique et b) le seuil de cisaillement [74].

Selon Hammat et al. [75], l'incorporation de 15% et 30% de laitier dans les MAP donne une meilleure maniabilité par rapport à celle du mélange de contrôle. Ils ont constaté, également, que l'augmentation de la finesse du laitier améliore l'ouvrabilité des MAP. Pour une substitution de 30%, l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 350 m^2/kg, 420 m^2/kg et 500 m^2/kg, a entraîné une augmentation d'étalement de 1.85%, 4.73% et 8.43%, respectivement. Les auteurs ont, aussi, affirmé que l'augmentation du niveau de

remplacement par du laitier a diminué la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des mélanges, qui se sont dévoilés plus faibles pour une finesse de laitier plus élevée (420 m^2/kg ou 500 m^2/kg), par rapport à celui dont la finesse est de 350 m^2/kg (Figure 1.13).

1.11 Influence du laitier sur la résistance à la compression du BAP

La composition chimique du laitier révèle que la présence d'oxyde de calcium et d'oxyde de silicium ayant réagi avec l'hydroxyde de calcium a pu entraîner une formation d'un gel de silicates de calcium hydratés supplémentaire de nature cristalline. De tels composés cristallins ont amélioré les caractéristiques de résistance des mélanges des BAP [76].

Généralement, le mélange de ciment et de laitier produit moins de silicates de calcium hydratés (C-S-H) au jeune âge, ce qui génère une faible résistance des bétons. Après l'hydratation du ciment, l'activation du laitier commence ce qui permet de produire de nouveaux C-S-H et, ainsi, de réduire la taille des pores capillaires. La microstructure résultante devient plus dense, ce qui conduit à une amélioration de la résistance et de la durabilité [77].

Lorsque Bachene et al. [77] ont utilisé le laitier dans la formulation des MAP, ils ont observé une baisse de la résistance à la compression au jeune âge, et ce, surtout pour une teneur élevée de laitier. Cette diminution atteint 25% et 37% pour les mortiers contenant, respectivement, 20% et 40% de laitier. A partir de 28 jours, la résistance à la compression des MAP contenant 20% de laitier se rapproche nettement de celle du mortier sans laitier, par contre, celle de mortier avec 40% reste inférieure. A 56 jours, un taux de 20% de laitier s'avère avoir une grande efficacité sur la résistance à la compression avec un gain qui peut atteindre jusqu'à 15%, contrairement aux mortiers contenant 40% qui enregistrent une diminution de 17% et qui reste inférieure à celle enregistrée au premier âge.

Naik et al. [78] ont montré que la résistance à la compression des BAP diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier (5, 10, 15, 20, 25 et 30%). Ils ont montré également que l'incorporation du laitier dans les BAP a réduit la résistance à la compression durant les premiers jours, cependant, cette résistance se développe et donne un résultat acceptable à 28 jours.

L'étude de Bulut et Şahin [79] montre que la résistance à la compression des BAP, contenant 5 % de CV, s'est renforcée par rapport à celle du béton témoin, cependant, elle

s’est affaiblie avec l’augmentation du taux de remplacement. Néanmoins, les résistances maximales à la compression des BAP, contenant de la fumée de silice (FS), ont généralement été obtenues dans les mélanges contenant 12.5% de fumée de silice. Mais, les résistances à la compression des mélanges contenant un taux de remplacement de 5% à 20% de laitier se sont présentées plus faibles que celles du béton témoin au jeune âge (7 à 14 jours), mais comparables à long terme (90 et 120 jours).

De même, Vivek et Dhinakaran [80] ont observé que l'augmentation du taux de laitier, de 25 à 100%, a diminué la résistance à la compression, indépendamment de l'âge du béton (7 et 28 jours), les résistances des BAP contenant du laitier étaient inférieures à celle du béton témoin. De plus, les BAP avec 25% de laitier ont donné la meilleure résistance à la compression. La faible résistance à la compression des bétons, avec l'augmentation de la teneur du laitier, peut être attribuée à la faible activité pouzzolanique du laitier aux premiers âges [14].

En outre, Yahiaoui et al. [73] ont conclu que la substitution par 25% de laitier et une cure humide jusqu’à 28 jours ont donné de meilleures performances et une résistance comparable à 90 jours. D’après Boukendekdji et al. [72, 81], la substitution et l’augmentation du taux de laitier jusqu’à 15% a diminué la résistance à la compression au jeune âge, cette chute s’est avérée moins importante au long terme (56 et 90 jours).

D’autre part, Yön et al. [67] ont noté que pour les MAP incorporant du laitier comme substitut du ciment, la résistance à la compression a diminué au début de la période de durcissement, en raison de la lente réaction pouzzolanique du laitier et aussi de sa faible teneur en CaO par rapport à celle du ciment, ce qui entraîne une réduction de la quantité de $Ca(OH)_2$ et, donc, de la quantité de gel de C-S-H.

Chen et al. [82] et Gao et al. [83] ont signalé que, par rapport au remplacement du ciment par des CV, le remplacement du ciment par du laitier améliore plus efficacement la résistance à la compression à long terme (90 jours) du béton vibré à base de 50% et 100% de gros granulats de béton recyclés, avec un optimum de 30%. Cela a été attribué à la composition chimique et aux propriétés physiques du laitier qui sont plus uniformes que celles des cendres. La résistance à la compression à 90 jours des bétons recyclés contenant des GR a été améliorée. Cela peut être attribué à trois mécanismes possibles :

1- la pénétration d'une partie des cendres et du laitier dans les pores des GR qui améliorent la liaison de la zone de transition interfaciale (ZTI) entre la pâte et les granulats;

2- le produit de la réaction pouzzolanique entre les ajouts cimentaires et le $Ca(OH)_2$ qui remplit les fissures initialement présentes dans les GR.

3- la réaction pouzzolanique lente des cendres ou du laitier qui retarde le développement de la résistance initiale du béton, puis l'améliore à 90 jours grâce à la réaction pouzzolanique continue des cendres ou du laitier.

1.12 Influence du laitier sur la durabilité du BAP

1.12.1 Effet du laitier sur la porosité

L'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) qui est un deuxième produit d'hydratation du ciment, est une substance très soluble du point de vue de la durabilité, ce qui constitue un lien faible de la microstructure des matériaux à base de ciment. Lorsque l'eau pénètre dans les matériaux à base de ciment, l'hydroxyde de calcium se dissout et augmente la porosité et, par conséquent, le béton devient plus sensible aux attaques chimiques [62].

En revanche, le laitier accroît le rapport Silice/Calcium dans la pâte de ciment qui augmente la quantité des gels C-S-H et réduit la quantité d'hydroxyde de calcium, créant, ainsi, une microstructure plus dense diminuant la porosité et, donc, améliorant la durabilité [84] .Autrement dit, avec la progression de l'hydratation du ciment, le laitier peut réagir avec le $Ca(OH)_2$ libéré par l'hydratation du ciment et produire des C-S-H supplémentaires ayant des propriétés liantes.

Selon Rahim et al. [85], l'utilisation du laitier Algérien, à un faible taux de remplacement (10% à 30%), a réduit la porosité accessible à l'eau dans le béton de haute performance, à cause de sa réaction pouzzolanique qui a densifié la microstructure. Cependant, l'utilisation de 50% de laitier a légèrement augmenté la porosité. Yahiaoui et al. [73] ont, eux aussi, utilisé le même type de laitier; ils ont conclu que les mélanges des BAP contenant du laitier (15% et 25%) ont une porosité qui est, non seulement faible par rapport à celle du BAP de référence mais qui diminue proportionnellement avec l'âge de cure, suite à la capacité du laitier d'affiner les pores capillaires de la matrice cimentaire du béton.

D’autre part, Karakurt et al. [86] ont observé que le laitier remplissait mieux le diamètre des pores par rapport au marbre, et cela, grâce à sa caractéristique pouzzolanique. Une évaluation générale des images de la structure interne indique que le BAP, contenant du laitier, comportait des pores d’air avec des diamètres plus petits que ceux de l'échantillon de référence. Le diamètre du pore le plus faible, parmi tous les mélanges des BAP, a été observé dans celui avec 30% de laitier, qui, comme on peut le voir sur la figure 1.14, était de 86.67 µm. Une comparaison de ce résultat avec les résultats de l'essai de résistance à la compression indique que la résistance élevée à la compression de cet échantillon était attribuable au faible diamètre des pores et au faible taux des pores. Néanmoins, le plus grand diamètre de pore est de 386.9 µm, et a été obtenu dans l’échantillon avec 10% de laitier dont la porosité est de 10.09% est ce, dans les résultats de l’essai de prosimètre à mercure.

D’après Vittalaiah et al. [87], l’augmentation du taux de substitution du laitier de 0% à 50%, avec un incrément de 10%, diminue la porosité des BAP à 7, 28 et 56 jours, et les valeurs optimales de porosité varient de 20 % à 30 %. Cela résulte de la densification de la structure poreuse du béton.

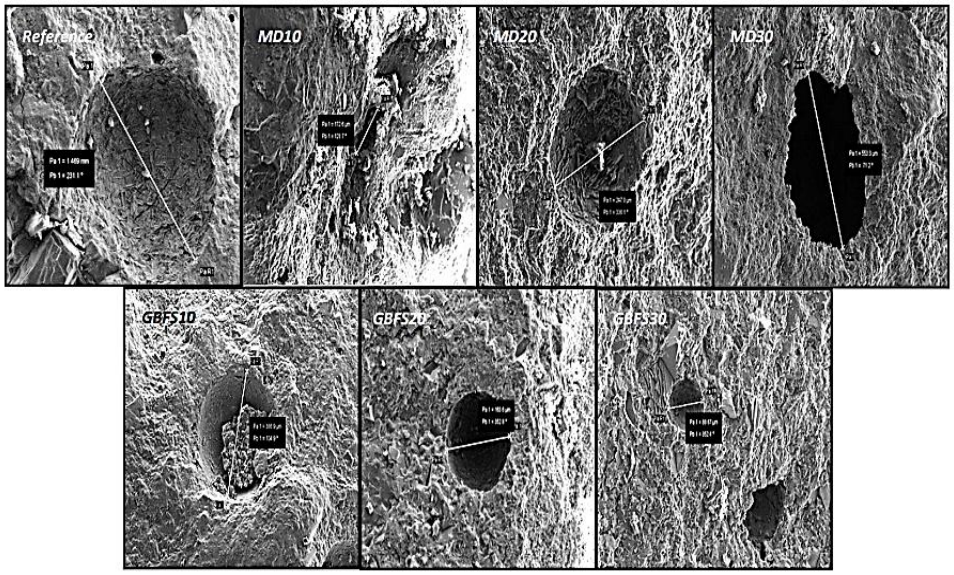


Figure 1. 14 : Structure des pores des BAP [87].

Hadj Sadouk et al. [88] ont observé une diminution de la porosité avec l’âge des mortiers étudiés. Cependant, une porosité plus élevée a été remarqué à 7 et 28 jours, pour les mortiers à base de 50% de laitier, cette élévation est la conséquence de sa lente

hydratation. Par contre, après 90 jours de cure, la distribution des pores dans les mortiers à base de ciment et substitué par du laitier est plus petite et plus fine que celle du mortier témoin, ce qui est conforme à une réduction de la taille des pores. Cela est expliqué par l'hydratation du laitier après la consommation de $Ca(OH)_2$, entraînant la formation des gels C-S-H supplémentaires qui contribue à la densification de la structure poreuse de la matrice.

1.12.2 Effet du laitier sur l'absorption d'eau capillaire

Les expériences de Prasanna et al. [89] révèlent que plus la quantité de laitier (jusqu'à 80%) dans le béton augmente, plus la porosité et le taux d'absorption d'eau par capillarité diminuent avec l'âge. Cela pourrait être dû à la réduction du volume des pores capillaires et à leurs discontinuités, obtenues lors des réactions pouzzolaniques, et qui limitent considérablement l'absorption d'eau dans les mélanges avec l'augmentation de niveau du remplacement du laitier.

Selon Ali-Boucetta [90], plus les pores sont grands, plus la pente de la ligne d'absorption par capillarité est élevée. Les auteurs ont noté que les mélanges contenant du laitier d'El-Haddjar (Annaba) sont caractérisés par une diminution des pentes, par rapport au BAP de référence sans laitier, qui est le résultat d'un ralentissement de l'absorption. La régression de la pente est liée à deux causes probables : la première indique que la remontée capillaire a atteint toute la hauteur de l'échantillon; la deuxième cause, la plus probable, est l'existence de plusieurs familles de pores, dès que la remontée capillaire est terminée dans les pores capillaires les plus grands, l'absorption se poursuit dans les pores les plus fins. En conséquent, la cinétique d'absorption de ces bétons est ralentie, ce qui explique la diminution de la pente.

Hammat et al. [75] ont, également, montré que la substitution du ciment par du laitier et l'augmentation du pourcentage de laitier de 15% à 30% ont réduit l'absorption d'eau capillaire ainsi que la sorptivité.

1.12.3 Effet du laitier sur la perméabilité à l'eau

D'après Güneyisi et al. [91], l'augmentation du taux de substitution du laitier de 20% à 60%, avec un incrément de 20%, diminue la profondeur de pénétration de l'eau dans les BAP de 35%, 48% et 42%, respectivement, par rapport au BAP de contrôle. Cela résulte de la densification de la structure poreuse du béton avec l'influence du pourcentage de remplacement par du laitier.

Jain et al. [92] ont obtenu une profondeur minimum avec 22.5% de laitier mais une plus grande quantité de laitier (30% et 37.5%) a augmenté la profondeur de pénétration dans les bétons, les auteurs ont justifié cette augmentation par la réduction de la teneur en ciment, dans le béton, et celle du gel C-S-H qui ont affaiblir l'adhérence.

1.12.4 Diffusion aux ions de chlorure

Mathews et al. [93] ont remarqué une faible pénétration des chlorures dans la structure des échantillons des BAP avec 31% de cendres volantes ou de laitier de haut fourneau. De même, il a été remarqué que le mélange avec des cendres volantes se caractérisait par une capacité de migration des chlorures nettement supérieure à celle d'une combinaison avec le laitier. L'activité pouzzolanique fournie par les cendres volantes et le laitier améliore considérablement la capacité du BAP à résister à la pénétration des ions de chlorure. La formation d'un gel secondaire " C-S-H ", lorsque les ajouts (cendres et laitier) sont mélangés avec les produits de la réaction d'hydratation et leur teneur en alumine, peut expliquer la diminution significative de la pénétration des ions chlorures.

1.13 1.13 Conclusion

L'extraction incontrôlée des granulats naturels pour la production des bétons affecte l'environnement et compromet le développement durable de l'industrie de la construction. Simultanément, le volume des matériaux dans les décharges, suite à la démolition des structures en fin de vie, pose un problème qui nécessite une solution. Tous les pays sont concernés par la gestion des déchets de construction et de démolition à cause de leur effet directe sur l'environnement, d'où la nécessité de recycler ces déchets pour sa préservation. En effet, l'utilisation des bétons recyclés comme matériau de construction dans le domaine du génie civil a de grands avantages sur les plans économique et environnementale.

Ces déchets peuvent et doivent être recyclés pour être incorporés dans la production du béton. D'autre part, le BAP représente actuellement une technologie de production et une mise en place, qui tend à remplacer le béton conventionnel, avec divers avantages. Il est donc essentiel de démontrer la possibilité de produire des BAP en remplaçant les granulats naturels par des granulats recyclés.

Nous avons posé, ainsi, dans ce chapitre la problématique des constructions démolies usagées et leur valorisation, notamment, sous forme de fins et gros granulats dans les composites à base cimentaire. Cette incorporation dans une matrice cimentaire a un effet

négatif sur la rhéologie, les propriétés mécaniques et la durabilité, d'une part. Ces conséquences négatives, sur la rhéologie et la durabilité des bétons à base de granulats recyclés, peuvent être compensées de manière adéquate par l'utilisation du laitier de haut fourneau en remplacement du ciment; les propriétés mécaniques peuvent être améliorées par l'addition de fibres d'acier recyclées dans la composition du mélange de béton. D'autre part, les effets de ces incorporations ont été étudiés à grande échelle sur les propriétés du béton traditionnel, ce qui n'est pas le cas pour le BAP. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui porte sur les potentialités d'utiliser les déchets de béton démoli sous forme de granulats et le laitier d'El- Hadjar dans un BAP.

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE_ VALORISATION DES FIBRES DE PNEUS USÉS DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique, non seulement, sur le comportement des bétons contenant des fibres d'acier recyclées, mais également, sur les propriétés des bétons fibrés à l'état frais et durci, ainsi que sur l'influence des fibres sur les propriétés des bétons à base de granulats recyclés.

2.2 Pneus usés

Avec l'expansion croissante de la population active et l'élévation sociale de la classe moyenne, on assiste à une augmentation significative de la demande en véhicules dans le monde, de sorte que le volume des pneus mis en décharge augmente chaque année. En raison de la non-biodégradation des déchets de caoutchouc, l'élimination des pneus mis en décharge est un problème influant sur l'écosystème. La gestion des pneus usés est devenue un problème croissant ces dernières années. À l'échelle mondiale, environ 1.5 milliards tonnes de pneus sont jetés par an et environ 17 millions des pneus usés s'entassent actuellement dans les décharges [94]. Les données estimées ont montré que, chaque année, dans le monde, environ 1000 millions de pneus ne sont pas adaptés à un usage ultérieur ou à un rechapage. Selon les prévisions, jusqu'en 2030, le nombre de pneus usés générés dans l'environnement atteindra 1200 millions de pneus par an [4]. En supposant que les données prédites soient correctes et que le développement du recyclage du caoutchouc se maintienne au niveau actuel, relativement bas, il est prévu une augmentation de 20%, au cours des 10 prochaines années.

D'après un rapport de l'Association Européenne des Fabricants de Pneus et de Caoutchouc (ETRMA), de 2017, environ 3.9 millions de tonnes de pneus usés sont jetées chaque année en Europe. L'Italie, à elle seule, a produit, en 2016, 400 mille tonnes de pneus usés [95].

Selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur, depuis 2004, chaque année, l'Algérie importe environ 50 000 tonnes de pneumatiques en caoutchouc. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usé et, tenant compte de la perte de masse due

à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec, environ, 46 000 tonnes de pneus usés [96]. D'autre part, selon l'Office National des Statistiques (ONS), le parc automobile d'Algérie a atteint 6.5 millions de véhicules en 2018 [97].

Le pneu usé est défini comme un pneu qui a dépassé la date d'expiration ou qui ne peut plus être utilisé en fonction de divers facteurs. Les pneus ont une durée de vie moyenne de 5 ans et une durée de vie moyenne de 10 ans après deux rechapages. Le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 classe les pneus comme déchets spéciaux.

2.3 Nécessité de traitement

Le caoutchouc usé est un matériau durable et résiste, exceptionnellement bien, à l'environnement naturel typique dont il subit les effets négatifs. Les pneus usés sont difficiles à dégrader par eux-mêmes. De plus, le taux de vide d'un pneu usé est d'environ 75% en volume, d'où la nécessité d'un espace incroyablement grand pour leur stockage [98].

Par ailleurs, lors de l'élimination illégale des pneus usés, les eaux de pluie sont non seulement recueillies dans leurs formes courbes, mais stagnant aussi, favorisant, ainsi, la lixiviation des composés toxiques des déchets de caoutchouc qui polluent les eaux souterraines et ont, donc, un impact négatif sur les organismes aquatiques. En outre, l'humidité élevée à l'intérieur des pneus éliminés crée, également, des conditions idéales pour la reproduction des rongeurs et des moustiques qui peuvent être porteurs de diverses maladies.

L'augmentation du nombre de pneus usés constitue une menace sérieuse pour l'environnement naturel et pour la santé humaine. Les pneus jetés ou stockés illégalement constituent un risque potentiel de combustion incontrôlée. Par exemple, en 2016, environ 9000 personnes ont été évacuées de leurs maisons situées en Seseña, Madrid, Espagne, en raison d'une combustion de la grande décharge illégale de pneus de l'Union Européenne (figure 2.1). Les estimations ont montré qu'environ 70 000 à 90 000 tonnes de pneus étaient accumulées à Seseña depuis plus de 15 ans [99].

La combustion des pneus usés en caoutchouc en grandes surfaces de stockage a entraîné des émissions d'oxyde de soufre, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, de particules fines et d'autres composés dangereux. L'incinération des stocks de pneus pollue non seulement la surface du sol mais aussi les eaux souterraines [99]. Par conséquent, le

risque de cancer est plus élevé pour la population vivant à proximité des décharges illégales de pneus et de certaines usines de recyclage du caoutchouc, en particulier, celles situées sur des lignes prototypes dans les études menées à l'échelle de laboratoire.

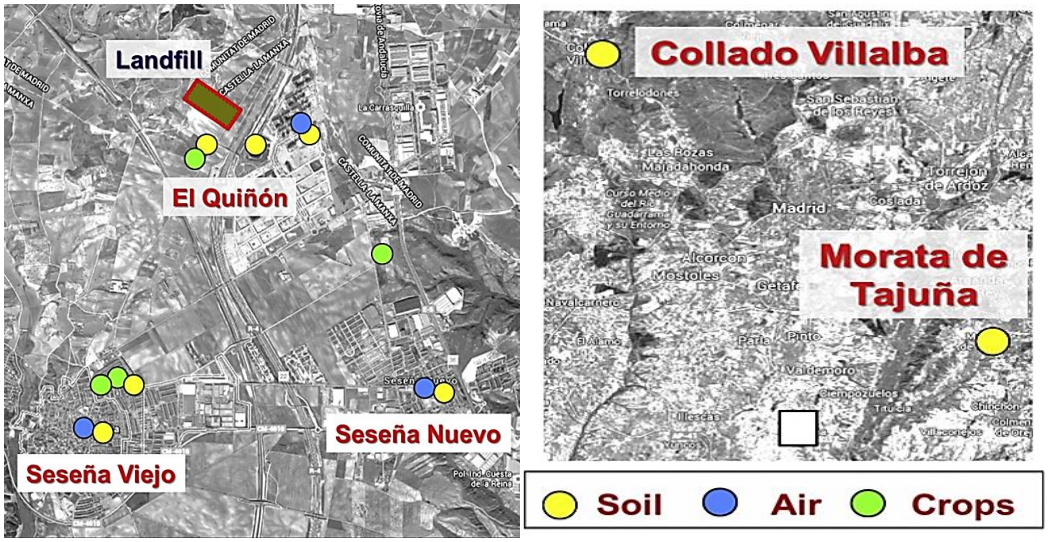


Figure 2. 1 : Zones de combustion des pneus usés en Espagne [99].

Par contre, la combustion des pneus dans un four à ciment fournit non seulement de l'énergie pour la production du ciment, mais génère également des sous-produits précieux, notamment des fils d'acier qui peuvent ensuite être utilisés comme fibres dans le secteur de la construction. D'autre part, l'utilisation des pneus, comme combustible dans l'industrie du ciment, a permis de réduire de 17% les émissions de CO_2 [100].

2.4 Valorisation des pneus usés

Un rapport publié par l'Union européenne (UE) par la Serbie et la Turquie, en 2019, sur l'approche de valorisation appliquée en 2017 pour gérer et fournir des solutions aux pneus usés qui est détaillée dans la figure 2.2 [101]. Cette dernière montre que 3.1 millions de tonnes d'environ des pneus usés générés dans les pays Européen ont été valorisés avec succès en tant que matières premières (57%) et énergie supplémentaire (35%). En termes de récupération des matières premières, la plupart des déchets de pneus récupérés ont été broyés en petites particules et incorporés dans divers matériaux caoutchoutés tels que le béton, l'asphalte, les bandes transporteuses et les tapis des terrains de jeux. Cependant, seule une petite fraction des déchets de pneus récupérés a été réutilisée et pyrolysée en raison de la pollution qu'elle peut émettre. D'autre part, la récupération d'énergie à partir

des déchets pneumatiques a été principalement utilisée pour alimenter les centrales électriques et le chauffage des ménages urbains pendant la saison froide, ou, comme combustible alternatif dans les fours à ciment et les papeteries.

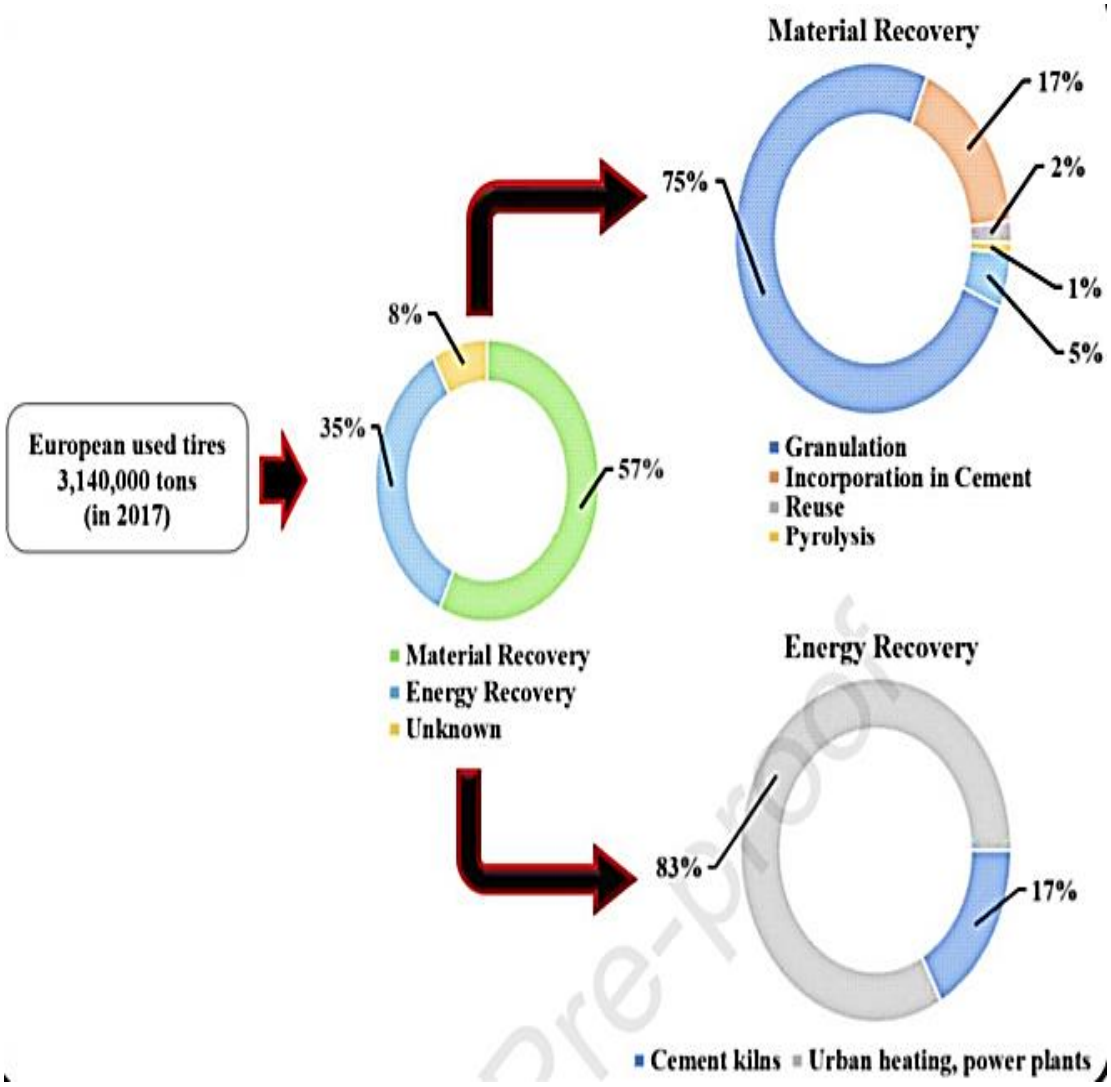


Figure 2. 2 : Gestion des déchets pneumatiques en Europe [101].

2.5 Méthodes et potentiel de valorisation des pneus usés

L'élimination des pneus usés dans les décharges crée de graves problèmes environnementaux, étant donné de la libération d'éléments nocifs et toxiques dans l'écosystème environnant. De plus, les pneus usés occupent une grande surface dans les décharges et les dépôts, ce qui est difficile vu la non-disponibilité des terrains libres. Cependant, en raison des problèmes environnementaux et des risques pour la santé, il est de la plus haute importance de développer des technologies alternatives pour traiter les énormes quantités de pneus sans endommager l'environnement.

Diverses stratégies sont proposées pour gérer les pneus à la fin de leur vie utile, notamment, la mise en décharge, le rechapage et la réutilisation, la combustion pour combustible et le recyclage pour l'obtention de matières premières [102].

Le rechapage des pneus constitue une solution économique pour retarder le problème d'élimination par un rechapage multiple, toutefois à la fin de leur vie utile, ces pneus sont stockés. Le brûlage des pneus usagés à l'air libre est l'approche la plus simple et la plus économique d'élimination, mais il émet dans l'atmosphère des gaz nocifs et des produits toxiques volatils tels que des composés organiques, des hydrocarbures, du mercure, du chrome, de l'arsenic, du cadmium, etc., provoquant, ainsi, de graves risques d'incendie et des dangers sur la santé [103].

L'énergie peut être récupérée par le brûlage des pneus usés dans des usines de pyrolyse ou dans des fours spécifiques. En outre, les grandes quantités de déchets de pneus après le rechapage constituent une source d'énergie directe, en raison de leur valeur calorifique relativement élevée (environ 32 MJ/kg) par rapport à d'autres combustibles, tels que le charbon ou le bois [104]. La transformation du pneu usagé en source d'énergie peut être utilisée pour remédier au problème de stockage. Cependant, en fournissant de l'énergie à l'industrie par combustion ou incinération, on rejette dans l'air un grand nombre de polluants environnementaux, tels que le CO_2, le SO_2 et les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP) [104].

L'impact environnemental inacceptable des pneus usés peut être minimisé en les recyclant dans la construction et dans d'autres industries. De plus, le recyclage des pneus permet d'éviter l'émission de 1.52 tonne de CO_2 par an et de contribuer ainsi à la protection de l'environnement [105]. L'utilisation des pneus comme source de matières premières permet d'obtenir trois catégories de produits : des granulés de caoutchouc, des fibres d'acier et des textiles. Ces matériaux peuvent être séparés de manière rétroactive du caoutchouc broyé à l'aide de technologies modernes, de sorte qu'ils peuvent être recyclés ou réutilisés.

2.5.1 Caoutchouc :

Les pneus usés sont recyclés mécaniquement d'abord, en extrayant les fils d'acier du caoutchouc, puis en déchiquetant le caoutchouc et en le transformant en petits copeaux, en miettes, en poudre fine et en carbone destinés à diverses applications. En génie civil, la teneur en caoutchouc, ainsi que, la taille et la texture (lisse ou rugueuse) des particules

affectent de manière significative la liaison avec la pâte de ciment, influant, ainsi, sur les performances du béton caoutchouté. Par conséquent, les déchets des pneus sont recyclés en tailles variables, classées en caoutchouc déchiqueté, caoutchouc en miettes et caoutchouc finement broyé.

Il existe différentes voies de traitement pour le recyclage du caoutchouc de pneus usés. D'abord, le broyage mécanique à l'aide de déchiqueteuse, de laminoirs et de granulateurs, qui permet de déchiqueter et de réduire en copeaux les pneus, à température ambiante, pour obtenir des particules de caoutchouc sous forme de gros granulats, dont la taille varie entre 100 à 460 mm de long et entre 100 à 230 mm de large. Ces dernières sont obtenues au stade primaire de déchiquetage. La taille des particules de caoutchouc est, ensuite, réduite à 13 mm au cours de la deuxième étape, à l'aide de broyeurs rotatifs à grande vitesse, d'extrudeuses et de granulateurs [106].

Le caoutchouc en miettes, utilisé comme fins granulats, est produit selon deux méthodes : la première, à l'aide de broyeurs à fissures à température ambiante et, la deuxième, par traitement cryogénique à l'azote liquide à une température inférieure à -80 C° [102]. Le procédé de craquage réduit la taille des particules de caoutchouc de 5 mm à 0.5 mm après avoir été passées lui entre des rouleaux d'acier ondulés [30]. Dans le traitement cryogénique, le pneu est congelé à l'aide d'azote liquide et broyé en fines particules dont la taille varie entre 4.75 mm et 0.075 mm. Ce caoutchouc peut être recyclé ou réutilisé comme combustible dans les fours à ciment, comme matériau de construction dans les revêtements en asphalte ou comme agrégats dans le béton. Lorsque les pneus usés sont recyclés, les fibres d'acier contenues dans les déchets des pneus peuvent être récupérées par des processus de déchiquetage, de cryogénie ou de pyrolyse.

2.5.2 Fibres d'acier recyclées:

Les pneus usés sont la principale source de récupération des fibres d'acier. Ces fibres d'acier ont été utilisées avec succès par l'industrie de la construction pour dans des applications structurelles avec certains avantages environnementaux et économiques.

Mécaniquement, les fibres d'acier peuvent être extraites des pneus usés par des procédés cryogéniques et par déchiquetage, mais elles peuvent aussi être obtenues par dégradation thermique anaérobie, par exemple, par pyrolyse induite par micro-ondes ou par pyrolyse conventionnelle [107]. L'ensemble des processus d'obtention de fibres d'acier dans le procédé cryogénique passe par les étapes suivantes : tout d'abord, les pneus usés

sont réduits en petites parties; ensuite, les petites pièces produites sont introduites dans une chambre cryogénique et glacées avec de l'azote liquide; puis, le broyage des miettes de caoutchouc est effectué avec un marteau pour produire des particules de différentes tailles, et, enfin l'acier est séparé magnétiquement du caoutchouc, les fibres produites ont des longueurs et des diamètres variés avec des formes irrégulières [108]. L'acier produit peut être fragile s'il est congelé en dessous de sa température de fragilisation. Ce procédé est efficace du point de vue énergétique, car il utilise moins d'énergie pour extraire l'acier du caoutchouc, cependant, son principal inconvénient est le coût élevé de l'azote liquide [107].

Dans le processus de déchiquetage pour fabriquer des fibres d'acier à partir de pneus usés, ces derniers sont coupés et hachés en morceaux relativement petits, puis, ces petits morceaux sont broyés afin d'obtenir de petites particules de caoutchouc qui sont définies comme des miettes de caoutchouc (Figure 2.3) et enfin l'acier est séparé magnétiquement du caoutchouc. Les fibres d'acier recyclées par procédé mécanique sont endommagées mais assurent toujours un transfert efficace des contraintes en raison de leur forme irrégulière [108].

En absence d'oxygène, les pneus usés sont décomposés thermiquement dans le processus de pyrolyse, l'un des produits de ce processus est le résidu du charbon sur l'acier. Dans une usine de pyrolyse typique, les déchets de pneus sont introduits dans un réacteur de pyrolyse et sont chauffés pour obtenir une température requise (430 °C). Grâce à un système de séparation gaz-liquide, les vapeurs produites sont séparées des gaz et des liquides. Dans le processus final, l'acier est séparé du charbon, mais il contient encore du charbon à sa surface [110].

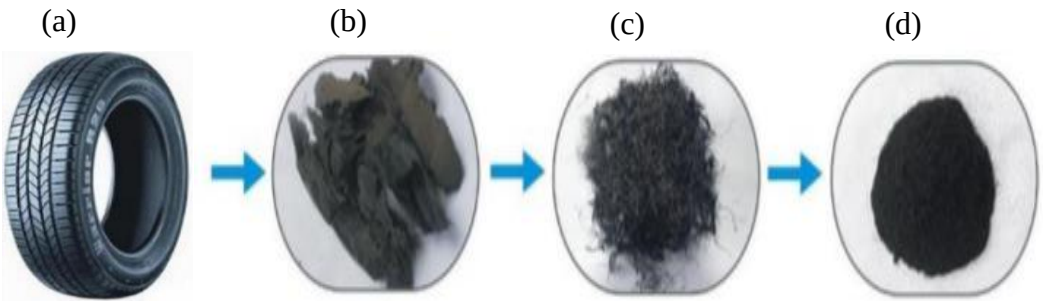


Figure 2. 3 : Traitement des pneus usés [109] : (a) pneu usé, (b) gros morceaux déchiquetés de caoutchouc, (c) fibres d'acier et (d) miettes de caoutchouc.

Si l'on compare le recyclage mécanique et les technologies thermiques, la différence est dans le traitement du caoutchouc au lieu des déchets d'acier. Les technologies thermiques sont plus susceptibles de donner des fibres d'acier recyclées pures, alors que les fibres récupérées par le recyclage mécanique sont mélangées aux particules de caoutchouc. Après la combustion du pneu usé, la surface d'acier est recouverte de sous-produits de combustion au lieu des particules de caoutchouc, ce qui contribue à une séparation de haute qualité et au nettoyage des matériaux en acier [111]. Mais, le recyclage de la plupart des fibres d'acier collectées de pneus usés est accompli grâce à la technologie de déchiquetage mécanique qui est moins chère que les technologies thermiques.

2.6 Caractéristiques physiques des fibres d'acier recyclées

La quantité de fibres d'acier extraites de pneus usés dépend du type de pneus. Ceux des véhicules légers contiennent 15% de composants en acier, tandis que ceux des camions contiennent jusqu'à 25% [107].

Les fibres d'acier obtenues à partir de pneus usés peuvent être droites ou légèrement déformées. Le diamètre de ces fibres varie entre 0.23 et 1.8 mm selon la méthode d'extraction. Les fibres extraites par processus de déchiquetage ont un diamètre d'environ 0.23 mm, tandis que, celles extraites par processus de pyrolyse induite par micro-ondes ont un diamètre compris entre 0.8 et 1.5 mm [107]. Les fibres peuvent être classées en macro ou micro selon leur longueur. Les macro-fibres ont une longueur variant entre 19 et 60 mm, elles sont efficaces pour ponter les fissures et fournir un support structurel dans le béton durci. La longueur et le diamètre des microfibres sont compris entre 2 et 10 mm et 0.1 et 1 mm, respectivement [112]. Les fibres d'acier sont généralement discontinues, de courte longueur et définies par le rapport d'aspect (longueur sur diamètre). Comme ces fibres sont suffisamment petites, elles peuvent être facilement et aléatoirement dispersées dans les mélanges des bétons.

Il existe un autre type de fibres : les fibres industrielles, elles sont regroupées sous plusieurs formes, droites, à extrémités crochets ou ondulées ; avec un rapport d'aspect, avec des diamètres, compris entre 20 et 100 [113]. Les fibres d'acier recyclées ont des formes irrégulières et des diamètres plus faibles que les fibres d'acier industrielles, ce qui se traduit par un rapport d'aspect plus élevé que celui des fibres industrielles.

Généralement, les fibres d’acier recyclées ont une meilleure résistance à la traction qui est presque deux fois égale à celle des fibres industrielles, en raison du rapport d'aspect plus élevé, d’une part. D’autre part, les fibres recyclées sont fabriquées à partir de pneus usés qui utilisent de l'acier de haute résistance pour la fabrication des voitures, alors que, les fibres industrielles utilisent des matières premières moins résistantes pour des raisons budgétaires.

2.7 Avantages des fibres d’acier recyclées

Les fibres d'acier industrielles (FAI) figurent parmi les fibres commerciales disponibles sous de nombreuses formes telles que les fibres d’acier à extrémités crochets, droites, ondulées et torsadées. Elles sont l'un des matériaux les plus utilisés et les plus convaincants pour améliorer les performances de flexion et la résistance du béton aux charges d'impact. Dans le monde, plus de 0.3 million de tonnes de fibres d'acier sont vendues chaque année et cette quantité augmente chaque année de 20% [115]. Cependant, un grand nombre d'industries sidérurgiques fonctionnent actuellement dans le monde entier et chacune, d'entre elles, utilise non seulement une énergie rigoureuse et des combustibles fossiles, mais provoque, également, des émissions de gaz à effet de serre pendant la production de l'acier.

En ce qui concerne les ressources naturelles et l'impact environnemental négatif dû aux émissions de CO_2 pendant la production de fibres d'acier à l'échelle industrielle, des recherches ont été réalisées pour trouver des alternatives durables et efficaces pour remplacer ces fibres d'acier coûteuses. Au cours des dernières années, l'application des fibres d'acier recyclées (FAR) récupérées à partir de pneus usés s'est avérée être un substitut encourageant aux FAI, avec un impact environnemental limité et un coût de recyclage moindre. Le béton renforcé par des FAR permet non seulement de résoudre les problèmes liés à l'empreinte de carbone élevée, mais aussi, d'offrir des propriétés mécaniques prometteuses pour les applications structurelles. Les FAR possèdent des propriétés mécaniques comparables à celles des FAI, et sont recommandées pour le renforcement des bétons [116].

Les récents développements dans l'application des FAR ont permis de résoudre les problèmes liés au coût élevé, à la mise en décharge des déchets et aux impacts environnementaux de la production industrielle de fibres d'acier. En effet, chaque année, plus de 500 000 tonnes de fibres pourraient être récupérées, en Europe grâce au recyclage

des pneus usés. En outre, le coût des FAR (environ 150 euros/tonne) est dix fois moins cher que celui des FAI (environ 1500 euros/tonne) [117]. Par conséquent, l'utilisation des FAR dans le béton peut également constituer une solution économique intéressante.

2.8 Bétons fibrés

Le béton est un matériau composite, fragile par nature, utilisé dans de nombreuses structures architecturales, fondations, murs, ponts, routes, barrages et réservoirs. En raison de ces diverses applications, de nombreux efforts de recherche ont été réalisés afin d'améliorer les propriétés du béton pour une meilleure applicabilité. L'une de ces tentatives a été l'introduction de l'acier dans le béton. Ces armatures conventionnelles se présentent sous forme de barres d'armature en acier placées à des endroits spécifiques de la structure pour résister aux contraintes de traction et de cisaillement imposées. D'autre part, les fibres d'acier sont généralement discontinues, réparties et dispersées de manière aléatoire dans les mélanges de bétons, ainsi, jouent- elles un rôle majeur dans la réduction de l'apparition des fissures qui peuvent se produire en raison des changements de température et de l'humidité relative. L'inclusion des fibres améliore le comportement mécanique des mortiers et des bétons, de plus, le rôle des fibres n’est pas seulement d'augmenter la résistance, elles ont, aussi, une influence positive significative sur la ténacité, la ductilité et la résistance aux charges dynamiques [118].

Le renforcement par des fibres ne remplace pas les barres d'armature en acier conventionnelles puisque les fibres et les barres d'acier jouent des rôles différents mais complémentaires dans l'amélioration des performances du béton. En outre, l'incorporation de fibres d'acier courtes et discontinues dans la matrice du béton pendant le mélange donne un béton renforcé par des fibres d'acier. Au cours des dernières décennies, une littérature importante et croissante a étudié l'application des différentes fibres d’acier dans les composites à base de ciment. Le béton fibré s'est révélé utile dans des nombreuses applications telles que les revêtements des tunnels, les structures hydrauliques, les dalles, les ponts, les fondations et les éléments préfabriqués [119]. Les fibres d'acier sont également utiles dans les domaines des chaussées qui permettent d'obtenir une résistance élevée à la flexion, de réduire l'épaisseur totale de la chaussée et d'augmenter la résistance aux impacts et aux charges répétées [120].

La dispersion homogène des fibres pendant le mélange du béton est un facteur principal pour améliorer les performances mécaniques, par adhérence et frottement

mécanique. Par ailleurs, le module, le type, le rapport d'aspect, la résistance, la caractéristique de liaison de la surface, l'orientation des fibres, la teneur et les effets de la taille des agrégats ont été identifiés comme des facteurs qui améliorent la propriété élastique du béton [119].

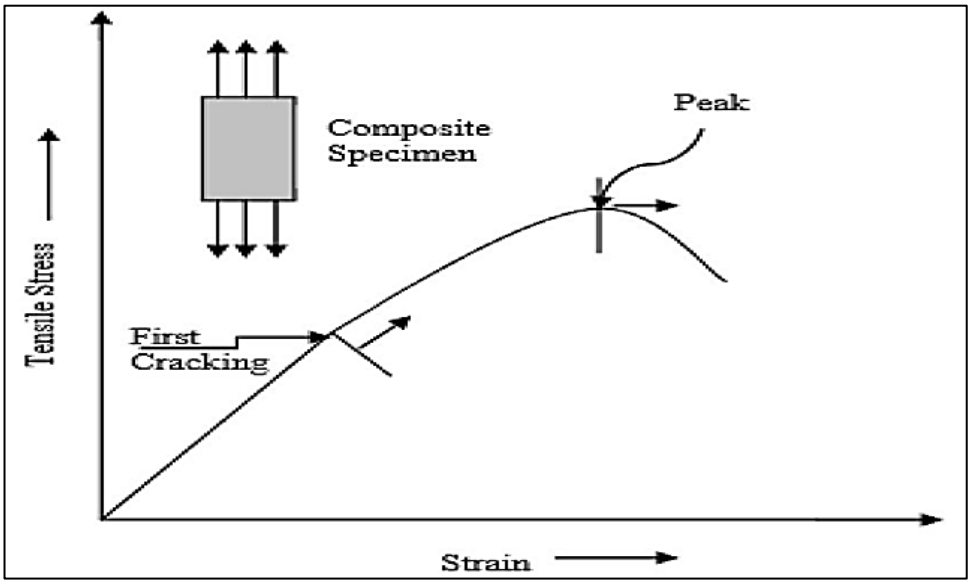


Figure 2. 4 : Nature ductile du béton renforcé par des fibres d'acier [119].

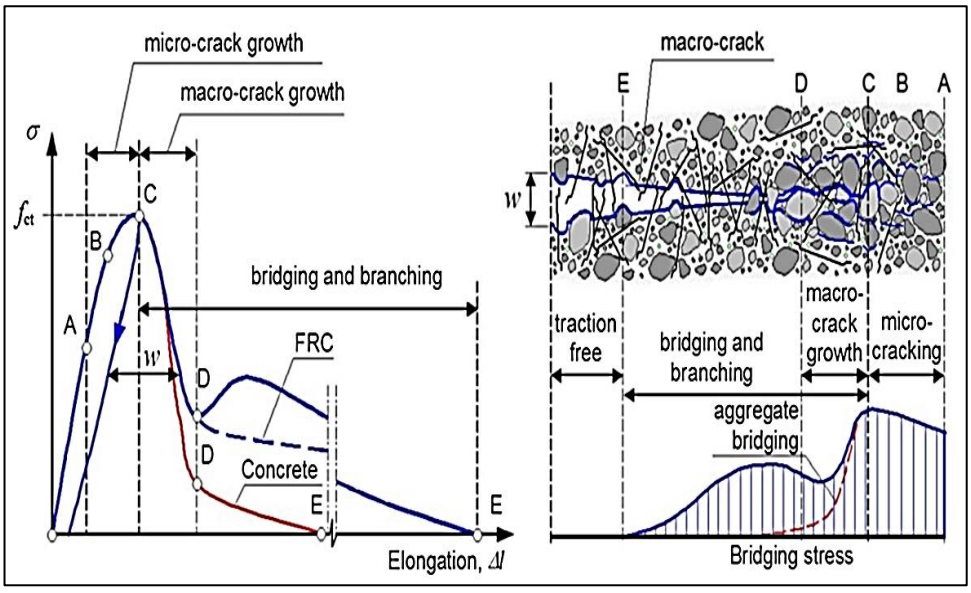


Figure 2. 5 : Schéma descriptif des relations d'ouverture des fissures sous contrainte du béton fibré [112].

Vu la capacité des fibres d'acier d'arrêter et de contrôler la propagation des fissures et leur capacité d'absorber l'énergie après fissuration, elles sont incluses dans le béton pour améliorer la résistance à la traction (fendage/flexion), ce qui offre une résistance à la traction contre le retrait de séchage et plastique [119]. La nature ductile du béton fibré est présentée dans la figure 2.4. Il existe, aussi, un effet combiné de pontage des agrégats et des fibres dans le béton fibré et, si on compare les deux types d'effet (agrégats et fibres d'acier), l'effet de pontage des fibres d'acier est plus important, comme le montre la figure 2.5. Le processus d'empêchement de la fissure à la rupture peut être divisé en trois zones : (1) une zone de microfissuration et de croissance des microfissures, (2) une zone de pontage et (3) une zone de traction libre [112].

2.9 Influence des fibres d'acier recyclées sur les propriétés des bétons à l'état frais

2.9.1 Ouvrabilité des bétons fibrés

L'ouvrabilité joue un rôle important en affectant la consistance, la pompabilité, la compactibilité et la dureté du mélange de béton. Bien que les fibres contribuent à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton, la réduction de l'ouvrabilité ne doit pas être ignorée pendant le processus de malaxage du béton fibré [121]. Par ailleurs, il a été observé que l'inclusion des FAR et des FAI a entraîné une diminution de l'ouvrabilité. Cependant, les FAR montrent une moindre réduction de l'ouvrabilité que les FAI dans les mélanges des bétons [122].

Dans l'article de Leone et al. [123], les auteurs ont augmenté le dosage de superplastifiant afin de garder la même ouvrabilité, pour le béton de référence et pour les bétons fibrés avec des FAI et des FAR, selon les limites rapportées dans les recommandations Européenne (EFNARC) [124]. Une quantité de superplastifiant est égale à 1.4 kg/m^3 pour le béton de référence, 1.19 kg/m^3 pour le béton avec des FAR et 2.07 kg/m^3 pour le béton avec des FAI. Il a été constaté que, par rapport au béton renforcé par des FAR, celui avec des FAI contient une plus grande quantité de superplastifiant pour la même valeur d'ouvrabilité. Cela est la conséquence de la forme irrégulière de la plupart des FAR et le rapport d'aspect le plus élevé que celui des FAI, qui rend difficile le processus d'intégration entre les fibres. En outre, l'augmentation du taux de superplastifiant indique que l'inclusion des fibres peut réduire l'ouvrabilité. La même constatation a été faite par Centonze et al. [113].

Une étude a été menée sur les propriétés mécaniques et le comportement d'arrachement d'un béton contenant différentes fractions volumétriques de FAR allant de 0.13% à 0.26%. Les résultats ont prouvé qu'avec l'augmentation de la teneur en fibres, la maniabilité est significativement réduite lorsqu'une bétonnière traditionnelle a été utilisée. En particulier, le mélange de béton avec 0.26% de FAR avait une valeur d'affaissement nulle. D'autre part, le malaxeur verticale planétaire s'est avéré être une solution technologique pour la dispersion uniforme des fibres d'acier recyclées sans aucun effet négatif sur l'ouvrabilité, même à une concentration élevée allant jusqu'à 0.46 % en volume [125].

La concentration des fibres, le rapport d'aspect et les caractéristiques géométriques des fibres influencent de manière significative l'homogénéité des mélanges de béton frais renforcés par des fibres d'acier. Les FAR de Sengul [126] ont été récupérées à partir de pneus usés avec différentes caractéristiques géométriques et différents dosages de fibres. L'auteur a souligné qu'avec l'augmentation de la teneur en FAR, l'ouvrabilité est significativement réduite. En particulier, une valeur d'ouvrabilité égale à zéro pour le mélange avec 40 kg/m^3 de FAR a été enregistrée avec un diamètre moyen et une longueur de fibres séparées de 0.60 et 50 mm, respectivement. De plus, l'ajout des FAR à 5, 10 et 15 kg/m^3 a diminué l'ouvrabilité de 35.7%, 50% et 57%, respectivement, pour un diamètre moyen de 0.30 mm, comparé à un béton de référence à base de fibres commerciales. Cependant, une réduction significative de l'ouvrabilité a été observée jusqu'à 28.6%, 71.4%, 93% et 100%, lorsque les dosages des FAR étaient de 10, 20, 30 et 40 kg/m^3, respectivement, pour 0.60 mm de diamètre, comme il est montré dans la figure 2.6.

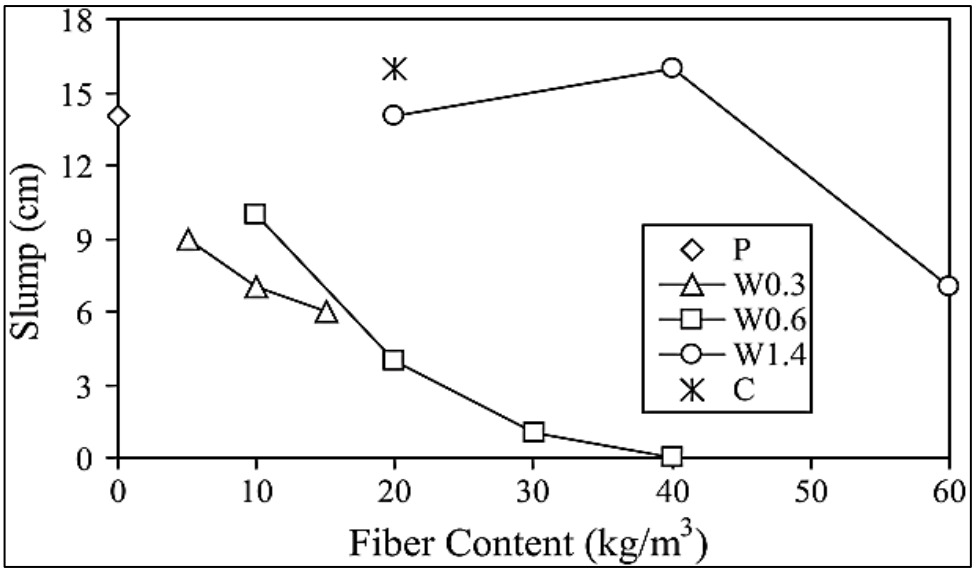


Figure 2. 6 : Effet des fibres d'acier recyclées sur l'ouvrabilité du béton [126].

Dans le même contexte, une autre recherche [127] a été menée sur les performances mécaniques des mélanges de béton contenant des FAR avec différentes fractions volumiques. Les chercheurs ont observé qu'avec l'incorporation et l'augmentation du taux de fibres de 0.5% à 1.0%, l'ouvrabilité est, significativement, réduite comparée à celle des mélanges de béton de référence sans fibre.

La tendance des fibres d'acier de se chevaucher au moment du mélange a été identifiée comme un autre problème potentiel dans la diminution de l'ouvrabilité des bétons renforcés. Selon Papakonstantinou et Tobolski [128], l'ajout de fibres en fractions volumiques supérieures à 2% a provoqué une réduction très significative de l'ouvrabilité des mélanges. Cette réduction importante a été attribuée à la capacité de chevauchement des FAR au moment du malaxage dû au manque d'uniformité dans la taille et dans la forme, donnant lieu à des zones localisées avec une teneur élevée en FAR, ce qui est appelé "effet de boule". En outre, les fibres ont augmenté la surface des composites de béton qui ont consommé plus d'eau et de superplastifiant, ce qui réduit l'ouvrabilité des mélanges des bétons frais.

D'autre part, dans les expériences de Rossli et Ibrahim [129], les auteurs ont déclaré que l'effet de boule des FAR peut provoquer une augmentation inhabituelle de l'ouvrabilité lorsque la teneur des FAR est supérieure à 0.6%, en effet, l'ouvrabilité a augmenté de 30 mm lorsque le dosage des fibres a atteint 0 .8%. Cette augmentation étrange est principalement due à l'effet de boule des fibres, en raison des formes aléatoires des FAR, les risques potentiels d'effet de boule augmentent avec l'ajout de fibres. Néanmoins, les problèmes liés à l'effet de boule, dans le béton, pourraient être résolus par l'utilisation de superplastifiants et des granulats de taille plus petite [130]. Pour cela, le béton autoplaçant pourrait montrer une meilleure coopération avec les FAR que le béton normal et afin d'éviter l'effet de boule, certaines recommandations ont été faites :

-l'ajout progressif des fibres d'acier recyclées durant le mélange,

-la dispersion des fibres d'acier recyclées après le malaxage humide de tous les ingrédients dans un malaxeur [131];

-le rapport d'aspect des FAR limité à 200;

-une fraction volumique de 0.5% et 30 kg/m^3 de FAR. Cependant, en raison de l'amélioration de l'ouvrabilité et de la fluidité du béton autoplaçant, la limite de la teneur

en fibres d'acier a été augmentée de 30 kg/m^3 à 60 kg/m^3 (0.8%) sans effet de boule indésirable [132];

-le mélangeur planétaire vertical et l'ajout de superplastifiants améliorent efficacement l'ouvrabilité et la dispersion des fibres d'acier recyclées dans le béton frais.

2.9.2 Teneur en air

Selon Leone et al. [122], l'ajout de fibres de pneus usés peut réduire l'ouvrabilité, ce qui signifie que l'ouvrabilité du béton présente une tendance décroissante avec l'augmentation du taux de fibres. Les fibres recyclées créent, entre elles et le mélange de béton, des micro-vides qui entraînent, par la suite, une augmentation de la teneur en air. En effet, l'ajout des fibres rend plus difficile la consolidation de fibres avec le mélange, ce qui entraîne une augmentation des vides entre la fibre et les agrégats [133].

Smrkić et al. [134] affirment que les FAR améliorent moins la teneur en air que les FAI. La raison pour laquelle les fibres recyclées augmentent la teneur en air, est due à leurs formes irrégulières qui provoquent ainsi plus de micro-vides dans le béton. Avec l'augmentation de la teneur en air, la force de compression montre une tendance décroissante, ce qui signifie que l'augmentation des micro-vides comporte des risques potentiels dans le développement des microfissures, ce qui entraîne une perte de résistance.

D'autre part, les résultats de béton hybride (FAI et FAR) impliquent que l'ajout des FAR dans le béton, qui contient des fibres industrielles, contribue à une augmentation de la teneur en air. En outre, la fraction volumique des fibres totales joue un rôle principal dans la teneur en air et la valeur maximum ajoutée était de 60 kg/m^3 [135].

2.9.3 Ouvrabilité du BAP fibré

Le BAP est un matériau prometteur pour améliorer l'ouvrabilité du béton frais et réduire en même temps le risque de conglobation des fibres. Comparé au béton conventionnel, le BAP a, généralement, une fraction volumique de pâte plus importante qui offre plus d'espace à la distribution des fibres et réduit l'interaction entre elles, assurant, ainsi, une bonne ouvrabilité du béton. Sur cette base, des BAP renforcés avec des fibres, avec une excellente maniabilité, ont été préparés avec succès en utilisant un superplastifiant et en contrôlant la teneur maximale en fibres [136]. Cependant, les études de l'effet de l'utilisation des FAR, dans les mélanges de béton, sur les propriétés fraîches et durcies sont rares, notamment dans le BAP.

Mastali et Dalvand [131] ont étudié les effets du remplacement du ciment par de la fumée de silice dans le BAP renforcé par des FAR, avec différentes fractions volumiques de 0.25%, 0.5% et 0.75%, et ce, pour caractériser les propriétés fraîches. Les résultats ont montré que l'augmentation de la teneur de la fumée de silice a conduit à une réduction de l'ouvrabilité. Une réduction maximale de 5% du diamètre d'étalement a été enregistrée pour le mélange qui contient 14% de fumée de silice, par rapport à celui avec 7%. De plus, l'ajout des FAR intensifie cette réduction en raison de l'augmentation de la viscosité des BAP. La réduction maximale d'étalement lors de l'ajout simultané de la fumée de silice et des FAR a été de 15% environ, par rapport au mélange de contrôle, en raison du remplacement par 14% de fumée de silice et l'ajout de 0.75% de FAR, comme il est illustré dans la figure 2.7.

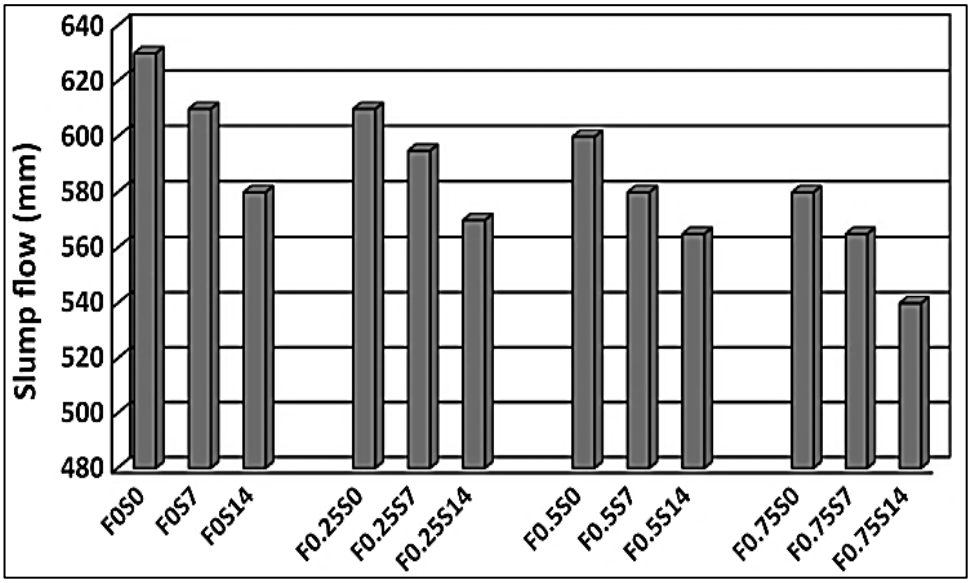


Figure 2. 7 : Effet de la fumée de silice et des FAR sur l'étalement des BAP [131].

Une étude expérimentale de Simalti et Singh [116] a présenté le comportement à l'état frais des BAP avec 0.5% à 1.5% de FAR extraites de pneus déchiquetés et des FAI. Les auteurs ont montré que l'introduction des fibres a réduit l'ouvrabilité des mélanges, par rapport au BAP de référence; cette diminution de l'étalement a été observée suite à l'inclusion et l'augmentation du taux de fibres indépendamment de leur type. De plus, l'ajout des FAR dans les BAP a donné une meilleure ouvrabilité et le besoin en superplastifiant diminué par rapport à ceux avec des FAI.

Selon Bensaci et al. [137], l'ajout des FAR a réduit le diamètre d'étalement; en outre, ils ont noté que le mélange avec 1.5% de fibres n'est pas considéré comme un BAP (diamètre inférieur à 550 mm). L'ajout de taux élevés de FAR a affecté la fluidité des BAP, car les fibres empêchent l'écoulement de la pâte de ciment. De plus, l'effet des FAR sur les BAP avec plusieurs teneurs et en multi couches a été examiné par Köroğlu [138], il a été observé que l'ouvrabilité du béton frais a diminué avec l'augmentation de la fraction volumique de fibres. Cependant, l'ouvrabilité a été améliorée avec un adjuvant plastifiant polymère à base de polycarboxylates qui a, également, permis une distribution plus uniforme des fibres dans le béton. Il a été signalé, aussi, que lorsque le pourcentage de ces fibres dépasse 1%, il est impossible d'obtenir un BAP.

Selon Younis et al. [139], la réduction de l'étalement due à l'ajout de FAR pourrait être attribuée à la résistance à l'étalement qui se développe, en raison de la présence de ces fibres, augmentant ainsi le frottement interne entre les particules des agrégats et les fibres. L'augmentation du frottement interne augmente proportionnellement avec la teneur en fibres. De plus, la rigidité élevée des fibres d'acier pourrait être l'une des sources d'augmentation probable de frottement inter-particulaire sous l'étalement libre avec une absorption possible d'énergie de mouvement. Par ailleurs, en termes de la teneur des FAR, l'enchevêtrement des fibres a provoqué une réduction de l'étalement.

2.9.4 Capacité de passage

Younis et al. [139] ont montré que l'incorporation de FAR affecte négativement la capacité de passage des mélanges. La réduction du rapport de blocage de la boîte en L dépend de la teneur en fibres, est peut être attribuée à la présence des fibres qui agissent comme des obstacles et décélèrent le mouvement. En outre, les fibres pourraient conduire à une réduction d'énergie interne nécessaire empêchant le mélange de se déplacer librement.

Bensaci et al. [137] ont remarqué un blocage dès que l'ajout de fibres aux mélanges. Ce blocage est important lorsque le taux de fibres d'acier dépasse 0.8% (Figure 2.8). Selon les recommandations Européennes des BAP, le ratio de blocage (H_2/H_1) doit être supérieur à 80%, sinon, les mélanges ne peuvent pas être considérés comme des BAP.

Simalti et Singh [140, 141] ont étudié le comportement des BAP renforcés par des FAR à l'état frais, ils ont conclu que l'écoulement dans l'essai J-Ring est réduit lorsque le volume des fibres augmente de 0.5% à 1.5%, ce qui crée une diminution du diamètre

d’étalement mais aucune différence de niveau n’a été observée entre le béton restant à l'intérieur de l’anneau et celui passé à travers.

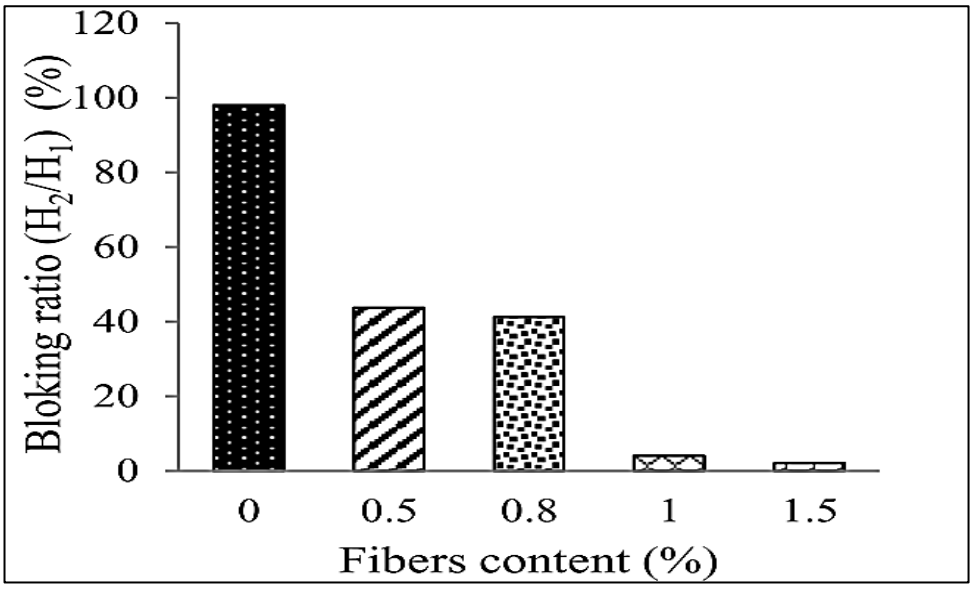


Figure 2. 8 : Effet des fibres recyclées sur la capacité de passage du BAP [137].

2.10 Influence des fibres d’acier recyclées sur les propriétés des bétons à l’état durci

2.10.1 Résistance à la compression

Plusieurs recherches ont été menées pour étudier l'effet de l’ajout des FAR sur les propriétés mécaniques dans les composites de béton. Les résultats de l'influence des FAR sur la résistance à la compression ont montré une diminution significative de la résistance lors de l'ajout des FAR avec des fractions volumiques supérieures à 2% [128]. Cette chute de résistance peut être due aux FAR, qui sont constituées à la fois de particules de caoutchouc et de fils d'acier, ce qui produit ainsi une zone faible à l'intérieur du béton. Par conséquent, lorsque les échantillons ont été chargés, des fissures se sont produites à l'interface entre les fibres d'acier et la matrice, puis, ces fissures se sont propagées et ont conduit à la rupture [142].

Dans le même contexte, des résistances à la compression similaires à celles du béton témoin ont été obtenues par Tlemat et al. [143], lorsqu’ils ont ajouté 0.5% et 1% des fibres d’acier collectées à partir de pneus usés, par contre, une réduction significative de la résistance à la compression a été observée lorsqu'ils ont utilisé 2% de fibres.

Une recherche similaire a été menée par Martinelli et al. [144] qui n'ont constaté aucune différence dans la résistance à la compression des échantillons de béton conçus avec des FAI seuls et celles de ceux conçus avec une augmentation de FAR avec une teneur de 0.5% de fibres. En outre, l'analyse des images de microscopie électronique à balayage a montré que les rainures profondes à la surface des FAR (Figure 2.9) améliorent les propriétés d'adhérence et l'interaction avec la matrice environnante par rapport à la surface lisse des FAI (Figure 2.10).

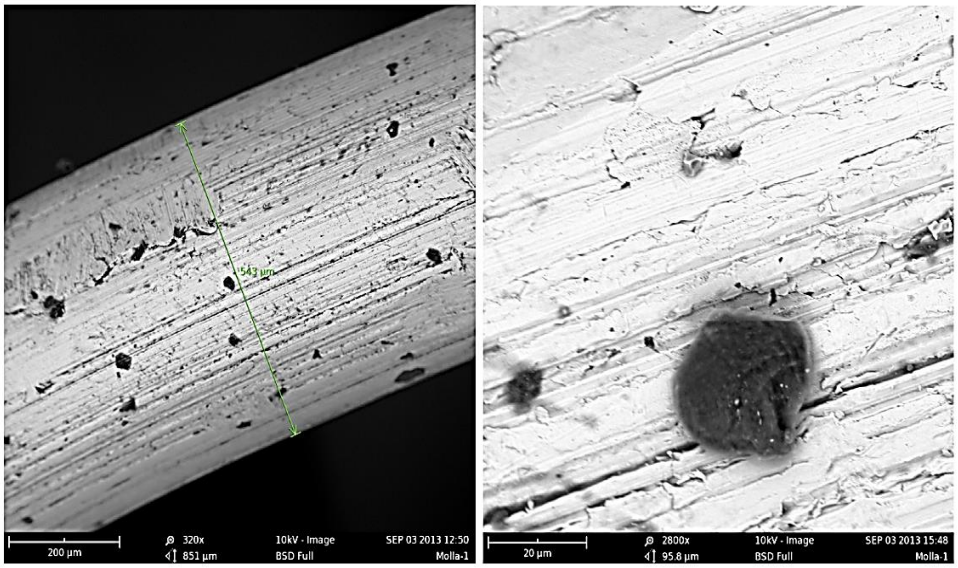


Figure 2. 9 : Image de microscopie électronique à balayage pour la topologie de surface des FAR aux différents grossissements [144].

Caggiano et al. [145] ont révélé que l'ajout de FAI et FAR avec une fraction volumique de 1.25% a entraîné une réduction de la résistance à la compression de 5%, par rapport au béton de référence. Cependant, une amélioration de la résistance à la compression a été observée avec des dosages plus faibles (0.75% et 1%).

D'autres études ont affirmé qu'il a été possible d'augmenter la résistance à la compression du béton en ajoutant une quantité limitée de FAR. Un programme de recherche expérimentale a été mené pour étudier l'influence de l'ajout de FAR sur les performances mécaniques du béton. Les résultats indiquent que l'ajout de FAR avec des fractions volumiques de 0.5% et 1% a augmenté la résistance à la compression, ce qui montre que la fraction volumique des fibres a un grand impact sur la résistance [127]. En outre, un effet synergique positif a été observé entre les FAR et les FAI avec une fraction

de 0.5% et 1%, respectivement; un meilleur arrêt des fissures et une meilleure capacité d'ancrage (Figures 11 et 12) ont entraîné une augmentation de la résistance à la compression [146].

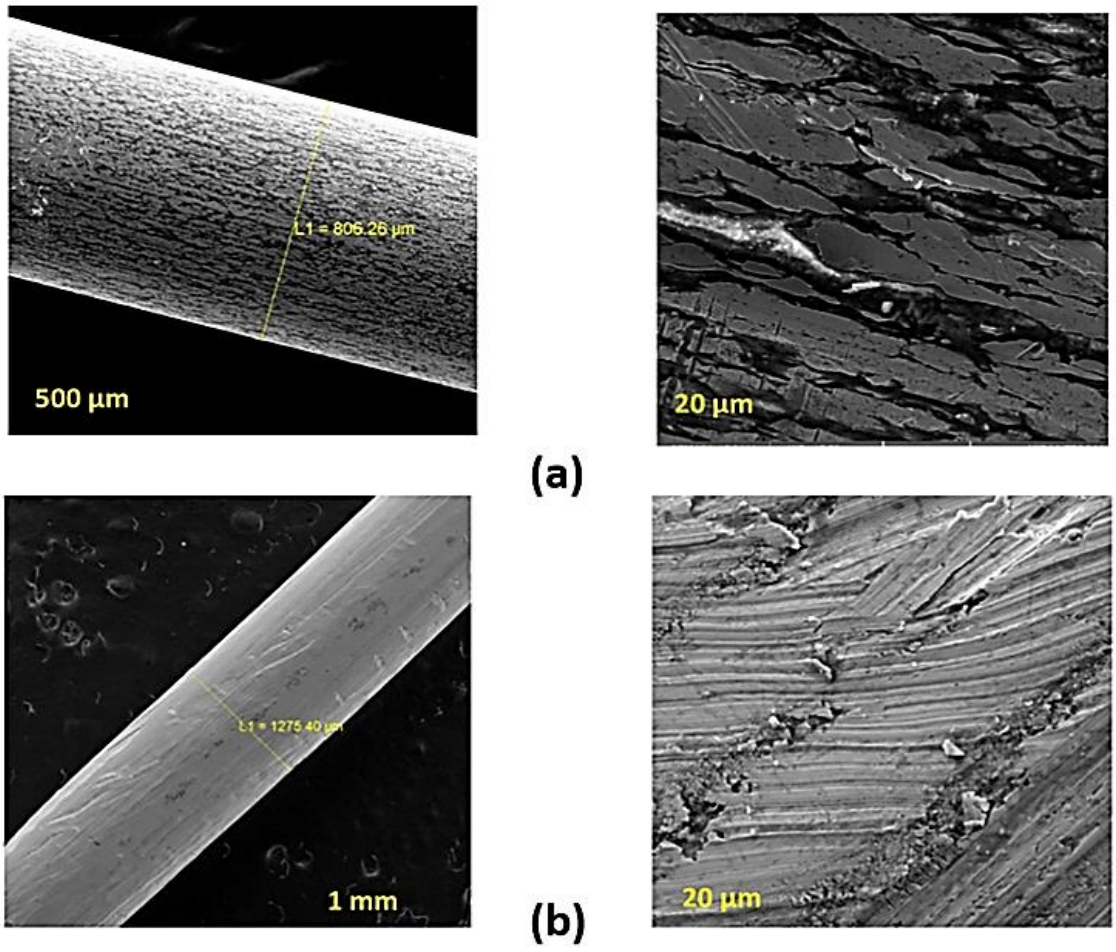


Figure 2. 10: Morphologie de la surface de (a) FAI, (b) FAR [146].

D’autre part, une autre recherche expérimentale a été menée sur la caractérisation mécanique des bétons avec des fibres d'acier, extraites de pneus de différentes tailles et avec de faibles fractions de volume. Il a été constaté que l'ajout de fibres, avec des fractions volumiques de 0.23% et 0.46%, a conduit à une augmentation de la résistance à la compression. Ce résultat peut être attribué aux formes géométriques irrégulières et aléatoires des FAR qui ont permis de limiter la déformation au moment du chargement, de retarder la propagation des fissures et d’améliorer la résistance à la compression [113].

L'explication raisonnable devrait se concentrer sur la taille du vide entre les fibres et les agrégats. Lorsque la teneur en fibres est faible, l'effet de remplissage des fibres contribue à

fermer la structure interne. Cependant, comme expliqué dans la partie de la teneur en air, cette dernière montre une tendance croissante avec l'ajout de fibres. Le problème principal est que le vide entre les différents paramètres du mélange de béton s'agrandit avec l'ajout de fibres, ce qui conduit au développement de microfissures avec une diminution de la résistance [123]. La technologie avancée de compactage du béton autoplaçant améliore la résistance à la compression [148].

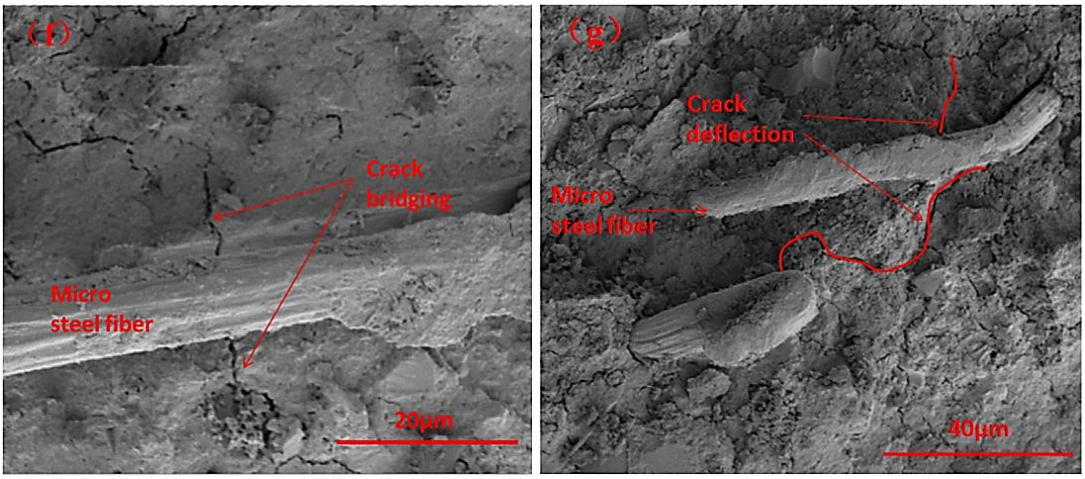


Figure 2. 11 : Pontage des fissures par les fibres [147].

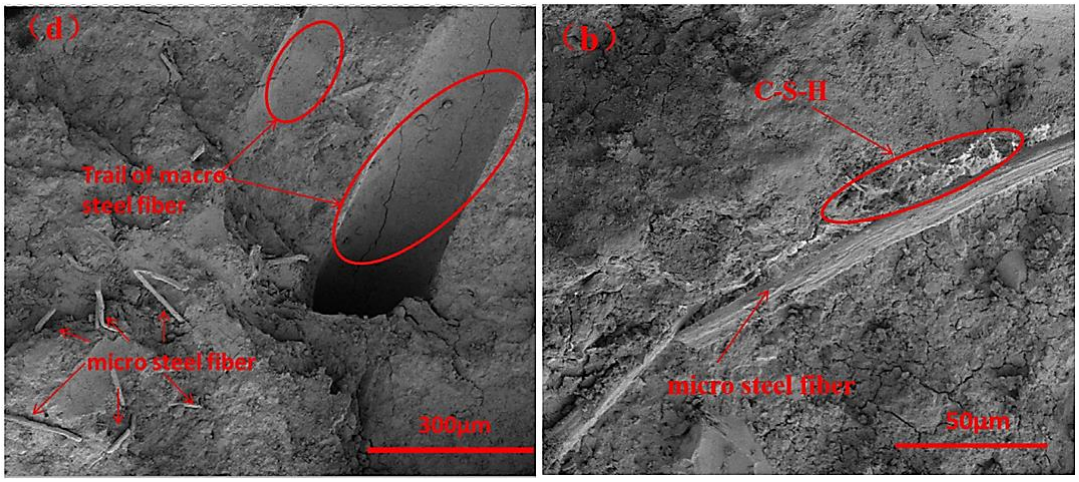


Figure 2. 12 : Empreinte d'ancrage des fibres [147].

2.10.2 Résistance à la flexion

Le béton est un matériau fragile et l'ajout de fibres vise à modifier le mode de rupture du béton, de fragile à ductile [99]. Les FAR peuvent empêcher l'apparition des fissures et retarder leur propagation, lorsqu'une source de charge est appliquée aux échantillons de béton, d'où l'amélioration du comportement de résistance [149].

Une étude expérimentale a été réalisée par Younis [150] sur les caractéristiques mécaniques du béton renforcé avec des fibres d'acier récupérées à partir de pneus recyclés. Afin de démontrer la performance des FAR, il a également utilisé des FAI; les résultats ont révélé que l'incorporation de FAR et de FAI a amélioré la résistance à la flexion; ils ont aussi confirmé que les FAR peuvent être un matériau prometteur pour obtenir un béton renforcé.

De même, une autre expérience [143] a été réalisée sur l'influence des FAR sur la résistance à la flexion des bétons. Deux types de FAR de tailles et de fractions volumiques différentes ont été utilisées, les unes ont été obtenues par déchiquetage et les autres par pyrolyse. Les résultats ont montré que l'incorporation de deux types de FAR a amélioré la résistance à la flexion du béton. De plus, une grande amélioration de la résistance à la flexion a été obtenue avec les FAR collectées avec le processus de pyrolyse, 50 mm de longueur et 0,8-1,55 mm de diamètre, par rapport à celles collectées avec le processus de déchiquetage, de 0.23 mm et 20 mm de diamètre et de longueur, respectivement. Les chercheurs ont conclu que l'augmentation de la longueur et du volume des FAR a amélioré le comportement à la flexion.

Mastali et Dalvand [131] ont examiné l'influence des FAR sur la résistance mécanique et sur la résistance au choc des BAP. Pour atteindre leur objectif, ils ont utilisé quatre fractions volumiques différentes de FAR (0%, 0.25%, 0.5% et 0.75%). Ils ont indiqué que le comportement contrainte-déplacement s'est amélioré avec l'augmentation de la teneur en FAR, comme il est illustré dans la figure 2.13. De plus, la résistance résiduelle après la fissuration a augmenté lors l'utilisation de quantités plus élevées de FAR. L'amélioration maximale de la charge et de la déflexion pour le mélange qui contient 0.75% de fibres était, environ, 7 fois supérieure à celle du béton témoin. Cette évolution peut être attribuée à l'action de pontage des FAR qui empêche les fissures, non seulement, de s'ouvrir encore plus, mais aussi, la formation de nouvelles fissures à proximité.

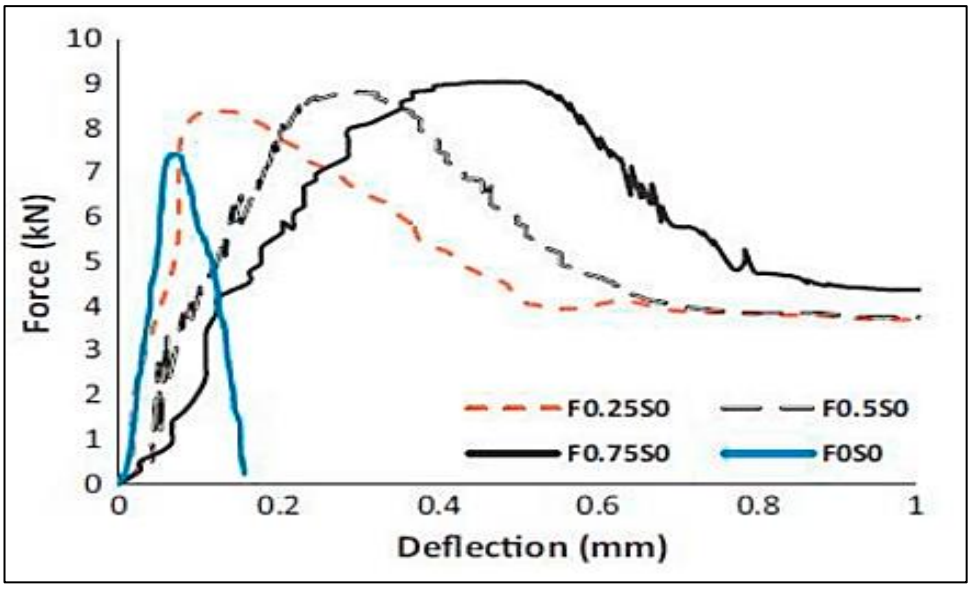


Figure 2. 13: Effet des FAR sur le comportement charge-déflexion des BAP [131].

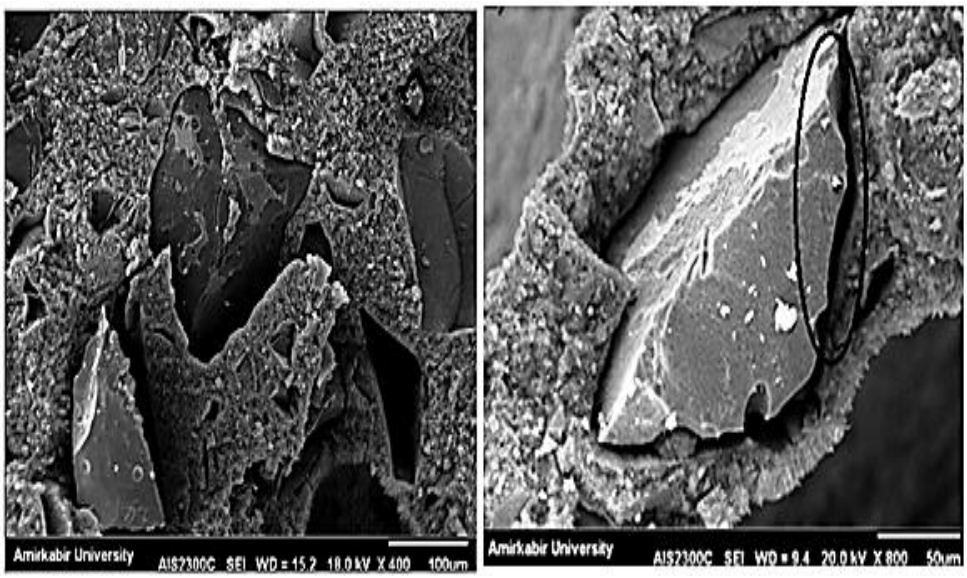
2.11 Béton recyclé fibré

En raison de la mauvaise adhérence de la pâte et du mortier, les granulats recyclés entraînent un affaiblissement de la zone de transition interfaçiale, ce qui provoque, non seulement, une dégradation de la résistance, mais aussi, des problèmes de durabilité dans les bétons recyclés. La microstructure des bétons recyclés qui est poreuse avec une interface faible est présentée dans la figure 2.14. En ce qui concerne les propriétés à l'état frais, il a été souligné, dans le premier chapitre, que la réduction de l'ouvrabilité dans le béton recyclé est plus importante par rapport à celle du béton avec des granulats naturels.

Quant aux propriétés à l'état durci, il a été signalé que la capacité de la charge en compression, la capacité de la charge en traction et le module d'élasticité du béton recyclé sont inférieurs à ceux du béton avec des granulats naturels, en raison de la faible qualité des granulats, de la faible liaison entre le ciment et le granulat et de l'existence de fissures transversales dans les granulats pendant le processus de recyclage [152].

Pour améliorer la microstructure et la résistance du béton recyclé, diverses techniques ont été adoptées, qui comprennent principalement le prétraitement des granulats recyclés et l'ajout de fibres appropriées aux bétons recyclés. Les faibles performances d'adhérence de la zone de transition interfaçiale, dans le béton recyclé, peuvent être améliorées par l'utilisation de fibres qui pontent efficacement les microfissures et améliorent ainsi les

propriétés mécaniques. Cependant, il est important de choisir le type et le dosage appropriés de fibres qui affectent grandement l'ouvrabilité et la résistance du béton.



(a) (b)

Figure 2. 14 : (a) Microstructure des bétons recyclés et (b) Granulat recyclé et matrice environnante [151].

En outre, par rapport au béton, l'ajout de ces fibres (FAR) dans le béton recyclé est plus bénéfique à plusieurs niveaux. Premièrement, puisque la matrice dans le béton recyclé est faible et que la liaison entre le ciment et les agrégats est mauvaise, l'effet des fibres sur les propriétés de traction est plus prononcé. Les fibres contribuent efficacement à la prévention de la formation et la propagation des microfissures, grâce à leur petite taille qui retarde l'apparition et l'expansion des microfissures initiales dans la matrice du béton, ce qui améliore les propriétés mécaniques et la durabilité du béton recyclé [153, 154]. Deuxièmement, en raison du mortier adhéré, les granulats recyclés entraînent des fissures de retrait plus importantes dans le béton recyclé. L'utilisation des fibres aide le béton recyclé à contrôler l'expansion des fissures de retrait, les déformations thermiques et permet ainsi d'obtenir un béton durable. Troisièmement, en raison de leur point de fusion élevé, d'environ 1370 C°, et de leur stabilité thermique, ces fibres améliorent la résistance du béton recyclé contre l'écaillage (éclatements) excessif et la dégradation de la résistance mécanique [155].

2.12 Conclusion

La synthèse bibliographique de ce chapitre a été menée dans le but d'étudier le comportement des bétons renforcés avec des fibres d'acier recyclées récupérées à partir de pneus usés et leur influence sur les performances des bétons, à base de granulats naturels, à l'état frais et durci, ainsi que leur influence sur les propriétés des bétons à base de granulats recyclés.

La littérature consultée a montré que, dans les bétons renforcés, les fibres d'acier collectées à partir de pneus usés peuvent améliorer le comportement contrainte-déplacement, ainsi que les caractéristiques mécanique et le retrait des bétons, suite à leur action de pontage et d'empêchement de l'ouverture et de la propagation des fissures. Ainsi, les fibres d'acier recyclées peuvent compenser la détérioration des propriétés mécaniques et celle du retrait dans les bétons de granulats recyclés. L'analyse bibliographique a, également, révélé que l'introduction de fibres issues du recyclage influe négativement sur la rhéologie des bétons, mais cela peut être amélioré par l'utilisation du laitier.

La plupart des études sur les bétons fibrés se sont concentrées sur les caractéristiques mécaniques. Actuellement, il existe très peu d'études sur l'état frais et durci des bétons traditionnels renforcés avec des fibres de déchets de pneus et, encore, moins sur ceux des BAP. Par ailleurs, il faut bien noter qu'il n'existe pas d'étude sur les performances de durabilité des bétons renforcés avec des fibres d'acier recyclées.

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET ESSAIS

3.1 Introduction

Ce chapitre identifie les principales caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des mélanges ainsi que les méthodes de formulation et le mode opératoire des essais réalisés.

3.2 Caractérisation des matériaux

3.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment algérien de type CEM II-B, provenant de l'usine de ciment Lafarge dans la wilaya de M'sila, en Algérie. Selon la norme EN 196-1 [156], la résistance à la compression du mortier de ciment normalisé est égale à 42.5 MPa à 28 jours, la masse volumique absolue égale 3050 kg/m³ et la finesse égale 3900 cm²/g. La composition chimique est donnée dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1 : Composition chimique du ciment.

Elément	**CaO**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**SO_3**	**K_2O**	**Na_2O**	**PAF**
Contenant (%)	61.95	15.82	3.77	2.75	1.39	2.14	0.52	0.01	13.3

3.2.2 Laitier

Le laitier granulé de haut fourneau (L) qui provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba) et qui se présente sous forme de grains sphériques, de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair, est utilisé comme substitut de ciment afin d'améliorer la rhéologie et la durabilité du BAP dans cette étude. Il est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin. Afin d'utiliser ce dernier dans les différentes compostions des BAP, il faut procéder à son étuvage à 50 °C pour éliminer toute éventuelle humidité et faciliter ainsi son broyage, qui se fait à l'aide d'un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg; la quantité obtenue après le broyage doit être bien mélangée pour assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Sa masse

volumique absolue et sa finesse sont, respectivement, de 2810 kg/m^3 et 4300 cm^2/g. Le Tableau 3.2 présente l'analyse chimique du laitier.

Tableau 3. 2 : Composition chimique du laitier.

Elément	**CaO**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**SO_3**	**K_2O**	**Na_2O**	**CO_2**
Contenant (%)	38.86	40.83	9.18	0.192	6.8	1.44	0.546	0.076	1.35

3.2.3 Granulats naturels

3.2.3.1 Sable

On a aussi utilisé des granulats naturels. Le sable utilisé est un sable de dune de la classe 0/5 provenant de la région d'Oued Souf. La figure 3.1 présente la distribution granulométrique du sable étudié et le tableau 3.3 présente ses caractéristiques physiques et mécaniques.

3.2.3.2 Gravier

Des graviers concassés de la classe 3/8 et de la classe 8/15 proviennent de gisement de calcaire de la carrière de Sétif. La figure 3.1 présente la distribution granulométrique des granulats naturels et le tableau 3.4 présente leurs caractéristiques physiques.

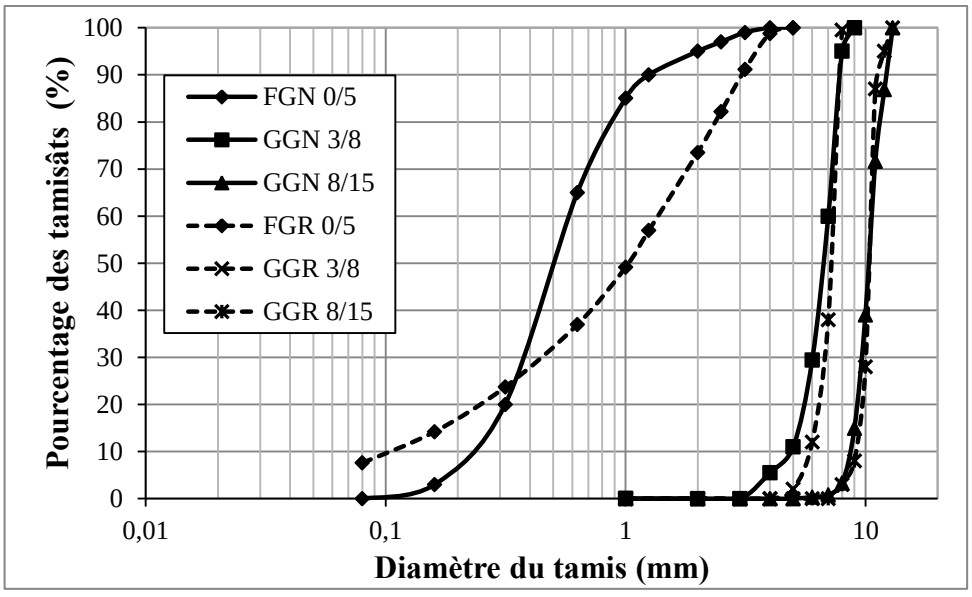


Figure 3. 1 : Courbe granulométrique de sable et de gravier.

Tableau 3. 3 : Propriétés physiques et mécaniques du sable naturel.

Caractéristiques	**Sable**
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m³)	1500
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m³)	2650
Module de finesse (Mf)	2.24
Coefficient d'absorption (%)	1.34

Tableau 3. 4 : Propriétés physiques du gravier naturel.

Granulats	Classe granulaire (mm)	ρ_{app} (kg/m³)	ρ_{abs} (kg/m³)	Coefficient d'absorption
Gravier	3/8	1500	2631	0.79%
	8/15	1500	2610	0.59%

3.2.4 Granulats recyclés

Les granulats recyclés sont obtenus à partir du concassage mécanique d'une dalle de béton d'une longueur de 8 m, avec une largeur de 4 m et une épaisseur de 0.25 m coulée avec un béton prêt à l'emploi, dosé à 350 kg/m³, fournit par une centrale « KC béton » situé à Oued Samar, suivi d'un tamisage. La composition d'un mètre cube de béton est établie selon la méthode de Dreux [157], avec 1040 kg de gravier, 814 kg de sable et 350 kg de ciment. Le rapport E/C est de 0.5, l'affaissement au cône d'Abrams est de 12 cm (béton très plastique) et la résistance à la compression moyenne à 28 jours est de 30 MPa.

Après le coulage du béton, la dalle est protégée par un film polyane afin d'éviter l'évaporation de l'eau, elle est arrosée durant les sept premiers jours et conservée à l'air libre pendant 28 jours. Au 29 ème jour, on a procédé à deux concassages mécaniques, le premier est fait à l'aide d'un marteau piqueur et le deuxième dans une carrière pour obtenir les mêmes classes que celles des granulats naturels (GN). La figure 3.2 présente les différentes étapes de préparation des granulats recyclés (GR). Les caractéristiques

physiques et mécaniques des granulats recyclés sont présentées dans le tableau 3.5. La distribution granulométrique des granulats recyclés est présentée aussi dans la figure 3.1.

Tableau 3. 5 : Propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés.

Caractéristiques	**Granulats recyclés**		
	0/5	**3/8**	**8/15**
ρ_{app} (kg/m³)	1361	1253	1255
ρ_{abs} (kg/m³)	2278	2348	2365
Module de finesse (Mf)	2.83	-	-
Coefficient d'absorption (%)	8.50	4.28	3.28

3.2.5 Fibres d'acier recyclées traitées

Dans cette recherche, des fibres d'acier recyclées (FAR) récupérées à partir de pneus usés d'une unité de recyclage située à Khemis Miliana, wilaya d'Ain El-Defla, ont été utilisées pour renforcer les mélanges de BAP.

Ces fibres sont nettoyées et séparées de particules et résidus de caoutchouc, par tamisage, c'est-à-dire traitées pour obtenir des fibres d'acier recyclées traitées (FART). Les FART ont des longueurs et des diamètres différents, en raison du processus de recyclage par déchiquetage. On a donc mesuré la longueur et le diamètre de 2000 fibres recyclées traitées avec un pied à coulisse digital afin d'établir une caractérisation géométrique des fibres qui est illustrée dans la figure 3.3 (a et b) qui montre la variation des diamètres et des longueurs des FART. On peut observer que la majorité des FART ont un diamètre variant entre 0.2 mm et 0.25 mm (27%) et 0.25 mm et 0.3 mm (24%) avec une moyenne de 0.25 mm et une longueur variant entre 25 mm et 30 mm (21.5%) et 30 mm et 35 mm (20%), avec une moyenne de 28 mm. D'autre part, la densité des fibres mesurée dans l'eau est égale à 3.6 g /cm^3, la résistance à la traction moyenne est d'environ 2000 MPa et le module d'élasticité moyen est d'environ 190 GPa.

1. Coffrage de la dalle (8×4×0.25 m).

2. Coulage de la dalle en béton.

3. conserver à l'air pendant 28j.

4. Concassage mécanique 1.

5. Concassage mécanique 2 (carrière).

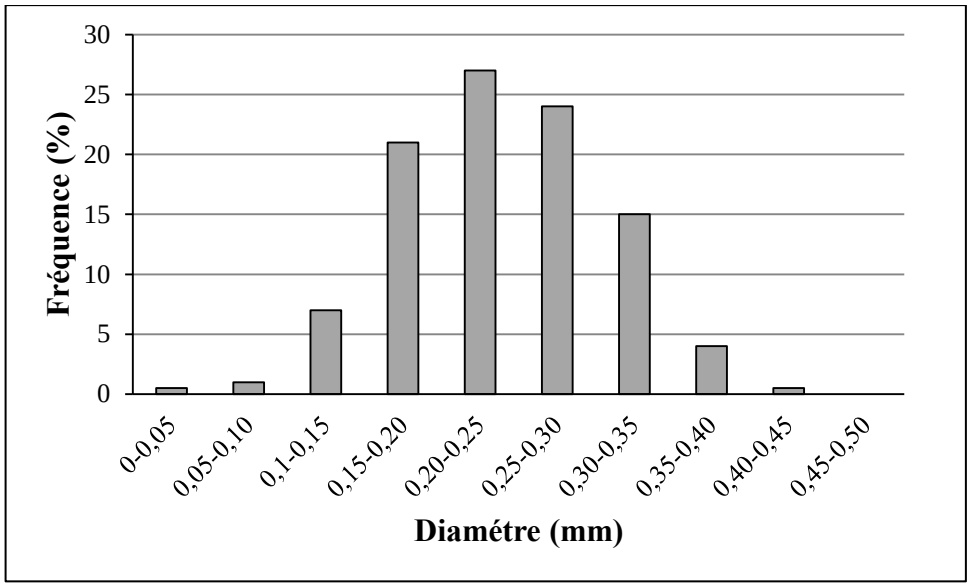
6. Tamisage

0/4

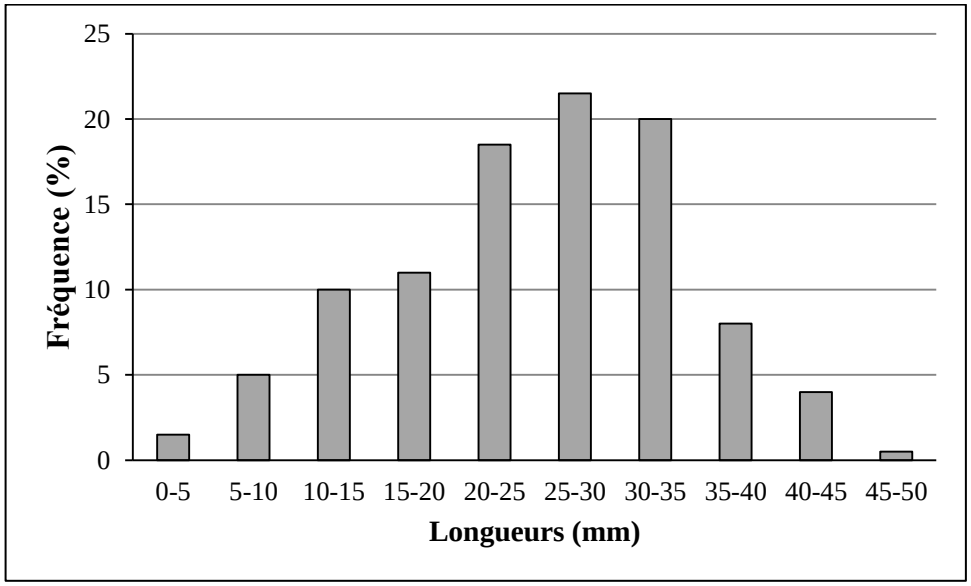
3/8

8/15

Figure 3. 2 : Préparation des granulats recyclés.



(a)



(b)

Figure 3. 3 : Caractérisation géométrique des FART : (a) variation des diamètres et (b) variation des longueurs.

3.2.6 Adjuvant

MEDAFLOW-30 est le type de superplastifiant choisi dans notre travail. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération à base de polycarboxylates, il est commercialisé, par la société Granitex, sous forme de liquide et est conforme à la norme NF EN 934-2 [158]. Le tableau 3.6 présente les propriétés de MEDAFLOW-30.

Tableau 3. 6 : Propriétés de MEDAFLOW-30.

Aspect	Liquide
Couleur	Marron clair
Extrait sec	28 à 31%
Densité	1.07 ± 0.01
PH	6 à 6.5
Teneur en chlorure	≤ 1g/l
Plage de dosage	de 0.5 à 2.0% de la masse de poudre.

3.3 Formulations

La méthode de formulation Japonaise d'Okamora [159, 160] est la méthode choisie dans notre étude. Elle est essentiellement basée sur l'optimisation de dosage de superplastifiant des mortiers et caractérisée par sa forte quantité de liant conduisant, ainsi, à des volumes de pâtes importants. Donc, le paramètre le plus important dans cette méthode de formulation est le rapport Eau/Liant, nous avons fixé ce rapport à 0.40. Tout d'abord, des essais sur le mortier frais ont été réalisés, dans le but d'optimiser le pourcentage de superplastifiant et obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable, puis, nous sommes passés directement à la confection du BAP.

3.3.1 Formulation du mortier autoplaçant

Le but principal de la formulation du mortier autoplaçant (MAP) est l'optimisation du dosage optimal en superplastifiant. La formulation des MAP est déterminée à partir du programme Excel d'aide à la formulation Annexe A [161], qui nous permet de calculer et de déterminer les quantités d'ingrédients pour un volume donné. On garde le rapport E/L constant dans tous les mélanges et on varie seulement le dosage en superplastifiant. Le choix du dosage optimal en superplastifiant se fait, selon des essais expérimentaux, sur un MAP frais, pour obtenir un mortier ayant un étalement entre 270 mm et 330 mm et un temps d'écoulement en entonnoir en V entre 2 sec et 6 sec [162].

3.3.2 Essais réalisés sur MAP

3.3.2.1. Essai d'étalement au mini-cône

La figure 3.4 montre l'essai d'étalement du MAP au mini-cône, qui consiste à placer un moule tronconique, (h=40 mm, d=70 mm en haut et 80 mm en bas), rempli de mortier au centre d'une surface horizontale lisse [162], après, on soulève le cône laissant la pâte s'écouler sur la table et on mesure le diamètre d'étalement du mortier (D_{moyen}) qui est la moyenne entre le diamètre de deux directions perpendiculaires. Le D_{moyen} est calculé comme suit :

$$D_{moyen} = \frac{D1+D2}{2} \qquad 3.1$$

Figure 3. 4 : Essai d'étalement au mini-cône pour mortier.

3.3.2.2. Essai à l'entonnoir en V

Le but de l'essai à l'entonnoir en V est d'évaluer la vitesse d'écoulement du MAP. Le principe consiste à mesurer le temps d'écoulement du mortier entre le moment de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir rempli de mortier (1.1 litre) et le moment de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (figure 3.5).

Figure 3. 5 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier.

3.3.3 Formulation du béton autoplaçant (BAP)

La méthode de formulation générale (méthode Japonaise) est la méthode utilisée pour la confection des mélanges de béton autoplaçant (BAP). Le programme Excel Annexe B [161], qui est basé sur les données de caractérisation des matériaux utilisés et sur un rapport E/L, pour déterminé les proportions de chacun des composants du BAP. Afin de vérifier le dosage en superplastifiant, plusieurs essais d'ouvrabilité ont été réalisés sur le béton frais.

Tout d'abord, on a confectionné un béton autoplaçant à base de 100% de granulats naturels comme béton de référence, puis trois séries du BAP ont été étudiées. La présente étude a pour objectif de valoriser le maximum de béton recyclé de déchets de construction et de démolition dans les formulations des BAP. On a, donc, étudié l'influence des granulats de béton recyclés (GR) sur le comportement du BAP (BAPR), dans la première série; on a fixé le taux de remplacement du sable par de fins granulats recyclés (FGR) à 25%, et le pourcentage de substitution de graviers naturels à 50% et 100% par de gros granulats recyclés (GGR). Dans la deuxième série, les BAPR sont renforcés par de 0.3%, 0.5% et 0.8% de fibres d'acier récupérées de déchets de pneus (FART) et substitués de 15% de ciment par du laitier (L). Les mélanges de la troisième série sont les mêmes mélanges que la deuxième série, mais avec 25% de laitier. En totalité, quinze mélanges ont été confectionnés afin d'étudier l'effet des granulats recyclés et évaluer l'influence de

FART et du laitier sur les performances du béton à l'état frais. Pour cela, une fois le béton prêt, un programme expérimental a été mené pour évaluer les propriétés fraîches, tels que l'essai d'étalement au cône d'Abrams, l'essai à l'entonnoir en V et l'essai de stabilité au tamis.

3.3.4 Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état frais

3.3.4.1. Essai d'étalement

La méthode de l'essai d'étalement pour déterminer la fluidité et la mobilité du BAP en milieu non confiné a été réalisée selon le mode opératoire de la norme EN 12350 – 8 [163]. Par ailleurs, cet essai est une indication de la déformabilité et de la ségrégation du béton. Les mélanges de BAP ne doivent présenter aucun signe de ségrégation ou de ressuage (excès d'eau) au milieu de la galette.

Le principe de l'essai consiste à mesurer les deux diamètres orthogonaux de la galette de béton frais afin de classer le mélange de BAP selon les classes d'étalement de l'AFGC [164] indiquées dans le tableau 3.7. Au cours de cet essai, il est possible de mesurer le temps nécessaire pour que le béton s'étale jusqu'à un diamètre de 50 cm (le temps T50) qui permet d'évaluer la capacité de remplissage.

Figure 3. 6 : Essai d'étalement.

Tableau 3. 7 : Classes d'étalement des BAP selon l'AFGC [164].

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

L'écoulement à travers un entonnoir en V permet d'évaluer la viscosité et la capacité de remplissage du béton autoplaçant en milieu confiné. Après une minute de remplissage de l'entonnoir avec du béton, on mesure le temps d'écoulement en observant l'écoulement d'un volume de béton à travers une ouverture. Le temps d'écoulement est le temps entre l'instant où la trappe est ouverte et l'apparition de la première lumière par l'orifice en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Les valeurs de temps d'écoulement devraient être conformes aux intervalles de NF EN 12350 – 9 [165].

Figure 3. 7 : Essai d'entonnoir en V.

3.3.4.3. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

La stabilité au tamis s'exprime par le pourcentage de laitance qui permet d'évaluer la résistance à la ségrégation du BAP lequel doit être stable sous l'effet de la gravité et ne présente pas de signes de ressuage. Le mode opératoire pour déterminer la quantité de laitance selon la norme EN 12350 – 11 [166] est le suivant : à la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau, on laisse reposer le béton pendant 15 minutes, puis, un échantillon de 4.8 kg ± 0.2 kg est prélevé et versé au centre d'un tamis de 5 mm, à une hauteur de chute de 50 ± 5 cm; 15 minutes plus tard, le fond est pesé. La laitance est le pourcentage en masse de la quantité passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial.

3.3.5 Essais réalisés sur le béton autoplaçant à l'état durci

Après la préparation des mélanges et la réalisation des différents essais sur les bétons frais, tous les mélanges frais ont été coulés dans des moules protégés par des films polyanes à une température de 20±2 °C et à une humidité relative de 75%; 24 heures plus tard, ils ont été démoulés puis conservés dans des réservoirs d'eau à 20±2 °C jusqu'à l'âge d'essai. Les essais à l'état durci ont été réalisés sur des échantillons avec différentes dimensions et à différents âges de durcissement.

3.3.5.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est un essai important de caractérisation du béton, elle définit la capacité d'un matériau à résister à la force appliquée verticalement. La résistance à la compression axiale [167] a été mesurée sur des cubes (100x100x100 mm^3) de différents mélanges de béton autoplaçant, à l'âge de 28 et 90 jours, à l'aide d'une presse hydraulique à une vitesse de chargement continue de 0.5 kN/s jusqu'à la rupture. La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes d'un même mélange.

3.3.5.2. Résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion en trois points des bétons autoplaçants a été déterminée sur des échantillons prismatiques standards (70x70x280) mm^3, à l'âge de 28 et 90 jours, conformément à NF EN 12390 – 5 [168]. La résistance à la flexion est la moyenne de la résistance des trois éprouvettes.

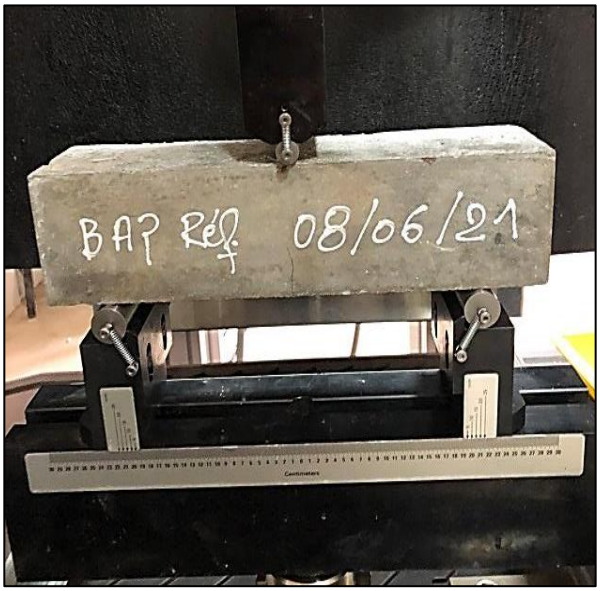


Figure 3. 8 : Dispositif de l’essai de flexion à trois points.

3.3.5.3. Module d’élasticité

Le module d’élasticité statique a été testé à 28 et 90 jours, à l’aide de cylindres standards de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, selon la norme BN EN 12390 – 13 [169]. Le module d'élasticité est défini comme étant, dans le domaine élastique, le rapport entre les variations de contrainte et les variations de déformation des éprouvettes de béton. Les échantillons du module d'élasticité statique ont été chargés trois fois jusqu'à 30% de la charge ultime mesurée lors de l'essai de résistance à la compression. Trois échantillons ont été utilisés pour chacun des mélanges mentionnés.

3.3.5.4. Vitesse de pulsation ultrasonique

Ce test a été réalisé pour déterminer l'homogénéité du béton autoplaçant. Pour cet essai, des échantillon cubiques de 100 mm ont été préparés et durcis pendant 28 et 90 jours. Le résultat moyen de trois échantillons a été enregistré pour chacun des mélanges conformément à la norme EN 12504 – 4 [170]. La vitesse des pulsations ultrasoniques (VPU) a été évaluée à l’aide d’un dispositif capable de mesurer la vitesse à 0.1 microseconde.

3.3.5.5. Retrait total

Le retrait total des bétons autoplaçants a été évalué sur des échantillons prismatiques standards durant une période de six mois. La procédure est basée sur la norme ASTM C 878 – 17 [171]. Pour le retrait total, les échantillons ont été démoulés au bout de 24 heures

et stockés à l'air libre, au laboratoire, à une température de 20±2 °C et une humidité de 70±5%. L'essai consiste à mesurer la variation de la longueur entre les deux faces verticales de l'éprouvette équipées de plots.

3.3.5.6. Porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité permet de mesurer le volume des pores perméables dans le béton et s'exprime en pourcentage (%). À l'âge de 90 jours, la porosité accessible à l'eau (ε) est calculée selon le mode opératoire de la norme NF P18 – 459 [172], sur des disques de béton de 100 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur de la partie médiane des éprouvettes de 100 x 200 mm^2 sciées en trois. Les échantillons sont pesés (M_{sec}), puis séchés dans une étuve à une température de 50±2 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (ΔM<0.1%, la différence entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle) et placés sous une pression constante dans un dessiccateur sous vide pendant trois heures. Ensuite, les disques sont saturés dans l'eau dégazée pour 18±2 heures. On retire ces derniers du récipient et, à l'aide d'une balance hydrostatique, des pesées successives de la masse dans l'eau (M_{eau}) et de la masse dans l'air (M_{air}) sont effectuées. La moyenne de trois échantillons a été retenue pour chaque type de mélange. La porosité accessible à l'eau est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{\mathrm{Mair-Msec}}{\mathrm{Mair-Msec}} \times 100 \qquad 3.2$$

Ou :

M_{eau} : la masse d'échantillon immergé dans l'eau,

M_{air} : la masse d'échantillon pesé dans l'air,

M_{sec} : la masse d'échantillon sec.

3.3.5.7. Absorption capillaire

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de suivre la cinétique d'imbibition capillaire à travers la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carré du temps, lorsqu'une surface d'échantillon est en contact direct avec l'eau. L'essai a été réalisé à l'âge de 90 jours, suivant la procédure de la norme ASTM C1585 – 11 [173], sur trois échantillons cubiques de 100 mm de côté de chaque mélange. Les échantillons sont séchés à une température de 50±2 °C jusqu'à une masse constante, afin de déterminer la masse sèche. Puis, leurs faces latérales sont recouvertes de résine et ils sont placés dans

un bac d'eau pour que la face inferieure soit au contact de l'eau jusqu'à une hauteur de 5 mm. Plusieurs pesées des éprouvettes sont alors effectuées pendant l'immersion, à des instants définis par la norme. Enfin, le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{Mt}{a \times d} \quad [mm] \qquad 3.3$$

Où :

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm),

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

a : section de l'éprouvette (mm^2),

d : densité de l'eau (g/mm^3).

3.3.5.8. Perméabilité à l'eau

Le test de la perméabilité à l'eau a été réalisé conformément à la norme NF EN 12390 – 8 [174]; son objectif était d'évaluer la profondeur de pénétration de l'eau sous pression dans des éprouvettes cubiques de dimensions 150 x 150 x 150 mm^3, à l'âge de 90 jours. Les éprouvettes ont été soumises, à la base, à une pression constante et continue de 5 bars pendant 72 heures puis divisées en deux parties grâce à l'essai de traction par fendage. Par la suite, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée avec un pied à coulisse. Pour chaque mélange de béton, trois éprouvettes ont été testées.

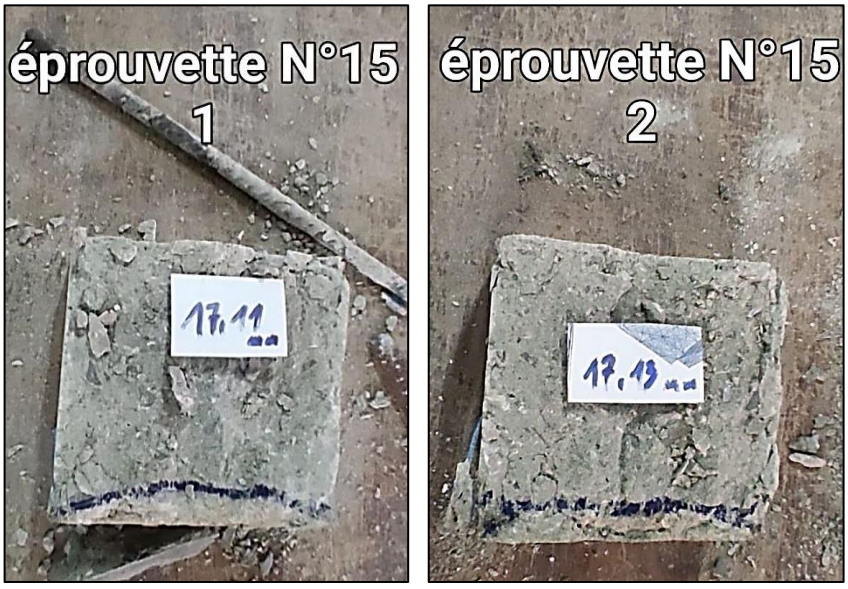


Figure 3. 9 : Mesure de la profondeur de pénétration de l'eau.

3.3.5.9. Pénétration des ions de chlorure

L'essai de la résistance à la pénétration des ions de chlorure consiste à appliquer une charge électrique pendant six heures sur un échantillon de béton saturé d'eau, de 100 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur, protégé par une résine et placé dans une cellule contenant de fluide des deux côtés. Une tension continue est appliquée sur la cellule, la borne négative étant connectée au réservoir contenant une solution de chlorures de sodium (NaCl), l'autre positive à la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), ce qui provoque la migration des ions de chlorure chargés négativement vers la borne positive. La résistance à la pénétration rapide des ions, à 90 jours, est évaluée, six heures plus tard, à partir de la charge totale passante en Coulomb, selon la norme ASTM C1202 – 12 [175].

3.3.5.10. Microstructure

Différentes parties des échantillons ont été sélectionnées dans le but de réaliser l'essai de balayage microscopique (MEB). La microstructure des échantillons a été étudiée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Quanta 650) à émission de champs.

Figure 3. 10 : Dispositif du MEB.

3.4 Récapitulatif des essais réalisés

Dans la présente étude, nous avons proposé d'utiliser des granulats recyclés récupérés à partir de déchets de béton comme substituts aux granulats naturels, d'additionner des fibres

recyclées collectées à partir de pneus usés et de remplacer une certaine quantité de ciment par du laitier dans les compositions des BAP. A cet effet, on a conçu quinze mélanges.

La partie expérimentale est divisée en quatre. Dans la première partie, des essais sur mortier ont été réalisés afin d'optimiser le dosage en superplastifiant du BAP de référence; ensuite, des essais rhéologiques qui répondent aux spécifications requises ont étés menés sur le BAP de référence. Dans la deuxième partie, on a analysé l'influence du remplacement de granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR) sur les caractéristiques du BAP à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Les pourcentages de GR sont 25% de fins granulats recyclés (FGN), 50% et 100% de gros granulats recyclés (GGR). La troisième partie a porté sur l'étude de l'effet de l'ajout de 0.3%, 0.5% et 0.8%, en volume, de fibres d'acier recyclées traitées (FART) et de la substitution de 15% du ciment par le laitier (L) sur les propriétés du BAP à base de GR (BAPR). En dernier, dans la quatrième partie, nous avons réalisé le même programme expérimental que la troisième, en utilisant les mêmes pourcentages de GR et FART, mais en augmentant le taux de laitier à 25%, afin d'améliorer l'utilisation du laitier dans les BAP.

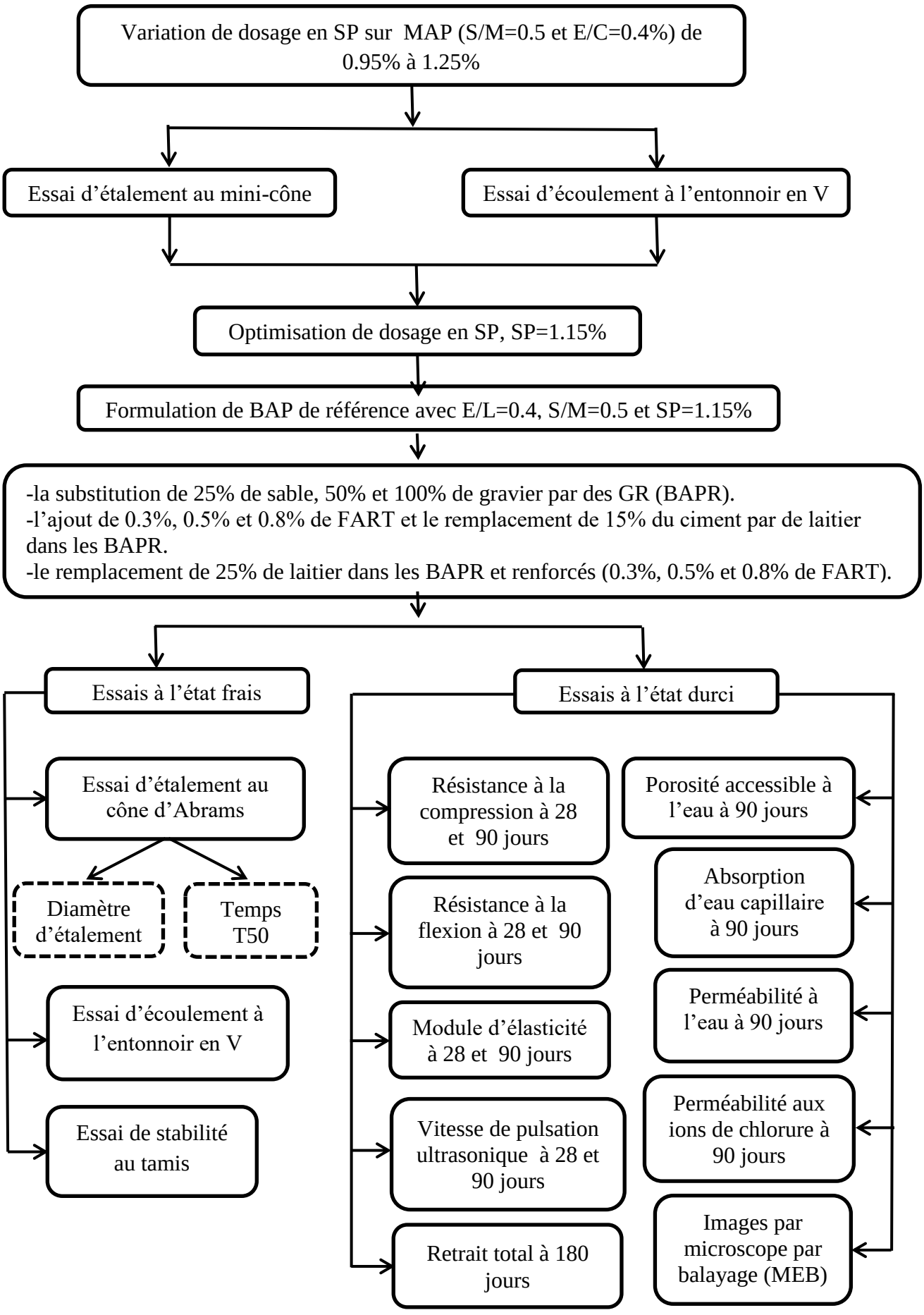


Figure 3. 11 : Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état frais et à l'état durci.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats rhéologiques réalisés sur le mortier autoplaçant (MAP) afin d'optimiser le dosage en superplastifiant dans la composition du béton autoplaçant (BAP) de référence. Tout d'abord, nous avons étudié l'effet de granulats recyclés sur les performances du BAP. Ensuite, nous somme intéressons à étudier l'effet des fibres d'acier recyclées traitées récupérées à partir des déchets des pneus et l'effet de laitier sur la rhéologie, les caractéristiques mécaniques, physiques et les propriétés relatives à la durabilité du BAP à base de GR, tels que la porosité, l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité à l'eau sous pression et la perméabilité aux ions chlorures.

4.2 Optimisation de dosage de superplastifiant

L'utilisation de superplastifiant (SP) permet de minimiser la quantité de l'eau et assurer une bonne ouvrabilité des mélanges de BAP à l'état frais et, aussi, des meilleures performances mécaniques à l'état durci.

Cette partie expérimentale visant à fixer le dosage optimal de SP pour donner un maximum d'ouvrabilité au mortier sans ségrégation et ressuage, d'un côté et d'autre côté, et permet de réduire la quantité d'eau dans le mélange. Nous avons optimisé le dosage en SP à partir de deux essais rhéologiques, essai de mini-cône et essai d'entonnoir en V. Nous avons fixé le rapport E/C à 0.4 et le rapport S/M à 0.5.

4.2.1 Essais d'étalement au mini-cône et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V

La figure 4.1 présente l'effet de dosage du SP sur le diamètre d'étalement au mini-cône et sur le temps d'écoulement à l'entonnoir en V. Elle illustre aussi les différentes mesures d'étalement et de temps d'écoulement du MAP obtenues pour chaque dosage en SP. Le choix de pourcentage optimal de Sp/L s'adapter par un diamètre d'étalement entre 270 mm $\leq$ d $\leq$ 330 mm et un temps d'écoulement entre 2 sec $\leq$ t $\leq$ 10 sec [162].

Le diamètre d'étalement des mortiers autoplaçants varie entre 219.5 mm et 317 mm. Les résultats de la variation du diamètre montrent que le mortier devient fluide avec l'augmentation du dosage en SP et vérifient les exigences normatives.

On remarque aussi que l'accroissement de dosage du SP conduit à une diminution du temps d'écoulement à entonnoir en V des MAP. Le temps d'écoulement diminue de 15.58 à 6.17 secondes lors de l'augmentation de SP de 0.95% à 1.25%.

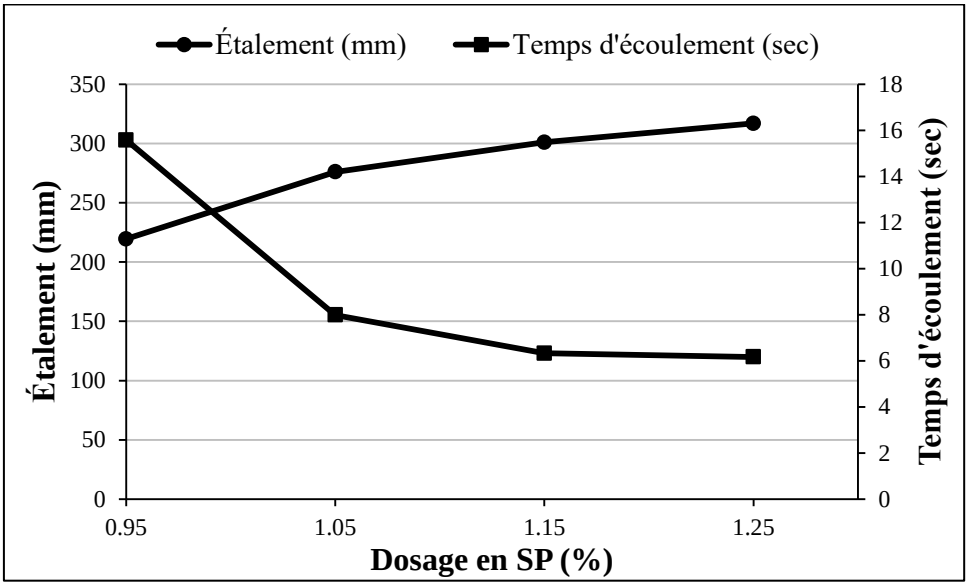


Figure 4. 1 : Variation de l'étalement et de temps d'écoulement en fonction de dosage en SP.

A partir des résultats obtenus par les essais réalisés sur le MAP, le dosage de SP de 1.15% de poids de ciment a été fixé pour les formulations des BAP dans cette étude, afin d'éviter les effets négative de l'excès de dosage en superplastifiant (ressuage et ségrégation) sur les propriétés mécaniques du BAP à l'état durci.

4.3 Effet des fibres d'acier recyclées traitées et du laitier sur les propriétés des BAP à base de granulats recyclés à l'état frais

Afin d'étudier les effets des trois paramètres sur les propriétés des BAP, on a conçu quinze mélanges de BAP, dont leur compositions sont présentées au tableau 4.1: un mélange de contrôle (BAP-T), deux mélanges à base de granulats recyclés (GR) seuls, et les autres à base de GR, de fibres d'acier recyclées traitées (FART) et de laitier (L). On a remplacé les gros granulats naturels (GGN) par 25% de fins granulats recyclés (FGR), 50% et 100% de gros granulats recyclés (GGR), nommés BAPR1 et BAPR2, respectivement, puis on a ajouté séparément trois fractions volumiques de FART (0.3%, 0.5% et 0.8%), et on a substitué 15% de ciment par du laitier; ensuite, on a augmenté le taux du laitier dans

les BAPR fibrés à 25%. Le rapport E/C de 0.4 et la teneur en superplastifiant de 1.15% (en poids de ciment) aient constants dans tous les mélanges des BAP.

Tableau 4. 1 : Compositions des mélanges de BAP.

Mélanges	**Compositions (kg/m³)**								
	Ciment	**Laitier**	**Granulats naturels**			**Granulats recyclés**			**Fibres**
			0/5	**3/8**	**8/15**	**0/5**	**3/8**	**8/15**	
BAP-T	483	0	932	250	500	0	0	0	0
BAPR1	483	0	699	125	250	201	112	227	0
0.3BAPR1L15	410.5	72.5	699	125	250	201	112	227	10.8
0.5BAPR1L15	410.5	72.5	699	125	250	201	112	227	18
0.8BAPR1L15	410.5	72.5	699	125	250	201	112	227	28.8
0.3BAPR1L25	362.25	120.75	699	125	250	201	112	227	10.8
0.5BAPR1L25	362.25	120.75	699	125	250	201	112	227	18
0.8BAPR1L25	362.25	120.75	699	125	250	201	112	227	28.8
BAPR2	483	0	699	0	0	201	234	454	0
0.3BAPR2L15	410.5	72.5	699	0	0	201	234	454	10.8
0.5BAPR2L15	410.5	72.5	699	0	0	201	234	454	18
0.8BAPR2L15	410.5	72.5	699	0	0	201	234	454	28.8
0.3BAPR2L25	362.25	120.75	699	0	0	201	234	454	10.8
0.5BAPR2L25	362.25	120.75	699	0	0	201	234	454	18
0.8BAPR2L25	362.25	120.75	699	0	0	201	234	454	28.8

Des essais de caractérisation du BAP à l'état frais tels que les essais de l'ouvrabilité et de la résistance à la ségrégation ont été réalisés pour les différents mélanges de BAP à base de granulats recyclés, fibres d'acier recyclées traitées et laitier de haut fourneau.

4.3.1 Etalement

L'essai d'étalement a été réalisé en milieu sans obstacles afin d'évaluer la fluidité et le potentiel du mélange à se déformer sous son propre poids. La figure 4.2 présente les résultats de la variation d'étalement du BAP. Chaque ingrédient additionné à la composition du BAP affecte le diamètre d'étalement. Les diamètres d'étalement varient de 760 mm à 680 mm, par ailleurs, tous les mélanges ont une classe d'étalement SF2 sauf le BAP de référence dont la classe est SF3. Aussi, tous les mélanges vérifient les recommandations exigées par EFNARC [124]. Tous les mélanges de BAP avaient une bonne déformabilité et aucune ségrégation visuelle n'a été observée.

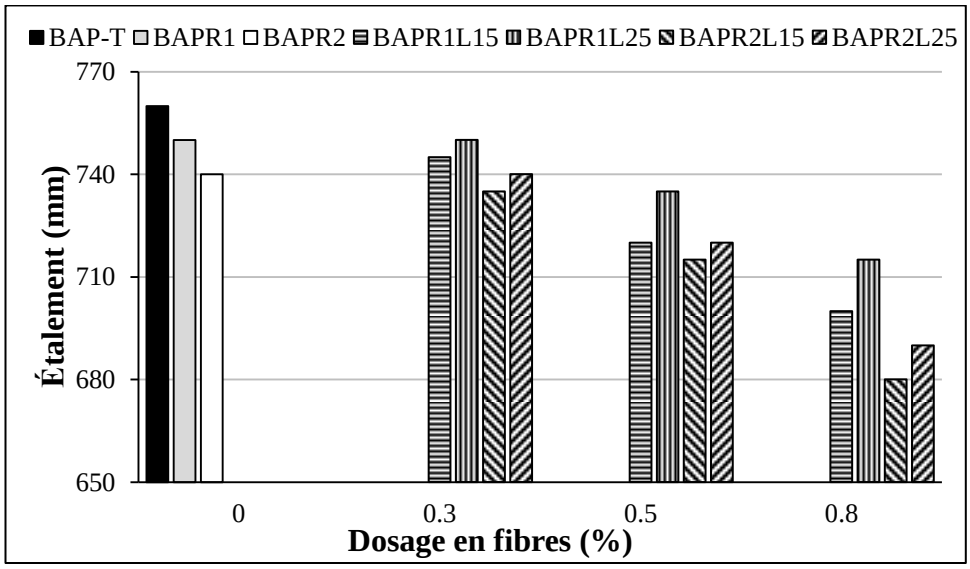


Figure 4. 2 : Étalement des BAP.

L'examen des résultats de la figure 4.2 montre que les diamètres d'étalement diminuent légèrement par rapport à celui du béton de référence si l'on utilise des GR au lieu des GN dans les mélanges. Le diamètre d'étalement du béton témoin (BAP-T) est égal à 760 mm et l'utilisation des GGR diminue le diamètre jusqu'à 750 mm et 740 mm pour les mélanges à base de 50% (BAPR1) et 100% (BAPR2), respectivement. Le remplacement des GN par des GR entraîne une diminution d'étalement, suite à la texture rugueuse et à la

morphologie angulaire des GR, due à la présence d'ancien mortier adhéré aux GR, qui augmentent le frottement entre les granulats et empêchent le mouvement du mélange. Par ailleurs, la teneur des fines provenant de l'ancienne pâte augmente avec l'augmentation des pourcentages de remplacement de GN, car les GR sont fracturés durant le malaxage, ce qui a conduit à une absorption d'eau plus élevée, en réduisant l'ouvrabilité [176]. Martínez-García et al. [177] ont confirmé qu'une augmentation du pourcentage de remplacement des GGN par des GGR entraîne une diminution du diamètre d'étalement.

Suaiam & Makul [178] ont trouvé que le remplacement total de GGN par des GGR a légèrement diminué le diamètre d'étalement de 5%, par rapport au BAP de contrôle. La faible diminution de la fluidité est attribuée à l'augmentation du volume des granulats et à la réduction de la teneur en eau libre. Le remplacement des GN par des GR augmente le volume des granulats dans le béton, en raison de leur faible densité comparée à celle des GN, entraînant ainsi une absorption d'eau durant le malaxage, grâce à leur porosité et à leur absorption d'eau élevée.

En outre, on peut observer dans la figure 4.2 que l'incorporation et l'augmentation du pourcentage des FART dans les BAPR diminue également le diamètre d'étalement, ce qui est un effet normal des fibres d'acier dans les BAP frais. Les mélanges des BAPR fibrés présentent des valeurs de diamètres comprises entre 680 mm et 750 mm. Par exemple, l'utilisation de 0.8% de fibres dans le BAPR2 diminue l'étalement de 10.52% par rapport au BAP-T. Le mortier du ciment recouvre la surface périphérique des fibres et comme les fibres d'acier ont une grande surface, elles nécessitent plus de pâte; cela provoque une friction entre elles et les agrégats car il n'y a pas assez de phase fluide pour les lubrifier, ce qui a conduit à l'empêchement de l'étalement du BAP frais [130]. De plus, la géométrie non uniforme des fibres peut augmenter non seulement le réseau de contact entre les fibres et la matrice mais aussi le seuil du cisaillement, ce qui entraîne une réduction de l'ouvrabilité du béton [179].

Chen et al. [180] ont démontré que lorsqu'une teneur de 0.75% en fibres de pneus usés est incorporée dans un béton à base de GN, l'étalement du béton est inférieur de 21.9% à celui du béton témoin. Cela est attribué à la grande surface des fibres d'acier par rapport aux agrégats, dans le même volume de béton, ce qui augmente les forces de cohésion entre les fibres et la matrice. En outre, la structure granulaire peut être modifiée par les fibres, qui séparent également les particules. Par ailleurs, les fibres d'acier peuvent être réparties

de manière irrégulière dans les mélanges, ce qui diminue l'étalement et l'écoulement du béton.

Cependant, une étude de Mohammed et al. [181] a pour but d'étudier l'effet des fibres d'acier (0%, 0.5% et 1%) et de granulats recyclés (0%, 25%, 50%, 75% et 100%) sur les propriétés du BAP à l'état frais. Les chercheurs ont observé une diminution des valeurs du diamètre d'étalement lorsque les GN ont été remplacés par des GR. La raison est attribuée à l'augmentation de la porosité du mélange et, par conséquent, à l'augmentation de l'absorption d'eau, qui affecte négativement l'ouvrabilité du mélange. De même, l'ajout de fibres d'acier au mélange de béton a eu un effet négatif sur l'étalement et cela est probablement dû à la contribution des fibres d'acier à l'hétérogénéité du mélange et, par conséquent, à la diminution de la liaison entre les composants du mélange de béton.

En revanche, et comme il est montré dans la même figure (4.2), l'augmentation du laitier de 15% à 25% améliore l'ouvrabilité et augmente légèrement la fluidité ainsi que le diamètre d'étalement, mais aucune ségrégation n'a été observée. Les diamètres des mélanges de BAPR renforcés par 0.3% à 0.8% augmentent de 0.67% à 4.22% et de 0.68% à 3.05% avec 50% et 100% de GGR, respectivement. Cela peut être dû à la faible densité du laitier par rapport au ciment, en effet, il augmente le volume de la pâte et réduit la friction à l'interface granulat-pâte, ce qui influe favorablement sur les caractéristiques d'ouvrabilité [42]. Cela peut être attribué également aux caractéristiques de surface des particules de laitier qui sont lisses et denses, permettant une absorption minimale d'eau pendant le processus de malaxage et durant la phase initiale d'hydratation. De plus, le laitier est utilisé à une finesse élevée que celle du ciment, ce qui permet à ses particules de remplir les vides inter-granulaires et les espaces formés par les particules de ciment plus grosses, réduisant ainsi les forces de frottement dans le mélange et, par conséquent, améliore l'ouvrabilité [182].

L'effet positif du laitier sur l'ouvrabilité des BAP est rapporté dans une étude antérieure [183], l'augmentation du pourcentage de laitier de 0% à 30%, avec un incrément de 10%, améliore l'ouvrabilité des BAP, en raison de comportement lubrifiant des particules de laitier. À ce stade d'hydratation, une partie de l'eau de gâchage est libérée par l'activité inerte du laitier, ce qui améliore la lubrification des grains et leur mobilité. Les résultats d'une étude similaire [79] ont montré que l'augmentation de la teneur de laitier de 0%, 5%, 12.5% et 20% augmente le diamètre d'étalement de 570 mm, 540 mm, 680 mm et 690 mm.

Aussi, Goyal et al. [184] ont trouvé que l'augmentation du pourcentage de laitier de 5%, 12.5% et 20%, l'étalement des BAP augmente de 640 mm, 680 mm et 690 mm, respectivement. Les auteurs ont justifié cette augmentation par la distribution des particules de laitier et leur forme sphérique; ils ont affirmé aussi que les grains de laitier augmentent le volume de pâte entre la pâte de ciment et le granulat dans le béton en réduisant la friction dans la zone de transition interfaciale, maximisant ainsi l'ouvrabilité et permettant au diamètre d'étalement d'atteindre des valeurs élevées sans ségrégation.

Skaf et al. [185] ont montré que l'utilisation de 45% de laitier dans les mélanges de BAP à base de granulats recyclés augmente le diamètre d'étalement d'environ 30 mm à 60 mm. Selon Kathirvel et al. [186], l'étalement des mélanges de BAP à base de GN et 20% du laitier a été mesuré et évalué à 751 mm. Cette valeur a été réduite avec l'augmentation du volume de remplacement par des GGR de 20% à 60%, où les valeurs du diamètre d'étalement se situaient entre 684 et 740 mm. Mais, ce dernier a réduit de 669 mm à 719 mm avec l'ajout de 1% de fibres d'acier industrielles.

4.3.2 Temps d'étalement T50

Le temps d'étalement est une deuxième indication de la fluidité, il permet aussi d'évaluer la viscosité, il mesure le temps écoulé, en secondes, entre l'instant où le cône est soulevé et l'instant où l'étalement horizontal atteint un diamètre de 50 cm. Les résultats présentés dans la figure 4.3 montrent que le remplacement de granulats, l'ajout de fibres et la substitution du ciment ont légèrement modifié le temps d'étalement (T50). Les BAP avec des GR nécessitent un temps plus important que le BAP témoin pour atteindre un diamètre de 50 cm. Cependant, lorsque le taux de remplacement des GGN par des GGR augmente de 50% à 100%, le temps T50 du BAP témoin (1 s) augmente jusqu'à 1.6 s et 2 s pour les deux mélanges BAPR1 et BAPR2. Cela est dû aux caractéristiques de surface des GR telles que l'angularité et la rugosité, par rapport aux GN, qui augmentent le frottement des granulats dans le béton et réduisent sa capacité de se déformer [187], augmentant ainsi le temps d'étalement et la viscosité du mélange.

Ces résultats sont en accord avec la tendance trouvée par Silva et al. [176], ils ont trouvé que l'utilisation de 25% de déchets de briques comme substitut du ciment a diminué le temps T50 du BAP de contrôle de 3.64 s à 3.39 s, car ces derniers présentent une taille de particules supérieure à celle du ciment, ce qui nécessite moins d'eau pour humidifier leurs

surfaces. Tandis que le remplacement de 100% de GGR dans le même mélange a augmenté le temps T50 jusqu'à 4.91 s.

Lashari et al. [188] ont constaté que la qualité des GR est inférieure à celle des GN et que leur coefficient d'absorption d'eau est supérieur à celui des GN. Les chercheurs ont montré que l'utilisation de 100% de GGR a augmenté le temps T50 du BAP témoin de 2.8 s à 4.35 s. En outre, Srikanth et al. [189] ont observé qu'il y a une augmentation du temps d'étalement de 4 s à 6 s pour 50% à 100% de GGR. Selon Saini et Singh [190], le remplacement par 100% de GGR a diminué l'étalement du BAP de 725 mm à 710 mm et a augmenté le temps T50 de 2 s à 3.5 s.

Dans cette recherche, l'ajout et l'augmentation du taux de fibres recyclées traitées dans les mélanges de 50% et 100% de GGR augmentent le temps T50 (figure 4.3). Lors du remplacement de 15% de ciment par du laitier, les BAP avec un faible pourcentage de fibres (0.3%) présentent un temps plus court compris entre 1.67 s et 2.2 s, les BAP avec un grand pourcentage (0.8%) présentent un temps plus long compris entre 1.9 s et 2.45 s, ce qui indique que la viscosité des BAP augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Cela est dû à la grande friction entre les fibres et les autres composants du BAP qui empêche l'écoulement et limite le diamètre d'étalement.

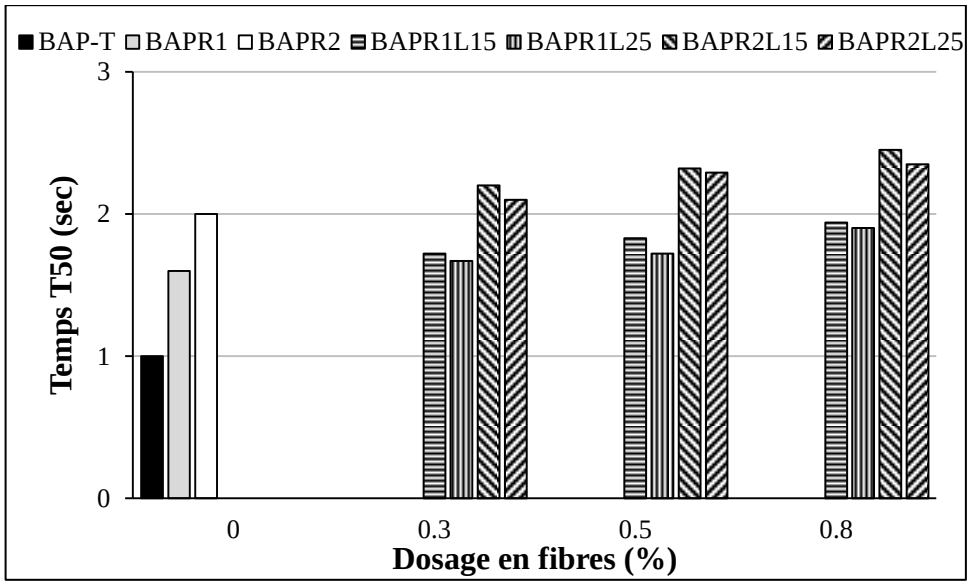


Figure 4. 3 : Temps T50 des BAP.

Selon Rahmani et al. [191], le temps T50 augmente avec l'augmentation du taux de fibres, car l'inclusion de fibres dans les BAP nécessite plus de temps pour que le béton s'étale. Les auteurs ont remarqué que l'ajout de fibres d'acier industrielles de 0.3%, 0.6% et 0.9% dans un BAP de résistance moyenne de 40 MPa augmente le temps d'étalement jusqu'à 2.6 s, 2.7 s et 2.9 s, respectivement. Ce comportement est justifié par la dispersion aléatoire des fibres d'acier dans le béton frais qui conduit à la formation d'un réseau matriciel fibre-ciment dans lequel le mortier de ciment recouvre la surface périphérique de la fibre, ce qui diminue la fluidité du béton frais.

Nos résultats sont aussi en corrélation avec la tendance trouvée par Guler et al. [192], qui ont également remarqué que le T50 augmente avec l'augmentation du taux de fibres d'acier de 0.3% à 1%. De plus, Nalanth et al. [193] ont constaté que la substitution de 50% de GGN par des déchets de briques et l'ajout de 1% de fibres d'acier a donné un temps d'étalement égal à 4.09 s, qui est plus grand que celui du mélange du BAP avec seulement des granulats de brique recyclés (3.05 s).

Bensaci et al. [194] ont remarqué que le diamètre d'étalement a diminué de 760 mm à 520 mm et de 760 mm à 385 mm lorsque le caoutchouc et les fibres d'acier récupérées à partir des pneus usés ont été incorporés à 30% et 1.5%, respectivement. Une diminution maximale de 31.57% et 49.34% du diamètre d'étalement et une augmentation du temps T50 de 70% et 81.3% ont été observées dans les composites contenants 30% et 1% de caoutchouc et de fibres, respectivement. La réduction du diamètre et l'augmentation du temps sont dues à la friction entre le caoutchouc et les fibres avec les autres ingrédients par rapport aux agrégats naturels.

Par ailleurs, Younis et al. [139] ont révélé que l'incorporation de 30 kg/m^3, 60 kg/m^3 et 90 kg/m^3 de fibres d'acier recyclées, de longueur de 35 mm, a augmenté le temps T50 du béton témoin de 2.25 s à 3 s, 4.6 s et 6.3 s, respectivement. Ils ont noté également que l'utilisation de fibres a réduit le diamètre et le débit d'étalement, mais augmente le temps d'étalement et la viscosité. Cette augmentation est attribuée à la résistance à l'étalement qui se développe, à cause de la présence de fibres, augmentant ainsi le frottement interne entre les particules des agrégats et les fibres, et l'augmentation du frottement interne augmente proportionnellement avec la teneur en fibres. Par ailleurs, la rigidité élevée des fibres d'acier pourrait être l'une des sources d'augmentation probable du frottement inter-particulaire sous l'étalement libre avec une absorption possible d'énergie de mouvement.

D’autre part, on peut remarquer dans la figure 4.3 que l’augmentation du pourcentage de laitier augmente la fluidité du BAP et montre un effet positif à savoir une diminution non significative du temps T50, par exemple, le mélange BAPR2 avec 0.8% de FART et 15% de laitier (0.8BAPR2L15) présente un temps T50 égal à 2.45 s; lors de l’augmentation du pourcentage de laitier de 15% à 25% dans le même mélange, le T50 égale 2.35 s, ce qui indique une diminution de 5%. Cette diminution est due à la même raison que le diamètre d’étalement. En effet, l’augmentation du laitier augmente le volume de pâte, en raison de sa faible densité par rapport à celle du ciment, rendant le béton plus fluide, réduisant la friction à l’interface granulat-pâte et diminuant le temps d’étalement.

Des observations similaires ont également été enregistrées par Raia et al. [195], une réduction du temps T50 des BAP renforcés par 0.5% de fibres d’acier ondulées et contenant 30% de laitier par rapport aux mélanges avec 15% du laitier; ils ont interprété cette diminution du temps d’étalement par la faible cohésion entre les constituants du béton autoplaçant due à l’augmentation du pourcentage du laitier.

En outre, Li et al. [196] ont observé la même tendance que celle de notre étude, ils ont étudié les propriétés fraîches du BAP avec un pourcentage fixe de laitier égal à 20% et une variation de la fraction volumique de 0%, 0.5%, 0.75% et 1% de microfibres d’acier. Ils ont conclu que les fibres réduisent l’ouvrabilité de 645 mm à 600 mm et cette réduction a été accompagnée par une augmentation du temps T50 de 4.6 s à 10.5 sec.

D’autre part, Bensaci [2] a mentionné que l’utilisation d’une teneur en laitier de 15% et 25% dans la confection du BAP renforcé par des fibres d’acier hybrides (50% industrielles et 50% recyclées) de 0.5% à 1.5% augmente la fluidité du béton qui se traduit par une légère diminution dans le temps T50. Pour 1.5% de fibres hybrides, les valeurs de temps d’étalement varient de 1.31 s, 0.87 s et 0.83 s pour un taux de remplacement de 0%, 15% et 25%, respectivement, et ils ont observé aussi que le remplacement par 25% de laitier donne la plus faible valeur de T50.

Yahiaoui [197] a confirmé que 25% de laitier a donné la faible valeur de temps T50 (2.4 s) avec un étalement acceptable de 780 mm, et il a conclu également que le taux de substitution par 25% du laitier est considéré comme le dosage optimal qui permet de vérifier la capacité de remplissage à l’état libre en absence d’obstacles.

Boukendakdji et al. [81] ont remarqué que la substitution de 0% à 25% du ciment par le laitier améliore les propriétés à l'état frais du BAP; ils ont constaté une fluidité satisfaisante lors d'une augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 15%, tandis qu'une substitution supérieure à 15% a entrainé une prolongation du temps d'étalement, mais avec des risques de ségrégation et de ressuage.

De plus, Kouider Djalloul et al. [42] ont affirmé que l'incorporation du laitier améliore l'ouvrabilité des BAP. Les auteurs ont observé que l'étalement augmente avec l'augmentation du taux du laitier et les faibles valeurs de temps T50 ont été obtenues par les mélanges contenant 15% de laitier, sans aucune ségrégation ou ressuage. Alors que les mélanges de 30% de laitier pour différents pourcentages de GR (25%, 50%, 75%, et 100%) fournissent un temps T50 supérieur à celui des BAP de 15%, ce qui est interprété par un manque de cohésion des constituants lors de l'augmentation de pourcentage du laitier.

4.3.3 Temps en entonnoir en V

L'essai de l'entonnoir en V est utilisé pour estimer la capacité de remplissage ainsi que la viscosité du BAP et sa capacité à passer à travers de petites ouvertures. D'après la figure 4.4, le temps d'écoulement dans l'entonnoir en V (Tv) de tous les mélanges de BAP est inférieur à 12 secondes, donc, les mélanges sont classés comme VS1/VF1–selon l'EFNARC [124].

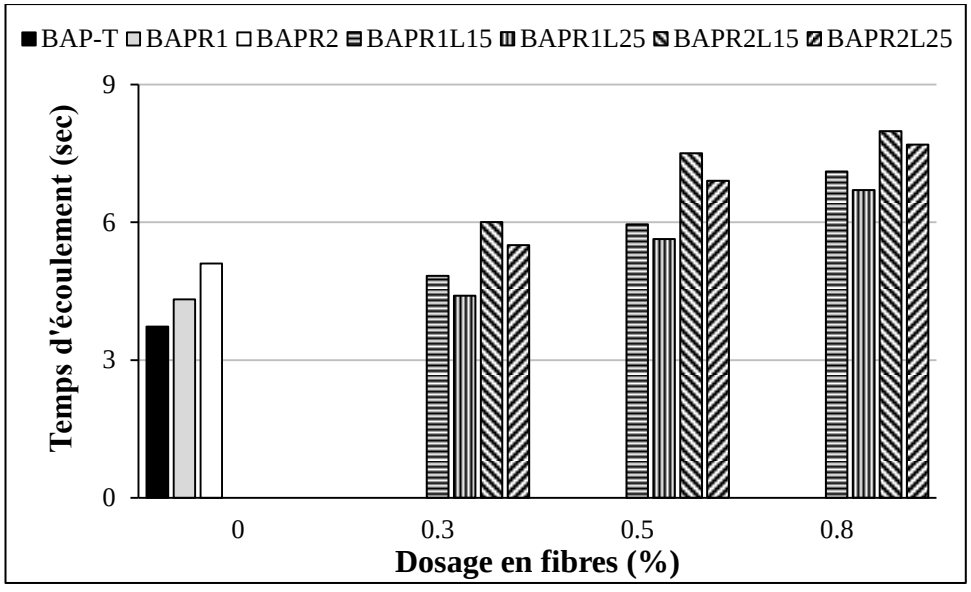


Figure 4. 4 : Temps Tv des BAP.

Le comportement du temps d'écoulement (Tv) des BAP est similaire à celui du temps d'étalement (T50) lors de la variation des trois paramètres. Le temps Tv du BAP de référence (BAP-T) est de 3.73 s, on observe que le remplacement par 50% et 100% de GGR augmente le temps Tv jusqu'à 4.32 s et 5.1 s de BAPR1 et BAPR2 qui est équivalent à une augmentation de 15.8% et de 18% par rapport au BAP-T, respectivement. Ce qui peut être attribué à la forme des GR qui augmente la friction entre les granulats et la pâte de ciment, augmentant la viscosité, le seuil de cisaillement et ralentissant la vitesse d'écoulement du mélange à travers l'entonnoir, ce qui prolonge le temps.

Zrar et al. [187] ont montré que le temps d'écoulement dans l'entonnoir en V augmente avec l'augmentation de la teneur en GGR. Pour des teneurs en GGR de 0%, 50%, et 100%, le temps d'écoulement des BAP était respectivement de 8.1 s, 9.6 s, et 11,5 s. Par rapport au mélange de référence, les valeurs de temps Tv sont augmentées de 18% et 43%, respectivement. Les auteurs ont expliqué cette augmentation du temps par la réduction de la capacité d'écoulement du mélange, conséquence de la grande friction des granulats en raison de la texture poreuse et de la forme angulaire des GR.

De même, Pereira-de Oliveira et al. [198] ont constaté que les valeurs du temps Tv ont augmenté d'environ 10.5% lorsque le pourcentage de GGR a augmenté jusqu'à 40%; ils ont remarqué aussi que quelle que soit la teneur des GR, les mélanges deviennent plus visqueux, ce qui conduit à un temps de vidange plus long à celui du mélange de contrôle. Ce comportement est dû à leur absorption d'eau élevée.

Par ailleurs, Chaib et al. [199] ont rapporté que la valeur du temps d'écoulement de BAP a augmenté de 5.15 s jusqu'à 7.35 s avec l'incorporation de 100% de gravier de béton recyclé; cela a été expliqué par une augmentation de la compacité du mélange, et donc une augmentation de la viscosité. D'autre part, les chercheurs ont noté qu'un temps d'écoulement élevé peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et/ou à un frottement inter-granulaire élevé, selon le type de gravier, ainsi qu'à leur consommation d'eau.

En outre, l'ajout et l'augmentation du pourcentage de fibres dans les BAP à base de GR augmentent le temps Tv comme il est illustré dans la figure 4.4. On note qu'aucun signe de blocage n'a été observé à travers l'ouverture pendant le déroulement de l'essai. Les mélanges 0.8BAPR1L15et 0.8BAPR2L15 présentent les temps d'écoulement les plus grands, soit 7.1 s et 7.98 s, respectivement. L'augmentation de la teneur en fibres d'acier

augmente la viscosité et le temps de vidange, parce que la formation d'un réseau matricielle fibre-ciment et la densité sont proportionnelles au pourcentage des fibres ajoutées [200].

Simalti et Singh [201] ont affirmé que l'ajout et l'augmentation du taux de fibres d'acier de pneus usés ont augmenté la viscosité et ont diminué la capacité de remplissage des BAP, l'incorporation de 0.5%, 1% et 1.5% de fibres augmentant respectivement le Tv jusqu'à 4.1 s, 6 s et 9.6 s. Les résultats expérimentaux d'Abed et al. [202] indiquent que l'ajout de 0.25% et 0.45% de fibres d'acier industrielles et de polypropylène a conduit à une augmentation du temps d'écoulement de 5.7 s jusqu'à 6.2 s et 7.7 s des mélanges étudiés. Les auteurs ont attribué ce comportement au volume de fibres qui modifie la fluidité et la viscosité des mélanges de BAP fibré en raison de l'augmentation de la friction avec les agrégats.

Kotwal et al. [203] ont obtenu un temps d'écoulement supérieur de 33% à celui du béton de référence avec une substitution de 50% de GGN et l'ajout d'une fraction volumique de 1% de fibres d'acier d'une longueur variant entre 30 mm et 40 mm. La même tendance a été observée par Mishra et Sahoo [204], où l'ajout de 0.3%, 0.6% et 0.9% de fibres de verre dans un BAP a conduit à une augmentation du temps d'écoulement de 12 s, 13 s et 15 s, respectivement.

Il est clair dans la figure 4.4 que l'accroissement de 15% à 25% de substitution du ciment par le laitier influe positivement et diminue le temps d'écoulement. Cependant, le laitier a un effet positif sur le temps d'écoulement. Les mélanges avec 15% de laitier 0.8BAPR1L15 et 0.8BAPR2L15 ont un Tv supérieur aux BAPR1 et BAPR2, de 64.35% et 56.47%, respectivement. Alors que les mêmes mélanges de BAP avec 25% de laitier ont un Tv supérieur de 55.09% et 50.78%, par rapport aux BAPR1 et BAPR2, respectivement. Ce qui est équivalent à une réduction de Tv de l'ordre de 9.26% et 5.68% des mélanges avec 25% par rapport à ceux avec 15%, respectivement. La raison est la même que celle mentionnée dans le cas du diamètre et du temps d'étalement, à savoir les caractéristiques de la surface, l'excellente dispersion des particules et la finesse élevée du laitier, par rapport au ciment, permettent de diminuer les frictions internes entre les constituants du béton et de faciliter l'écoulement du BAP.

Yahiaoui [197] a utilisé le même type de laitier d'El-Hadjar, il a constaté que l'augmentation du taux de laitier de 15% à 25%, a, un peu, diminué la cohésion des BAP ainsi que le temps d'écoulement de 16% et 33% comparé avec ceux du BAP de contrôle.

Les auteurs ont noté que plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité est importante, et qu'il dépend du type de formulation, du frottement entre les particules, de la cohésion et de la viscosité du mélange.

Selon Boukendakdji et al. [81], plus le temps d'écoulement est court, plus la capacité d'écoulement du béton est grande, ils ont rapporté que l'ajout de laitier a entraîné une diminution du temps d'écoulement à l'entonnoir par rapport aux mélanges de référence jusqu'à 20% de substitution, mais le temps optimal est obtenu avec une concentration de 15% de laitier.

Hammat et al. [75] ont aussi montré que l'incorporation de 15% du laitier et l'augmentation de leur finesse ont conduit à une amélioration d'ouvrabilité et à une diminution du temps d'écoulement des mortiers. Une diminution du temps d'écoulement de 2.52 s à 2.06 s a été obtenue pour une finesse de 500 m^2/kg, ce qui est attribué à la réduction des frottements entre les composants. En revanche, l'augmentation du laitier à 30% a engendré une augmentation du temps d'écoulement.

Dans le cas de BAP de granulats recyclés et de laitier, Kouider Djalloul et al. [42] ont indiqué que le temps d'écoulement des mélanges préparés à 30% de laitier est supérieur à celui des BAP à 15%, et le mélange de 50% de GR et 15% de laitier a enregistré le temps le plus faible qui est égal à 6.16 secondes. Ce comportement est attribué à l'augmentation de la quantité de laitier rendant le mélange plus fluide et moins cohésif, et par conséquent, le temps Tv devient plus long quel que soit le pourcentage des GR.

Dans l'étude de Bensaci [2], il a été révélé que tous les pourcentages de fibres hybrides (0% à 1.5%) ont augmenté le temps à l'entonnoir, à cause de la friction des fibres entre elles et de leur blocage instantané au niveau de l'orifice de l'entonnoir, mais la substitution du ciment par 15% et 25% de laitier a réduit le temps d'écoulement, quelle que soit la teneur en fibres. Par ailleurs, le temps d'écoulement des mélanges renforcés par 1.5% de fibres varie de 8.89 s à 7.12 s pour une augmentation du taux de substitution de 0% à 25%, respectivement.

Dans le même contexte, Zhao et al. [62] ont également présenté des résultats similaires de l'effet du laitier et des fibres métalliques à extrémités crochets sur le temps d'écoulement d'un BAP; 30% de laitier et 0.9% de fibres conduisent à une augmentation maximale de 97.3% du temps d'écoulement dans l'entonnoir en V par rapport au BAP témoin.

Al-Oran et al. [68] ont noté que l'augmentation du niveau de remplacement du laitier jusqu'à 25%, dans les mélanges ternaires à base de 10% de métakaolin, peut améliorer la capacité de remplissage en diminuant le temps de remplissage. Le temps d'entonnoir en V obtenu par les mélanges de 15%, 20%, 25% et 30% de laitier est égale à 9 s, 8.5 s 7.5 s et 11 s, respectivement, et le temps le plus bas a été obtenu par 25% (7,5 s). Car le laitier a des particules plus grandes que le métakaolin, ce qui permet de réduire la surface, de diminuer la réactivité et de faciliter le mouvement du béton (capacité de remplissage). En outre, le laitier a un seuil de cisaillement plus faible en raison de la diminution de la force interne dans le mélange, ce qui aide le béton à augmenter sa fluidité.

4.3.4 Résistance à la ségrégation

L'essai de stabilité au tamis permet de déterminer la capacité du béton à résister vis-à-vis du risque de ségrégation statique, qui se définit comme la perte d'homogénéité. Les résultats présentés dans la figure 4.5 montrent que la laitance de tous les mélanges se situe entre 4.58% et 8.23%, dans la limite recommandée puisque leurs laitances étaient inférieures à 15% qui est la limite maximale (EFNARC).

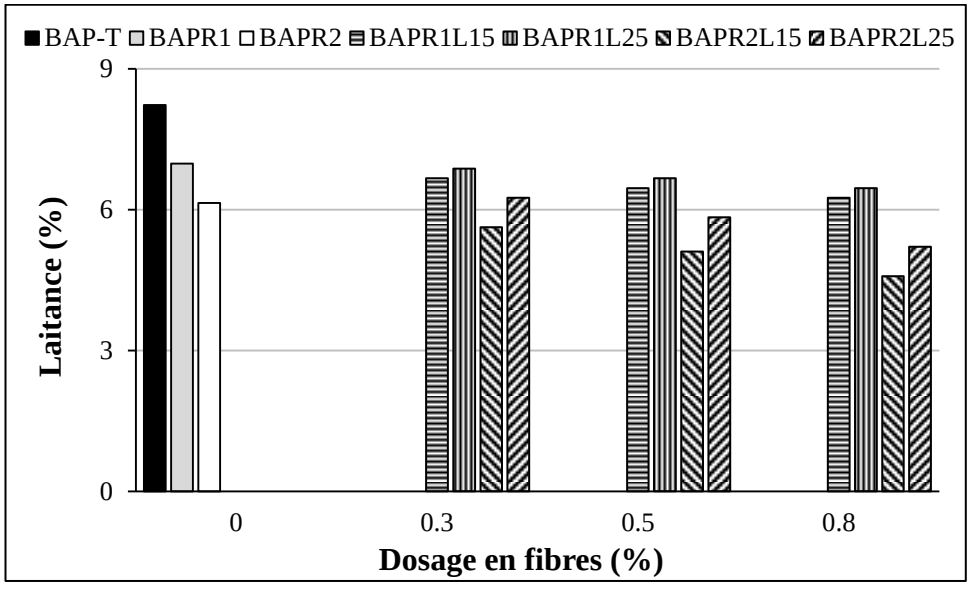


Figure 4. 5 : Résistance à la ségrégation des BAP.

Les résultats des essais présentés dans la figure 4.5 montrent que la présence de granulats de béton recyclés dans les BAP entraîne une amélioration de la résistance à la ségrégation qui se traduit par une diminution du pourcentage en laitance. La résistance à la

ségrégation des BAP comprenant 50% (BAPR1) et 100% (BAPR2) de GGR est améliorée de 15.18% et 25.31%, respectivement, par rapport au BAP-T. Les tendances observées dans les résultats peuvent être attribuées aux grands coefficients d'absorption d'eau des fines recyclées, provenant du mortier adhéré lors du malaxage, qui permettent d'absorber plus d'eau, augmentant la cohésion, diminuant la laitance, et améliorant ainsi la résistance à la ségrégation.

En outre, Samoel & Fareed [205] ont également démontré que l'utilisation de GGR dans le BAP, avait un effet positif sur la résistance à la ségrégation en fonction du taux de remplacement utilisé allant de 0% à 60%, avec un incrément de 20%. La résistance à la ségrégation augmente de 10.8%, 16.7% et 29.4%, respectivement.

Chaib et al. [199] ont montré que la résistance à la ségrégation des mélanges a été améliorée lorsque la teneur en GGR augmente. D'après leurs résultats, lors de l'augmentation de la quantité de GGR de 0% à 50% et 100 %, le pourcentage de l'indice de ségrégation des tamis a été réduit de 10% et 29%, respectivement. Cela est dû à l'absorption d'eau élevée du squelette des agrégats qui réduit les effets défavorables de l'eau de gâchage libre dans le mélange de béton frais.

Saffudin et al. [206] ont examiné l'effet de GGR sur l'indice de ségrégation des BAP, ils ont trouvé que l'indice de ségrégation du béton témoin était de 9.8%, cependant, ce dernier a été réduit à 70% et 100% de GGR de 9.5% et 8.3%, respectivement, ceci est dû à la grande teneur en fines, obtenues lors de malaxage, qui augmente la cohésion du mélange à une faible teneur en eau libre. En outre, l'augmentation de l'angularité et de la rugosité de surface à une teneur élevée en GGR a contribué à augmenter la cohésion, conduisant ainsi à une réduction de l'indice de ségrégation. Pour la même explication, Matar et Assaad [207] ont conclu que les mélanges qui contiennent des niveaux élevés de remplacement de GGR ont conduit à une amélioration de la stabilité; la laitance du mélange de contrôle a été diminuée de 17.6% à 12.2% lors de l'incorporation de 100% de GGR.

Néanmoins, les résultats dans la figure 4.5 indiquent que les FART récupérées de pneus usés contribuent à un effet positif, à savoir, une amélioration de la résistance à la ségrégation avec l'augmentation du volume de fibres des BAPR. Le pourcentage en laitance baisse avec l'augmentation du taux en fibres de 0.3%, 0.5% et 0.8%. De plus, on peut remarquer que les mélanges de BAPR, avec 100% de GGR et 15% de laitier, présentent les meilleures résistances à la ségrégation par rapport à ceux de 50%. La

résistance à la ségrégation des mélanges 0.3BAPR2L15, 0.5BAPR2L15 et 0.8BAPR2L15 s'est améliorée de 31.64%, 38% et 44.30% par rapport au mélange BAPR2, respectivement. Alors que la résistance à la ségrégation des mélanges 0.3BAPR1L15, 0.5BAPR1L15 et 0.8BAPR1L15 se limite à 19%, 21.52% et 24.40% par rapport au mélange BAPR1. Généralement, les fibres 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 [137].

Bensaci et al. [137] ont observés visuellement un phénomène de ségrégation du BAP réalisé avec un taux de fibres d'acier recyclées supérieur à 0.8%, le 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. Par conséquent, ils ont conclus que l'essai de stabilité au tamis ne reflète pas la résistance à la ségrégation du BAP fibré.

Par ailleurs, Karrem et al. [208] ont constaté que l'ajout de fibres d'acier recyclées de 0.5%, 0.75% et 1% de diamètre de 0.9 mm et d'une longueur de 40 mm a contribué à diminuer les indices de ségrégation de 14%, 22% et 35%, respectivement. Les chercheurs ont justifié cette diminution aux fibres, qui fonctionnent comme un réseau interne et empêchent le mouvement du ciment à travers le tamis de ségrégation.

Nos résultats sont en accord avec les conclusions précédentes de Mezzal et al. [209], ils ont observé que l'inclusion de 1% de fibres de pneus usés a augmenté la résistance à la ségrégation du BAP fibré jusqu'à 20% par rapport au BAP sans fibre. Cette amélioration est due à l'augmentation du frottement interne entre les fibres et les granulats suite à l'ajout de fibres.

En outre, pour Abdullah et al. [210], l'ajout de 1% de fibres à extrémités crochets d'une longueur de 30 mm a permis d'améliorer la résistance à la ségrégation jusqu'à 43.75%, cela est expliqué par la forme des extrémités des fibres et leur distribution aléatoire qui empêchent les gros granulats de descendre.

Selon Matar et Assaad [207], l'incorporation de fibres de polypropylène a conduit à une réduction des indices de ségrégation, reflétant une meilleure résistance à la ségrégation des agrégats. L'indice de ségrégation est passé de 17.6% dans le mélange témoin à 9.7% avec l'ajout de 1.75% de fibres. Ceci est attribué aux fractions volumiques plus élevées de fibres

qui créent un réseau continu de contacts directs et de liaisons inter-particulaires, conduisant à une meilleure stabilité.

De plus, Bayeh et al. [211] ont montré que la laitance des BAP contenant 25% à 100% de fins granulats de béton recyclés est diminuée, mais les mélanges présentent une bonne stabilité et des pourcentages de ségrégation situés entre 6% à 13%. Aussi, ces pourcentages sont diminués lors de l'ajout de 0.3% à 1.2% de fibres de polypropylène.

En revanche, on note une augmentation négligeable de la laitance des BAPR lors de l'augmentation du pourcentage de substitution du ciment par du laitier, comme il est présenté dans la figure 4.5, les mélanges devient plus fluide mais aucun ressuage a été observé. La résistance à la ségrégation des BAPR comprenant 25% de laitier est légèrement inférieure à celle des BAP conçus avec 15% de laitier. Par exemple, la résistance à la ségrégation des mélanges 0.3BAPR2L25, 0.5BAPR2L25 et 0.8BAPR2L25 est inférieure de 10.16%, 11.86% et 10.16% à ceux avec 15% de laitier. Ce comportement est principalement dû à la grande teneur en pâte de ciment.

Boukendakdji et al. [81] ont abouti aux mêmes constatations, à savoir que le pourcentage de laitance augmente en fonction de l'augmentation de la teneur en laitier (0% à 25%). La résistance à la ségrégation optimale est atteinte à 15% de laitier, car les niveaux de substitution de 20% et 25% donnent des pourcentages de laitance supérieurs à la limite recommandée, soit 17% et 23%, respectivement, et présentent des signes de ségrégation et de ressuage. De même, Yahiaoui et al. [73] ont observé que la résistance à la ségrégation diminue lorsque la teneur de laitier augmente de 15% à 25%, puisque ce dernier favorise l'instabilité du béton, considérant 15% comme le pourcentage optimal.

Kouider Djalloul et al. [42] ont également montré que le pourcentage de laitance augmente lorsque la teneur de laitier augmente. Pour des taux d'incorporation de laitier de 15% et 30%, le pourcentage de la laitance des BAP contenant 50% de GR est respectivement de 41% et 76%, comparé à celui des GR seuls. En outre, Boubakeur et al. [212] ont observé que la laitance des mélanges est diminuée avec l'incorporation de granulats de béton recyclés et qu'elle est augmentée avec l'ajout de 15% de laitier. De plus, l'incorporation de laitier et de métakaolin a amélioré les performances des bétons recyclés en termes de résistance à la ségrégation et tous les mélanges ont une bonne stabilité vis-à-vis de la ségrégation. Les auteurs ont obtenu une réduction de 56% de laitance du mélange recyclé avec 15% de laitier et de métakaolin, par rapport au mélange de granulats naturels.

4.4 Effet des fibres recyclées et du laitier sur les propriétés des BAP de granulats recyclés à l'état durci

4.4.1 Résistance à la compression

Les figures 4.6 et 4.7 illustrent les résultats de l'essai de la résistance à la compression mesurée pour les différentes éprouvettes de mélanges de BAP étudiés dans cette recherche, à l'âge de 28 jours et 90 jours. D'après la figure 4.6, on peut remarquer que la résistance à la compression des mélanges à 28 jours est diminuée avec l'utilisation et l'augmentation du pourcentage de GR. On constate une réduction non significative de la résistance à la compression de 7.95% à 28 jours au taux de remplacement de GGR par 50% (BAPR1) et une réduction de 11.36% au taux de remplacement de GGR par 100% (BAPR2) par rapport au BAP de référence (BAP-T). Une tendance similaire au nôtre cas a été observée dans l'étude de Katar et al. [213], ils ont rapporté une réduction de 24% et 25% de la résistance à la compression à 28 jours pour 15% de cendres volantes et un taux de remplacement de 50% et 75% par les GGR, respectivement.

D'autre part, on remarque une augmentation de la résistance à la compression des BAP avec l'âge, mais elle reste inférieure au BAP de contrôle. À 90 jours (figure 4.7), les mélanges BAPR1 et BAPR2 montrent une diminution de 9.81% et 12.5%, respectivement, par rapport au BAP-T. En général, les granulats recyclés sont plus fragiles que les granulats non recyclés car la force d'impact pendant le processus de concassage peut provoquer des fissures et microfissures potentielles dans les granulats. De plus, les granulats recyclés fragilisés peuvent être détruits pendant le processus de malaxage, ce qui entraîne une diminution de la résistance à la compression du BAPR.

En outre, Revilla-Cuesta et al. [214] ont conclu que la réduction de la résistance est causée par la forte porosité des fins GR (FGR) due à la présence de grande quantité de mortiers adhérés, qui augmente ainsi les zones de transition interfaciales (ZTI). Par ailleurs, les ZTI sont aussi des paramètres importants pour la résistance à la compression des bétons recyclés, l'ancienne ZTI (entre l'ancien mortier et le granulat recyclé) est plus faible que la nouvelle ZTI (entre le nouveau et l'ancien mortier). Ainsi, l'ancienne ZTI pourrait être la première zone où la fissure se développe [215]. Selon Kouider djelloul et al. [42], la chute de la résistance à la compression des BAPR est due au mortier adhéré aux GR qui empêche l'hydratation du ciment et affaiblir la zone de transition.

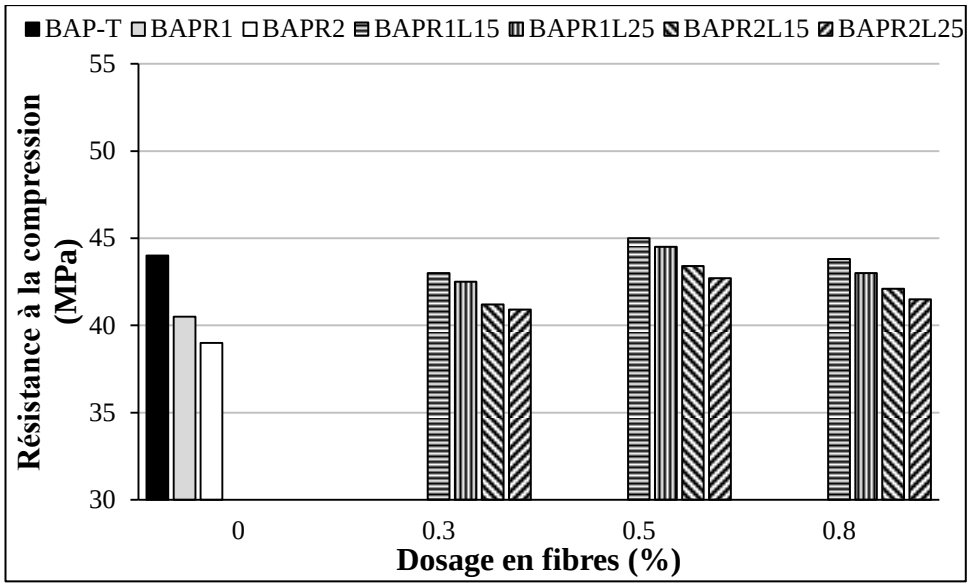


Figure 4. 6 : Résistance à la compression des BAP à 28 jours.

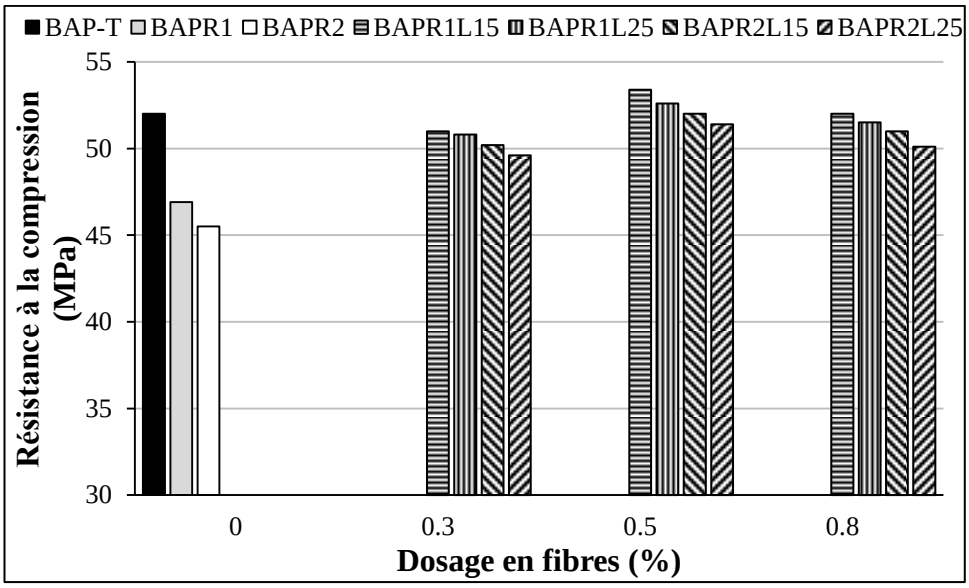


Figure 4. 7 : Résistance à la compression des BAP à 90 jours.

Par contre, l'ajout de FART a un effet positif et compense la chute de la résistance due au remplacement de GR. La résistance à la compression augmente avec l'addition et l'augmentation de fibres de 0.3% jusqu'à 0.8%. On note que tous les échantillons des BAPR renforcés par des fibres ont une résistance à la compression supérieure à celle des BAPR à 28 et 90 jours, comme il est montré dans les figures 4.6 et 4.7. L'ajout de 0.3%,

0.5% et 0.8% de FART dans les mélanges à base de 50% et 100% de GGR et 15% de laitier augmente la résistance à la compression de 6.17%, 11.11% et 8.14%, de 5.64%, 11.28% et 7.94%, respectivement à 28 jours. La même tendance a été également observée à l'âge de 90 jours. Les résistances des mélanges 0.3BAPR1L15, 0.5 BAPR1L15 et 0.8BAPR1L15 augmentent de 8.74%, 13.85% et 10.72%, alors que les résistances des mélanges 0.3BAPR2L15, 0.5BAPR2L15 et 0.8BAPR2L15 augmentent de 10.33%, 14.29% et 12.08% par rapport aux BAPR1 et BAPR2 à 90 jours. Car les fibres ont la capacité de retarder et d'arrêter la formation et la propagation des fissures latérales dans le béton, ce qui améliore la répartition des contraintes et le transfert des charges dans le béton et augmente la résistance à la compression. Parmi tous les mélanges, les mélanges 0.5BAPR1L15 et 0.8BAPR1L15 ont présenté des résistances à la compression à 28 et 90 jours, similaires ou supérieures à celle du BAP témoin. Mais, les mélanges des BAP avec 100% de GGR et renforcés présentent une résistance inférieure approximative à 1 MPa à l'âge de 28 et 90 jours par rapport à celle des mélanges avec 50%, ce qui indique qu'on peut aller à un remplacement total (100%) de gros granulats sans perte significative de résistance.

Sahraei et al. [216] ont constaté un effet positif des FAR collectées à partir de déchets de pneus sur le comportement à la compression du béton recyclé. L'utilisation de 1% de fibres recyclées a augmenté la résistance à la compression des échantillons contenant 100% de GGR de 13%. Ceci a été interprété par la capacité de ces fibres de ponter les fissures créées par la force exercée durant le chargement.

Par contre, Bensaci et al. [137] ont identifié une diminution de la résistance à la compression de 9.36%, lorsque 1.5% de FAR ont été ajoutés à un BAP; cette réduction peut être attribuée à la partie restante des particules de caoutchouc sur la surface des fibres. La partie en caoutchouc constitue une zone de faiblesse dans le béton. Ces zones faibles peuvent conduire à la concentration des contraintes dans la pâte de ciment autour des particules de caoutchouc. La contradiction entre leurs résultats et les nôtres peut être attribuée aux fibres utilisées, dans notre cas nous avons nettoyé les FAR des particules de caoutchouc résiduel, alors que, pour Bensaci et al. [137] ils ont utilisé les fibres telles quelles.

D'autre part, l'augmentation du pourcentage de substitution du ciment de 15% jusqu'à 25% n'a pas d'influence significative sur la résistance à la compression (diminution

d’environ 1 MPa), à l’âge de 28 et 90 jours comme il est illustré dans les figures 4.6 et 4.7. De même, la résistance des BAPR avec 15% et 25% de laitier augmentent à long terme. Une augmentation significative des BAPR renforcés et substitués par 15% et 25% de laitier est remarquée allant de 5 MPa à 9 MPa par rapport aux BAPR1 et BAPR2, respectivement. Cela s’explique par la lente et la régulière hydratation du laitier à long terme. Selon Hammat et al. [75], l’ajout de laitier dans les mélanges cimentaires a un effet positif sur la résistance à la compression et elle augmente jusqu’à 2 MPa à 3 MPa à long terme. Cette augmentation a été attribuée aux réactions pouzzolaniques continues d’oxyde de calcium (CaO) et silice (SiO_2) du laitier qui réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium "$Ca(OH)_2$" produit par l'hydratation du ciment portland pour former des hydrates de silicate de calcium (C-S-H) qui remplissent les vides et améliorent la microstructure des bétons durcis [75, 76, 77].

Ofuyatan et al. [70] ont montré que la résistance à la compression des BAP de 15% et 25% de laitier est égale à 15.43 MPa et 14.39 MPa à 7 jours et à 25.15 MPa et 21.43 MPa à 28 jours, respectivement. Cette augmentation est due au laitier qui agit comme une charge inerte réduisant les vides dans la matrice. Par ailleurs, la faible résistance au jeune âge est expliquée par la lente hydratation et les réactions pouzzolaniques du laitier qui n'étaient pas suffisantes pour accélérer la réaction de la pâte qui pourrait augmenter la résistance à la compression. D’après Vadim et al. [217], la substitution du ciment par le laitier retardera le développement de la résistance au jeune âge de la pâte. En raison de la faible réactivité pouzzolanique du laitier avec les produits d’hydratation du ciment aux premiers âges, principalement avec la portlandite. Par ailleurs, la faible teneur de CaO dans le laitier par rapport au ciment entraîne une réduction de la quantité de $Ca(OH)_2$ et donc de la quantité des gels C-S-H [67, 90].

Boukendakdji [218] a trouvé une diminution de la résistance à la compression de 7.4%, 11%, 23.9% et 28.9% des BAP à 10%, 15%, 20% et 25% de laitier à 28 jours, par rapport au mélange témoin, mais elle est devenue moins importante à 90 jours. Par exemple, la résistance à la compression du BAP de 15% de laitier est inférieure à celle du BAP témoin de 7.69 MPa à 28 jours et de 3.92 MPa à 90 jours.

Selon Vivek et Dhinakaran [80], le mélange de 25% de laitier a donné le meilleur résultat en termes de résistance à la compression et a montré des valeurs plus proches de celles du mélange témoin. Cela est en raison de l’utilisation du laitier lors de la préparation

du BAP qui génére une chaleur d'hydratation plus faible, ce qui réduit le retrait de séchage. Par ailleurs, l'ajout de laitier a permis d'augmenter l'affinement de l'espace poreux en raison de la dense zone de transition interfaciale dans le mélange.

Shahryari et al. [71] ont constaté que l'utilisation d'un pourcentage fixe de 15% de laitier n'a pas d'influence sur la résistance à la compression, alors qu'elle est diminuée avec l'augmentation du pourcentage de fins granulats recyclés. Pour un rapport d'E/C fixe (0.4), l'incorporation de 0%, 50% et 100% de GR a diminué la résistance de 54.71 MPa, 47.67 MPa et 31.76 MPa, respectivement; ils ont également noté que les mélanges avec une faible quantité de remplacement (50%) ont montré les meilleures performances.

Bensaci [2] a constaté que l'ajout de 0%, 15% et 25% de laitier a légèrement diminué la résistance à la compression du BAP de 1% de fibres d'acier hybrides de 51.7 MPa, 48.7 MPa et 46.3 MPa, respectivement, à 28 jours. En revanche, la résistance est augmentée à 90 jours, due à la lente et à la régulière hydratation du laitier à long terme.

Zaid et al. [219] ont révélé que les résistances à la compression des bétons ordinaires conçus avec 50% et 100% de GGR, 2% de fibres à double extrémité et 25% de laitier étaient légèrement inférieures à 28 et 56 jours, alors qu'à 90 jours, elles étaient identiques ou légèrement supérieures à celle du béton de GN. L'ajout de laitier favorise l'adhérence de la matrice du liant, ce qui réduit l'apparition de microfissures et améliore la résistance du béton. En outre, le laitier remplit les pores capillaires de la matrice et améliore par la suite les performances de la ZTI.

4.4.2 Résistance à la flexion

D'après les figures 4.8 et 4.9, la résistance à la flexion du BAP de référence est égale à 5.42 MPa et 6.3 MPa à 28 et 90 jours, respectivement. Les résultats ont montré que la résistance à la flexion du BAP conçu avec 100% de GGR est légèrement inférieure à celle du mélange avec 50% de GGR; ainsi, les deux mélanges ont une résistance à la flexion inférieure à celle du BAP de référence. La résistance à la flexion du BAPR avec 50% de GGR est inférieure de 22.88% et 21.3% à 28 et 90 jours, respectivement, par rapport au BAP témoin. L'augmentation de la teneur en GGR jusqu'à 100% diminue la résistance à la flexion de 37.27% et 32.87% par rapport au BAP témoin, respectivement, à 28 et 90 jours. Des résultats similaires ont trouvés par Mo et al. [220], ils ont suggéré une hydratation incomplète du ciment, en raison de l'ancien mortier fixé sur le granulat recyclé qui peut

affaiblir la liaison entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment hydraté, ce qui diminue la résistance à la flexion. La ZTI du BAP à base de GN est plus dense comparativement à celle du BAPR, en raison des fissures qui se joignent à l'interface et de la présence des pores à proximité de cette zone. Les résultats concordent avec d'autres études qui ont montré que l'ajout de GR au BAP a une influence défavorable sur les propriétés mécaniques [221, 222]. (compression+fondage)

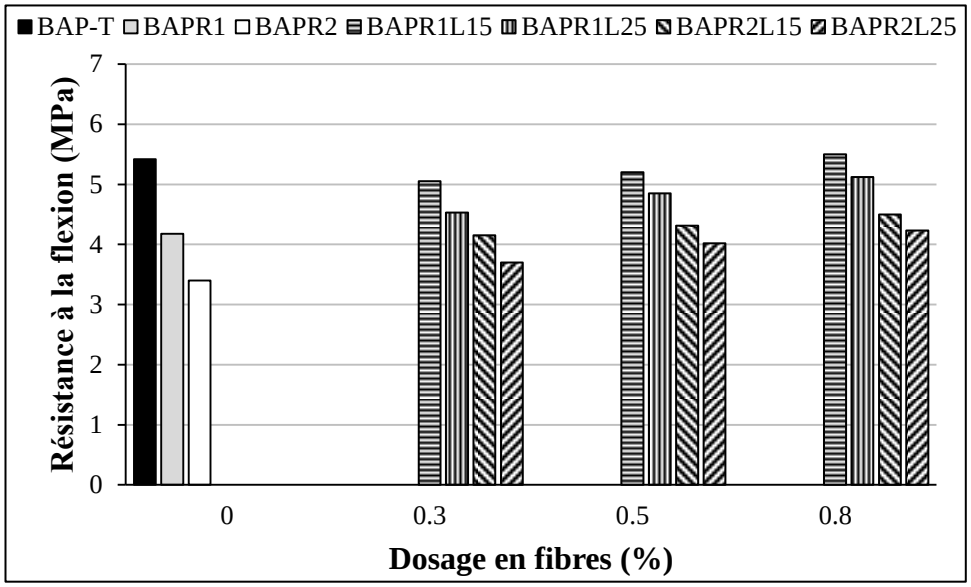


Figure 4. 8 : Résistance à la flexion à 28 jours.

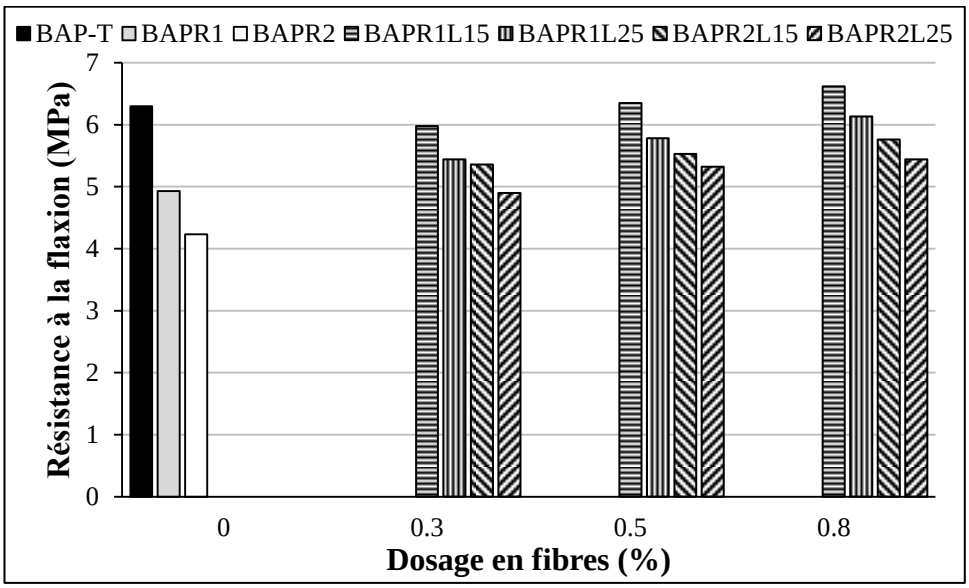


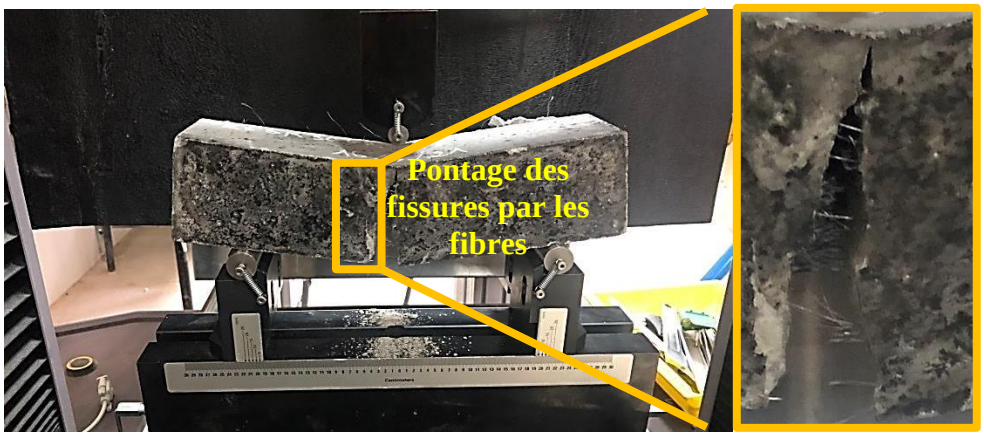
Figure 4. 9 : Résistance à la flexion à 90 jours.

Martínez-García et al. [223] ont considéré que la substitution de 25% de sable naturel par du sable de béton est le pourcentage optimum de remplacement. Ils ont observé que la résistance à la flexion des mortiers ordinaires avec 25% de sable recyclé a diminué de 11% à 28 jours. La faible diminution de la résistance à la flexion a été attribuée à la surface plus rugueuse du sable recyclé qui améliore la liaison entre le sable et la pâte de ciment, ce qui nécessite plus d'énergie pour la rupture de l'échantillon. Par ailleurs, Saini et Singh [190] ont conclu que le remplacement total de GGN par des GGR dans un BAP a diminué la résistance à la flexion de 5.13 MPa à 4.32 MPa, cela indique une chute de 16%, qui est moins importante que celle obtenue dans cette présente étude, étant donné qu'ils n'ont pas substitué le sable naturel par du sable recyclé. La diminution de la résistance à la flexion est en raison de la présence d'une faible ZTI dans les BAP contenant des GR.

D'après les figures 4.8 et 4.9, les fibres recyclées traitées augmentent la résistance à la flexion. Il est clair que les BAP conçus à partir de GR et renforcés par des FART (15% de laitier) ont une résistance à la flexion supérieure à celle des BAP de granulats recyclés. L'ajout de 0.3 à 0.8% de fibres augmente la résistance à la flexion de 20.81 à 31.58% et de 21.30 à 34.28%, respectivement, à 28 et 90 jours, par rapport au BAPR1. En outre, l'addition des mêmes pourcentages en FART augmente la résistance à la flexion de 22.06 à 32.35% et de 26.71 à 36.17%, respectivement, à 28 et 90 jours, par rapport au BAPR2. Ces résultats permettent de conclure qu'avec l'augmentation du pourcentage des fibres d'acier, la résistance à la flexion des BAP augmente, elle aussi, grâce à l'amélioration de la cohésion entre les agrégats suite à la présence des FART, comme il est montré dans la figure 4.10 dont la 4.10 (a) présente la rupture en deux parties de l'échantillon sans fibres et la 4.10 (b) et (c) montrent la capacité des FART de contrôler la fissuration et améliorer le comportement ductile du béton. Les fibres d'acier dispersées dans le béton peuvent supporter les contraintes de traction, ce qui retarde la vitesse de propagation des fissures dans la matrice pendant le processus de chargement et améliore la résistance à la flexion. Les fibres peuvent traverser les fissures et transférer les contraintes de traction permettant l'arrêt de la propagation de macros ou microfissures, retardant et empêchant ainsi le développement d'autres fissures [62].

Selon Omidinasab et al. [224], les résultats de la résistance à la flexion du béton avec 50% et 100% de GR renforcés par 0.5% et 1% de fibres d'acier industrielles, est supérieure aux celles du béton à base de GR seuls. Grâce à l'action de pontage des fissures, l'addition de 1% de fibres d'acier industrielles a augmenté la résistance à la flexion de 101.45%.

(a) (b)



(c)

Figure 4. 10 : (a) Echantillons sans fibre, (b) Echantillons avec fibres et (c) Pontage des fissures.

Çelikten [225] a étudié l'effet des FAR sur les propriétés mécaniques de mortier géo-polymère. Les fibres recyclées ont été utilisées dans le mortier à des proportions de 0%, 0.5%, 1% et 1.5% en volume. Il a rapporté que la résistance à la flexion a augmenté avec l'augmentation de la teneur en fibres et a atteint 138% avec 1.5% de fibres. L'espace moyen entre les fibres est réduit en augmentant la quantité de fibres d'acier, cette réduction entraîne une diminution de la contrainte entre la matrice du liant et les fibres. En outre, la formation et la propagation des fissures sont retardées en raison de la réduction de la contrainte.

Similairement à la résistance à la compression, et comme illustré dans les figures 4.8 et 4.9, l'augmentation de pourcentage du laitier de 15% à 25% n'a pas d'influence

significative sur la résistance à la flexion et donnent des résistances supérieures au celles des BAP avec GR seuls. La résistance à la flexion des mélanges 0.8BAPR2L15 et 0.8BAPR2L25 augmente de 32.25% et 24.41% à 28 jours, respectivement, par rapport au BAPR2. Elle augmente aussi avec l'âge de cure (90 jours) de 36.17% et 28.61%, ce qui est probablement dû à l'effet du remplissage du laitier et à sa nature pouzzolanique.

Zhao et al. [62] ont révélé qu'indépendamment de la teneur en fibres d'acier industrielles utilisée pour renforcer les BAP, le remplacement du ciment par du laitier a amélioré la résistance à la flexion, en raison de l'effet de renforcement du laitier sur l'interface granulat-pâte et fibre-matrice. De plus, le laitier peut générer des produits de réaction plus uniformes et plus denses, qui sont capables de combler les microfissures existant dans la matrice du béton. En conséquence, une microstructure stable et dense a été générée, améliorant les propriétés mécaniques du béton fibré. L'effet synergique du laitier et des fibres d'acier était important dans le mélange de 0.9% de fibres et 30% de laitier, qui présentait une résistance à la flexion élevée parmi tous les mélanges; une augmentation de la résistance de 139.8%, à 28 jours, par rapport à celle du mélange de référence sans fibres et sans laitier.

Selon Elsayed et al. [69], la présence de 25% du laitier dans les BAP n'a pas d'influence sur la résistance à la flexion et elle diminue légèrement de 5.9%, à 28 jours, par rapport au mélange de référence. Cela résulte de la faible structure du béton lors d'un substitut partiel du ciment par du laitier, conduisant à l'affaiblissement de la liaison interfaciale entre le mortier et les granulats et de l'intensité de la contrainte, due à la lente hydratation du laitier.

Hadj Sadok et al. [88] ont observé une évolution linéaire de la résistance à la flexion, à 28 et 90 jours, des mortiers basés sur la substitution partielle de 50% du laitier, montrant une résistance similaire à celle du mortier témoin.

Des résultats similaires montrant l'effet positif des ajouts cimentaires sur la résistance à la flexion ont été obtenus par Kumar et al. [226]. La résistance à la flexion la plus élevée de 8.97 MPa est observée à un niveau de remplacement de 15% de cendres volantes et 12% de fumée de silice avec 1% d'inclusion de fibres d'acier par rapport aux autres niveaux de remplacement, montrant une augmentation en pourcentage de 20.4% par rapport à celui de contrôle, car les ajouts augmentent le taux de réaction d'hydratation, ce qui entraîne la

formation de plus de gel de C-S-H qui contribue à obtenir un mélange plus compact et améliore la résistance à la flexion du béton.

D'autre part, Ali et al. [227] ont montré que le béton recyclé de 100% de GGR a présenté une augmentation de 73% lorsqu'il a été incorporé à la fois avec 15% de cendres volantes et 1% de fibres d'acier à extrémités crochues, d'un diamètre de 0.9 mm et d'une longueur de 35 mm. En outre, Muthupriya et al. [228] ont noté que pour 30% de laitier et 0.1% de fibres de polypropylène, la résistance à la flexion est considérablement plus élevée que pour les autres proportions de laitier (40% et 50%).

4.4.3 Module d'élasticité

Les résultats de l'essai du module d'élasticité des BAP sont présentés à la figure 4.11 et 4.12 à 28 et 90 jours de cure. On note que la tendance du module d'élasticité est similaire à celle de la résistance à la compression. Les résultats montrent que le changement de granulats naturels par des granulats de béton recyclés, quelle que soit leur quantité, entraîne une diminution du module d'élasticité (E) des BAPR à tous les jours de cure. La substitution de granulats naturels à 50% et 100 % par des granulats de béton recyclés a entraîné une diminution du module d'élasticité de 13.49% et 18.04% à 28 jours, et de 12.87% et 17.28% à 90 jours, respectivement, par rapport au BAP témoin. Cela est dû principalement à la porosité et au volume de ciment attaché aux granulats recyclés par rapport aux granulats naturels, donnant, ainsi, un béton moins dense. En outre, l'existence des microfissures, à l'intérieur des granulats recyclés, qui se sont formées pendant le processus de concassage des déchets de béton et dans les zones de transition interfaciale entre l'ancien mortier adhéré et le granulat d'origine, ont diminué la rigidité des BAP de GR et, donc, le module d'élasticité. Par ailleurs, la diminution du module élastique des bétons recyclés résulte du module d'élasticité des GGR, lequel est inférieur à celui des GGN [229].

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans une autre étude de Fiol et al. [230], qui ont observé une réduction de 7% et 10% du module d'élasticité en remplaçant 50% et 100% de GGN par des GGR provenant de déchets de béton préfabriqué. Cela est dû à la grande porosité et au volume de l'ancien ciment adhéré au granulat recyclé, par rapport au granulat naturel, qui entraîne une grande déformabilité du béton. Également, Mohammed et al. [231] ont noté une diminution de 6% et 10% des BAP à base de 50% et 100% de GGR et une diminution de 2% des BAP à base de 20% de FGR. La réduction du module

d'élasticité a été attribuée au faible module d'élasticité de GR par rapport à celui de GN, et à la faible liaison entre la surface du granulat recyclé et le nouveau mortier, par rapport au granulat naturel.

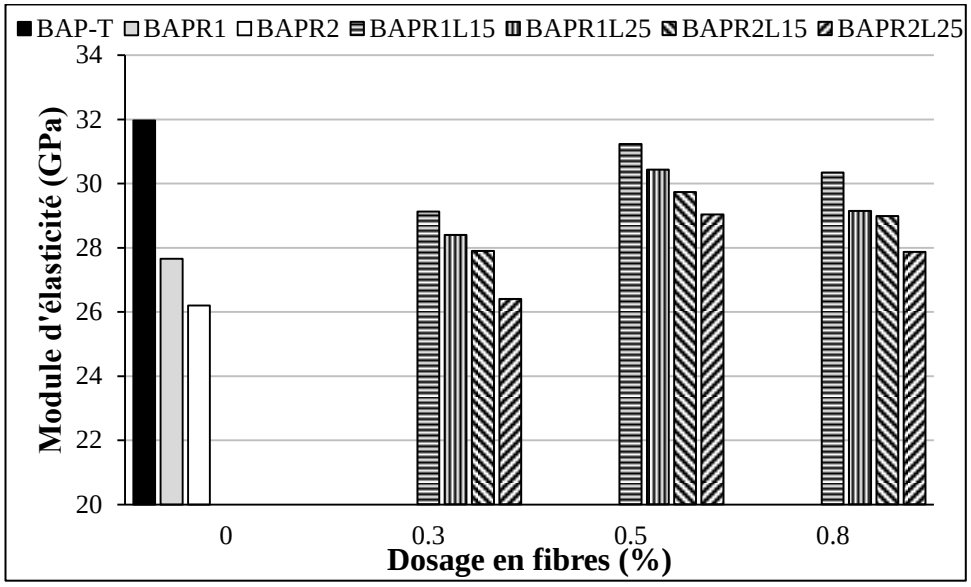


Figure 4. 11 : Module d’élasticité des BAP à 28 jours.

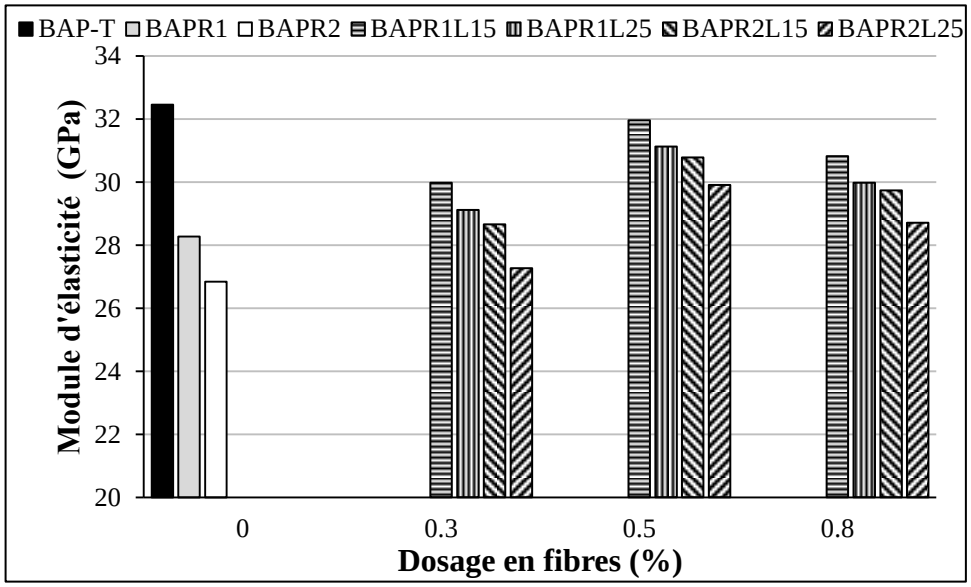


Figure 4. 12 : Module d’élasticité des BAP à 90 jours.

Les figures 4.11 et 4.12 montrent aussi l'effet de la teneur en fibres de pneus recyclés sur le module d'élasticité des BAPR. Les résultats montrent qu'indépendamment de la teneur en fibres recyclées traitées, les mélanges de BAPR renforcés présentent une meilleure élasticité que les mélanges de BAPR non renforcés. Par exemple, on constate que le module d'élasticité des BAPR2L15 augmente de 6.48%, 13.50% et 10.62% à 28 jours et de 6.74%, 14.66% et 10.76% à 90 jours, en y ajoutant 0.3%, 0.5% et 0.8% de FART par rapport au BAPR2. Cela est dû à l'effet de pontage des fibres d'acier qui a permis d'obtenir une meilleure intégrité, une plus grande rigidité du béton et une meilleure capacité de résister à la force appliquée [232]. En outre, les fibres d'acier fournissent des contraintes, sur l'échantillon du BAP, qui réduisent la déformation longitudinale produite et qui permettent d'augmenter le module d'élasticité [233].

De même, les résultats de la recherche de Raidyarto et al. [234] ont montré que le module d'élasticité des mélanges de BAP avec 1% de fibres d'acier industrielles a augmenté de 6.9% à 28 jours d'âge de cure humide, comparé avec un BAP sans fibres. La forme des fibres d'acier peut améliorer la liaison et l'ancrage des fibres dans le béton.

D'autre part, comme le montrent les figures 4.11 et 4.12, l'utilisation de 25% du laitier suit la même tendance que la résistance à la compression aux deux âges de cure, gardant toujours le module d'élasticité des BAPR et renforcés supérieur aux celles des BAPR seuls. Par exemple, le module d'élasticité des mélanges 15BAPR10.8 et 25BAPR10.8 est respectivement supérieur de 9.73% et 5.39% à 28 jours de cure par rapport au BAPR1 et de 9.02% et 6.05%, respectivement, à 90 jours. On peut remarquer, aussi, que le module des BAPR contenant les deux pourcentages de laitier augmente à l'âge de 90 jours, suite à l'amélioration du taux d'hydratation du laitier à long terme, comme il est expliqué dans la section de la résistance à la compression. Des résultats identiques sur le BAP ont été montrés par Zhao et al. [235].

Selon Mahalingasharma et al. [236], l'ajout de fibres d'acier ondulées de 30 mm de longueur avec des pourcentages de 0.25%, 0.5% et 0.75% dans un BAP à base de 100% de GN et de 30% de laitier augmentent le module d'élasticité. L'augmentation du module est égale à 3.54% et 3.83% pour 0.5% et 0.75% de fibres, à 28 jours, respectivement, par rapport au mélange témoin.

4.4.4 Vitesse de pulsation ultrasonique

Tous les mélanges présentent des valeurs de la vitesse de pulsation ultrasonique (VPU) supérieures à 4500 m/s, ce qui indique que tous les mélanges étudiés sont d'excellente qualité. Comme observé dans les figures 4.13 et 4.14, le remplacement de 50% et 100% de GGN par des GGR dans les mélanges de BAPR a peu réduit la vitesse de pulsation ultrasonique. La valeur de la vitesse mesurée du BAP-T est de 4900 m/s à 28 jours et 5000 m/s à 90 jours, les mélanges BAPR1 et BAPR2 présentent 95.69% et 92.67% à 28 jours et 95.25% et 93.05% à 90 jours de la vitesse du BAP-T. L'utilisation de GR dans les mélanges de béton contribue à diminuer les valeurs de VPU du BAP, en raison de la présence du mortier adhéré aux granulats recyclés, ce qui a pour conséquence de perturber la distribution des pores dans le béton et affecte la transmission des ondes ultrasoniques [237].

Les résultats sont en accord avec les conclusions d'une étude antérieure [238]. Le remplacement de 25%, 50%, 75% et 100% de GGR a diminué la VPU de 5.56%, 5.63%, 9% et 10%, respectivement, par rapport au mélange de GN. Le facteur de réduction de la VPU dans le béton contenant des granulats recyclés est la porosité de ce type de granulats ainsi que la faible couche de liaison au niveau de connexion du granulat à la pâte de ciment.

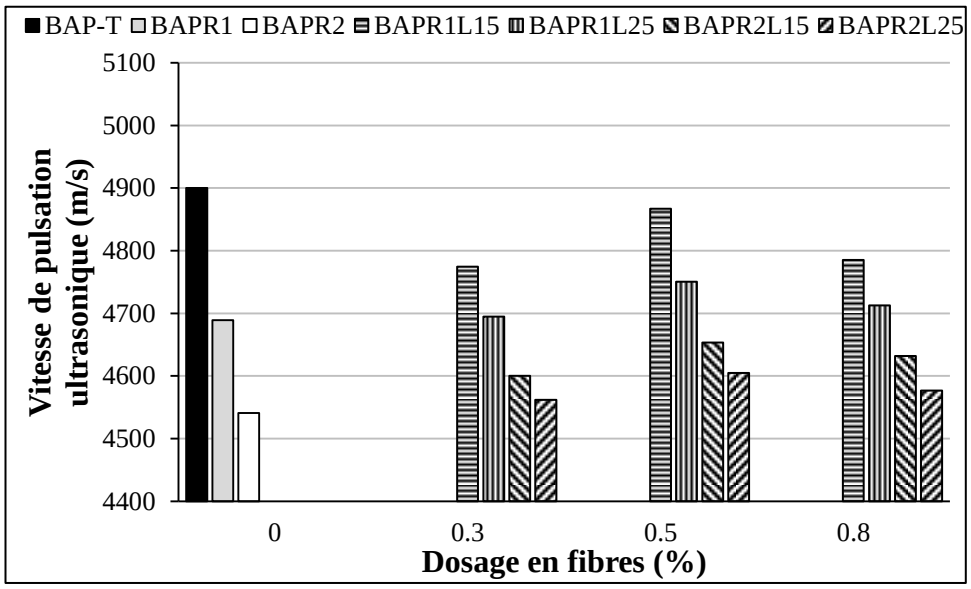


Figure 4. 13 : Vitesse de pulsation ultrasonique à 28 jours.

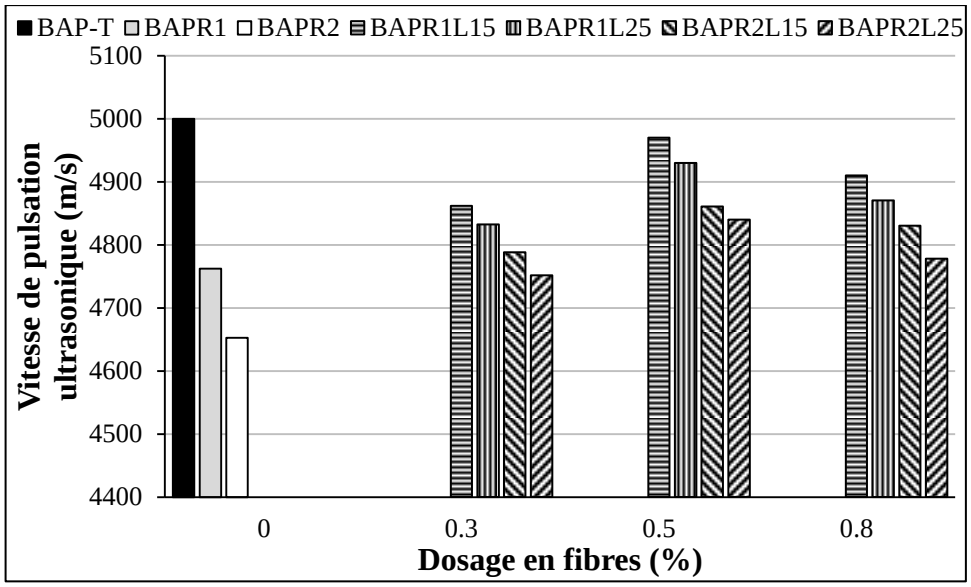


Figure 4. 14 : Vitesse de pulsation ultrasonique à 90 jours.

Une étude précédente [239] a révélé le même comportement des BAP montrant que le remplacement de 50% et 100% de GGR conduisent à une réduction de VPU de 5.6% et 9.9% à 28 jours et de 5.7% et 9.9% à 90 jours, par rapport au BAP témoin. La VPU est une fonction de la porosité et elle diminue avec l'augmentation de la porosité.

D'autre part, les résultats des essais de la VPU exécutés sur des échantillons de BAPR1 et BAPR2 et différents pourcentages d'addition de FART (0.3%, 0.5% et 0.8%) sont présentés également dans les figures 4.13 et 4.14. L'ajout et l'augmentation de pourcentages des FART augmentent la VPU et tous les BAPR et renforcés présentent des vitesses supérieures que celles des BAPR, aussi la VPU améliore avec l'âge de durcissement. L'introduction de fibres d'acier dans la matrice du béton diminue la porosité de BAPR, ce qui a pour conséquence d'augmenter la vitesse de pulsation ultrasonique. L'existence de fibres d'acier de dimensions non uniformes, déformées et réparties de façon aléatoire a un effet positif sur la mesure de la VPU pour tous les échantillons à base de GR seulement, à 28 et 90 jours. On peut observer que la VPU du mélange 0.8BAPR2L15 est supérieure de 2% et 3.82% à celle du BAPR2 à l'âge de 28 et 90 jours, respectivement. Cette amélioration est attribuée à la forme et à la taille des fibres d'acier qui améliorent leur ancrage et leur adhésion avec la matrice du béton, engendrant, ainsi, une homogénéité et réduisant la porosité [240].

Dans le même contexte, Simalti et Singh [116] ont relevé, eux aussi, une augmentation de la VPU des BAP renforcés de 0.5%, 1% et 1.5% de FAR. Ils ont noté que le mélange de BAP renforcé par 0.5% de fibres a enregistré une valeur de 4201 m/s à 90 jours.

Les figures 4.13 et 4.14 montrent aussi l'effet de laitier sur la vitesse de pulsation ultrasonique des BAPR renforcés. La variation de la VPU montre la même tendance que celle de la résistance à la compression et le module d'élasticité. Pour une substitution par 15% et 25% de laitier, la variation est supérieure par rapport à celles des échantillons de BAPR. Par exemple, pour les échantillons 0.8BAPR2L15 et 0.8BAPR2L25, on observe une augmentation de 2% et 0.78% de la VPU par rapport au BAPR2 à 28 jours. Cependant, lorsque le temps de cure augmente (90 jours), les deux échantillons enregistrent une augmentation de 3.82% et 2.69% de la VPU qui est due à l'effet de remplissage des pores par du laitier, à long terme.

La relation entre la résistance à la compression, le module d'élasticité et la vitesse de pulsation ultrasonique à 90 jours est illustrée dans la figure 4.15. On observe une augmentation du module d'élasticité et de la vitesse de pulsation avec l'augmentation de la résistance à la compression. Les coefficients de corrélations sont 0.726 et 0.778, respectivement.

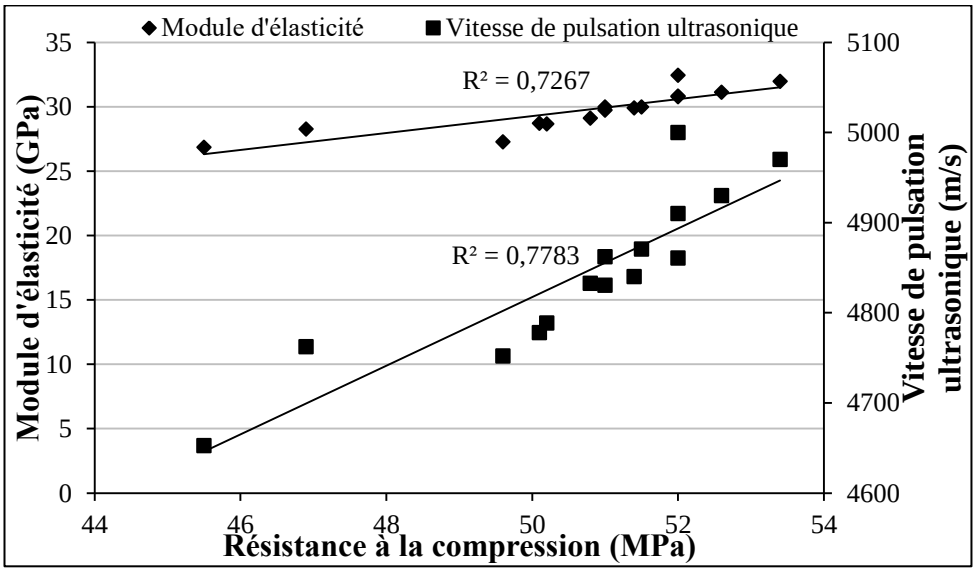


Figure 4. 15 : Corrélation entre la résistance à la compression, le module d'élasticité et la vitesse d'impulsion ultrasonique à 90 jours.

4.4.5 Retrait total

Les résultats du retrait total durant 180 jours sont présentés dans les figures 4.16 et 4.17. Il a été révélé qu'avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés, le retrait total augmente. Le remplacement de 50% et 100% de GGR provoque une augmentation du retrait de 47% et 62%, respectivement par rapport au BAP de référence. La contrainte appliquée par le granulat dépend principalement de la porosité du béton et du module élastique du granulat [241]. La porosité des granulats recyclés, résultant de l'ancienne pâte de ciment qui y est liée, rend le béton poreux, d'où une réduction du module élastique, d'une part et favorise ainsi que la diffusion et l'évaporation facile de l'eau, d'autre part [241]. La contrainte de retrait dépend du taux maximum en eau libre dans les pores capillaires qui se propagent en raison de la faible humidité ambiante. Dans ce cas, il se produit un degré d'humidité qui facilite le transport des particules d'eau du silicate de calcium (C-S-H) vers les pores capillaires qui se dispersent par la suite [219]. D'autres études ont montré une augmentation du retrait lorsque les granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés [16, 220, 242, 243].

En outre, l'effet de la teneur en fibres recyclées traitées est illustré sur les mêmes figures. Le retrait des BAP à base de granulats et fibres recyclées traitées diminue avec l'augmentation du taux de fibres jusqu'à 0.8%. On peut remarquer dans les figures 4.16 et 4.17 que les fibres d'acier influent positivement sur le retrait des BAPR. L'effet bénéfique des fibres recyclées peut améliorer l'influence défavorable causée par les granulats recyclés sur le retrait. Le mélange 0.8BAPR2L15 présente une réduction de 26.5%, par rapport au mélange BAPR2, étant donné que les fibres d'acier limitent la dispersion et la propagation des fissures en réduisant l'effet négatif des granulats recyclés sur le retrait [219]. Selon Younis et al. [244], l'incorporation de fibres d'acier récupérées à partir de déchets de pneus peut diminuer les fissures et la porosité dans la matrice des BAP, réduisant ainsi les déformations de retrait et augmentant la résistance aux fissures.

Également, Bensaci et al. [137] ont révélé que le retrait est réduit avec l'augmentation du pourcentage de fibres recyclées de 0% à 1.5%, les auteurs ont justifié cette réduction par le mouvement lent du squelette attribué à l'évaporation d'eau ou à la microstructure et cela est dû à la présence de fibres d'acier. La même tendance a été enregistrée dans une étude antérieure [245], où 0.25%, 0.5% et 0.75% de fibres d'acier à extrémités crochets a présenté un retrait minimum à celui du BAP témoin sans fibres.

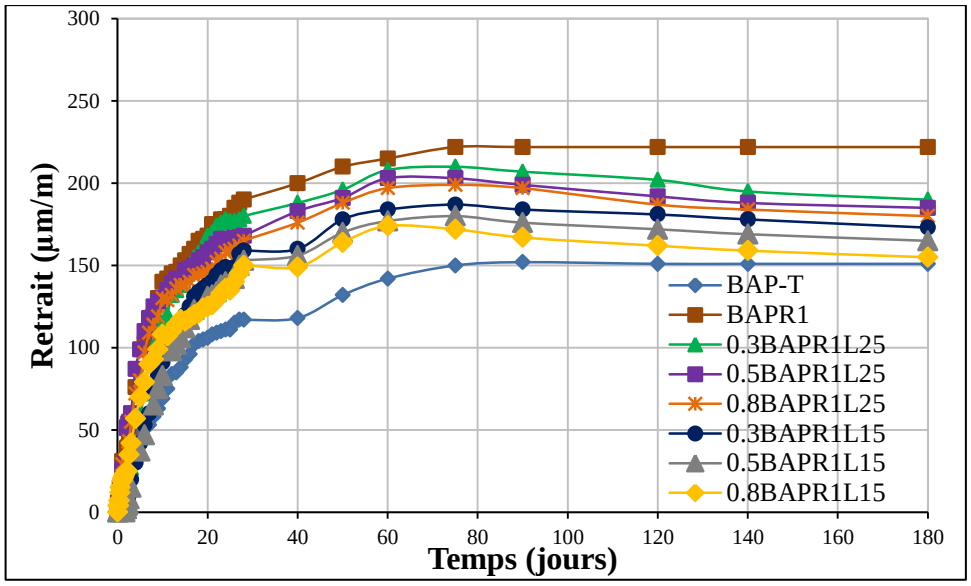


Figure 4. 16 : Retrait total des BAPR1.

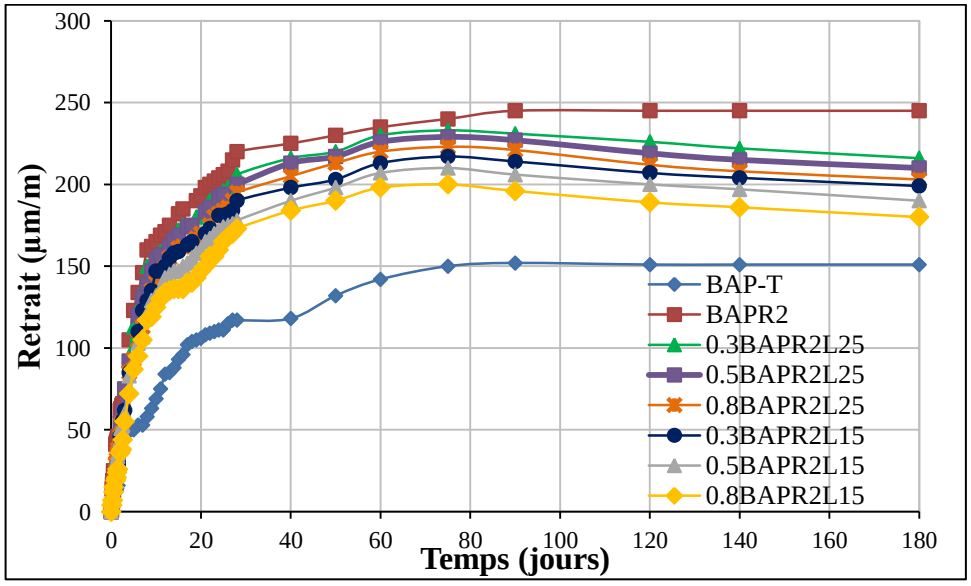


Figure 4. 17 : Retrait total des BAPR2.

D'autre part, il faut noter qu'une diminution considérable de retrait est observée pour les mélanges de BAP substitués par 15% et 25% de laitier par rapport aux BAPR sans laitier (figures 4.16 et 4.17). Le retrait du mélange 0.8BAPR2L15 et 0.8BAPR2L25 diminue de 26.5% et 17.1%, par rapport à BAPR2, respectivement. Cela indique que l'utilisation d'une combinaison de granulats recyclés, de fibres recyclées et de laitier

améliore de manière significative la résistance aux déformations dues au retrait. La réduction de la déformation de retrait des BAP est attribuée à la capacité du laitier d'augmenter le développement des C-S-H à long terme, donnant ainsi un béton dense avec une porosité minimale, empêchant l'évaporation d'eau [246].

Les résultats sont en accord avec ceux d'une recherche précédente [247], où la contrainte minimum du retrait de séchage est inférieure de 15% à 448 jours par rapport au béton de référence, laquelle contrainte est obtenue avec 1% de fibres d'acier industrielles ajoutées et 30% de ciment remplacé par du laitier dans un béton de haute performance à base de 50% et 100% de gros granulats recyclés. Cette diminution du retrait de séchage est attribuée aux fibres qui peuvent arrêter la propagation des fissures produites par le retrait dû au séchage et à la densification de la microstructure par le laitier, entraînant ainsi une dessiccation plus faible qui conduit à moins de déformations.

De même, Ahmed et al. [246] ont reporté que le retrait de séchage augmente avec l'augmentation de pourcentage de substitution de GGR de 20%, 40% et 60%. Lorsque le laitier est ajouté au béton de GR de 10%, 20% et 30%, le retrait a considérablement diminué et l'addition des fibres d'acier a diminué plus le retrait. Car la réaction pouzzolanique du laitier se développe lentement par rapport à l'hydratation du ciment, ce qui se traduit par une chaleur d'hydratation plus faible résultant de moins de déformations.

Selon une étude antérieure [219] sur le béton de haute performance contenant 50% et 100% de GGR, il a été noté que l'échantillon de 100% de GGR présente le retrait de séchage maximum. Par contre, la substitution de 25% de laitier et l'ajout de 2% de fibres d'acier à extrémités crochets ont réduit les contraintes de retrait du béton recyclé jusqu'à 12% et 16%, respectivement, par rapport au béton témoin.

Huynh et al. [84] ont montré que l'ajout de 35% de laitier dans un béton a diminué le retrait de séchage de 10.5% à celui du mélange de référence à 40 jours. L'ajout de laitier a réduit le retrait de séchage parce que sa réaction chimique se produit plus lentement que celle du ciment et parce qu'une partie de ses particules n'ayant pas réagi agit comme un micro-agrégat pour réduire le retrait de séchage. De plus, le laitier retient mieux l'humidité, ce qui réduit également le retrait de séchage.

4.4.6 Porosité accessible à l'eau

Le tableau 4.2 présente les valeurs de la porosité accessible à l'eau des BAPR à l'âge de 90 jours de cure. Selon ces valeurs, il est évident que le remplacement et l'augmentation de la teneur en GGR augmentent la porosité des BAPR. La porosité des mélanges BAPR1 et BAPR2 est supérieure de 36% et 72%, respectivement, par rapport au BAP-T. L'augmentation de la porosité accessible à l'eau des BAPR par rapport au BAP témoin est relative à la nature du granulat recyclé, qui est plus poreux que le granulat naturel, à cause de l'ancien mortier attaché.

Les résultats de Sasanipour et Aslani [248] confirment également que la substitution par des granulats recyclés a augmenté les vides perméables dans le BAP, en effet, lorsqu'ils ont augmenté le pourcentage en GGR de 50% à 100%, la porosité a augmenté de 13.9% à 18.8% par rapport au BAP témoin. Ils ont aussi conclu que le remplacement par 25% de FGR a augmenté la porosité de 18.05% par rapport au BAP de contrôle.

Au contraire, l'ajout et l'augmentation des différents pourcentages de FART réduit la porosité des BAPR, comme il est illustré dans le tableau 4.2. La porosité des mélanges de BAP à base de 50% et 100% de granulats recyclés et renforcés par 0.3%, 0.5% et 0.8% de FART diminue. Par exemple, la porosité du mélange BAPR2 diminue de 20.83%, 33.02% et 27.90% avec l'utilisation de 0.3%, 0.5% et 0.8% de fibres, respectivement. Cette amélioration est attribuée à la capacité des fibres d'améliorer la cohésion entre les ingrédients de la matrice cimentaire et les fibres, réduisant ainsi la porosité [249].

Alsaif et al. [250] ont rapporté que l'inclusion de 40 kg/m³ de fibres d'acier hybrides (industrielles et recyclées) peuvent réduire la porosité du béton jusqu'à 16.67%, car elles peuvent créer un réseau de pores plus complexes et déconnectés. De plus, les fibres d'acier aident la pâte de ciment qui les entoure à mieux s'hydrater et à bien remplir l'espace entre la fibre et la matrice, diminuant ainsi la porosité. Siddique et al. [251] ont aussi confirmé que l'incorporation de fibres d'acier n'a aucune influence négative sur la porosité des BAP.

Tableau 4. 2 : Porosité et perméabilité à l'eau des BAP.

Mélange	**Porosité (%)**	**Profondeur de pénétration de l'eau (mm)**
BAP-T	12.5	14.4
BAPR1	17	21.2
0.3BAPR1L15	13.4	16.7
0.5BAPR1L15	12.6	15.5
0.8BAPR1L15	12.8	15.9
0.3BAPR1L25	14.2	18.7
0.5BAPR1L25	12.9	17.5
0.8BAPR1L25	13.4	18.2
BAPR2	21.5	23
0.3BAPR2L15	17.02	19.2
0.5BAPR2L15	14.4	17.7
0.8BAPR2L15	15.5	18.3
0.3BAPR2L25	17.7	21.2
0.5BAPR2L25	15.3	19.7
0.8BAPR2L25	15.9	20.4

D'un autre côté, nous pouvons constater que les mélanges de BAPR à base de 15% et 25% de laitier ont montré une porosité minimale par rapport à celle des mélanges de BAPR, comme il est montré dans la résistance à la compression. Si on compare les valeurs

de la porosité des mélanges 0.8BAPR2L15 et 0.8BAPR2L25, on remarque une diminution de 27.90% et 26.04% par rapport au BAPR2 sans laitier. La diminution de la porosité est due à l'effet de remplissage du laitier et à l'affinement de la structure des pores des mélanges des BAP. Pendant la réaction pouzzolanique, un double effet de remplissage et d'amélioration de la réactivité pouzzolanique pourrait être obtenu avec les ajouts riches en silice [252]. En outre, avec la progression de l'hydratation du ciment, le laitier peut réagir avec le $Ca(OH)_2$ libéré par l'hydratation du ciment et produire des C-S-H supplémentaires ayant des propriétés liantes, donnant une dense microstructure [84]. Les résultats de cette étude sont en accord avec les résultats de Vittalaiah [87].

D'après Bachene et al. [77], lorsque le sable naturel est remplacé par du sable recyclé, une augmentation de la porosité du MAP de 14.9% est équivalente à l'augmentation de la porosité granulaire. Selon les chercheurs, l'utilisation de laitier d'une finesse supérieure à celle du ciment s'est révélée très importante dans les mortiers à base de sable recyclé pour améliorer leur porosité. L'incorporation de 20% et 40% de laitier améliore la porosité produite par l'utilisation de 75% et 100% de sable recyclé à 56 jours. Ceci est justifié par l'incorporation de laitier dans les composites cimentaires qui modifie le squelette granulaire du mélange en compensant le manque de particules fines; la matrice cimentaire devient plus dense en comblant une partie des vides. En plus de cet effet de remplissage, la réactivité à long terme du laitier produit de nouveaux hydrates qui participeront à une densification supplémentaire de la matrice et à une réduction de la porosité.

Gao et al. [83] ont montré que la porosité des échantillons remplacés par 100% de GGR et 30% de laitier est réduite de 19.3% par rapport au béton recyclé sans laitier. L'affinement de la structure des pores a résulté de l'effet filler et de l'effet pouzzolanique du laitier. Les particules fines remplissent les vides entre les particules de ciment, ce qui conduit à une structure initiale plus dense. En outre, le gel C-S-H supplémentaire résultant de l'effet pouzzolanique remplit les pores entre les pâtes de ciment, améliorant ainsi la structure du béton recyclé. Par conséquent, le laitier a contribué à réduire les pores liés aux zones de transition interfaciale des bétons recyclés. Par ailleurs, Boubakeur et al. [212] ont affirmé que l'addition de 15% de laitier a un effet bénéfique sur la porosité des BAP à base de 50% FGR et de 100% GGR. La porosité du BAPR a diminué de 24% car le laitier remplit les pores du mortier attaché aux granulats recyclés et de la ZTI du mélange recyclé.

4.4.7 Absorption d'eau capillaire

L'absorption capillaire est la capacité du béton à absorber et transporter l'eau par succion capillaire. Les figures 4.18 et 4.19 illustrent l'évolution de l'absorption d'eau capillaire (I) en fonction de la teneur en gros granulats de béton démoli, en fibres recyclées et en laitier; tenant compte de la lente hydratation du laitier, l'essai de l'absorption capillaire a été effectué à 90 jours.

On peut constater à partir des figures 4.18 et 4.19 que le coefficient d'absorption d'eau capillaire des BAPR est supérieur à celui du BAP préparé avec des granulats naturels. Les granulats recyclés rendant les BAP plus sensibles à l'absorption capillaire. Cette augmentation est associée à la microstructure des nouvelles et anciennes ZTI du béton recyclé, à l'augmentation du volume des pores et à l'existence de microfissures liées au processus de production des granulats recyclés [253]. De plus, le coefficient d'absorption d'eau des GR est plus important par rapport à celui des GN. Ces résultats sont en accord avec ceux montrés dans la littérature [254], selon lesquels l'utilisation de 100% de GGR dans un BAP a augmenté le coefficient d'absorption d'eau capillaire de 20% à 72 heures par rapport à celui des BAP avec des GN.

Selon les figures 4.18 et 4.19, l'ajout de toutes les fractions volumiques de FART améliorent la résistance à l'absorption capillaire des BAPR. Par exemple, l'ajout de 0.3%, 0.5% et 0.8% de FART aux mélanges de BAPR de 100% de GGR et 15% de laitier entraîne une diminution significative du coefficient d'absorption de 28.76%, 36.69% et 31.77%, respectivement, par rapport au BAPR de 100% de granulats recyclés non fibré. El-Hassan et al. [255] ont signalé une diminution de l'absorption capillaire d'eau du béton géopolymére due à l'ajout de 1% et 2% de fibres d'acier. Ils ont attribué ce comportement à la capacité des fibres d'acier de réduire les microfissures et de discontinuer les pores capillaires, conduisant à une faible perméabilité du béton.

Selon la littérature antérieure, Bensaci et al. [194] ont conclu que la fibre d'acier arrête la formation des fissures de retrait, ainsi, l'eau ne peut pas pénétrer facilement. Une tendance similaire a été révélée par Frazão et al. [256]. De plus, nos observations sont en accord avec une étude précédente [257] sur le béton, dans lequel l'incorporation et l'augmentation de pourcentages de fibres d'acier de 1% et 2% a entraîné une discontinuité des pores capillaires qui a, elle, réduit l'absorption capillaire des bétons avec 50% et 100% de gros granulats de déchets de démolition.

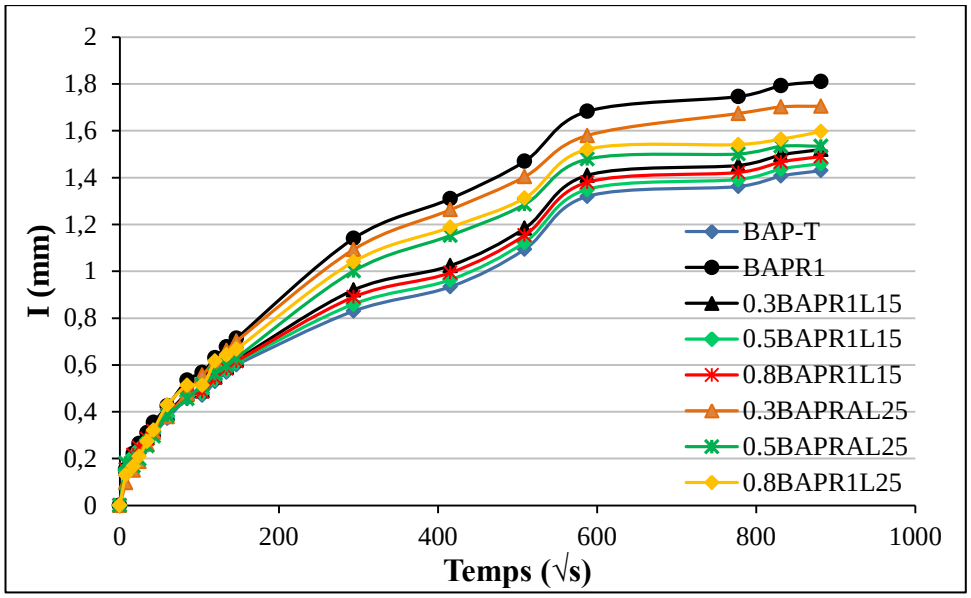


Figure 4. 18 : Absorption d'eau par capillarité des BAPR1.

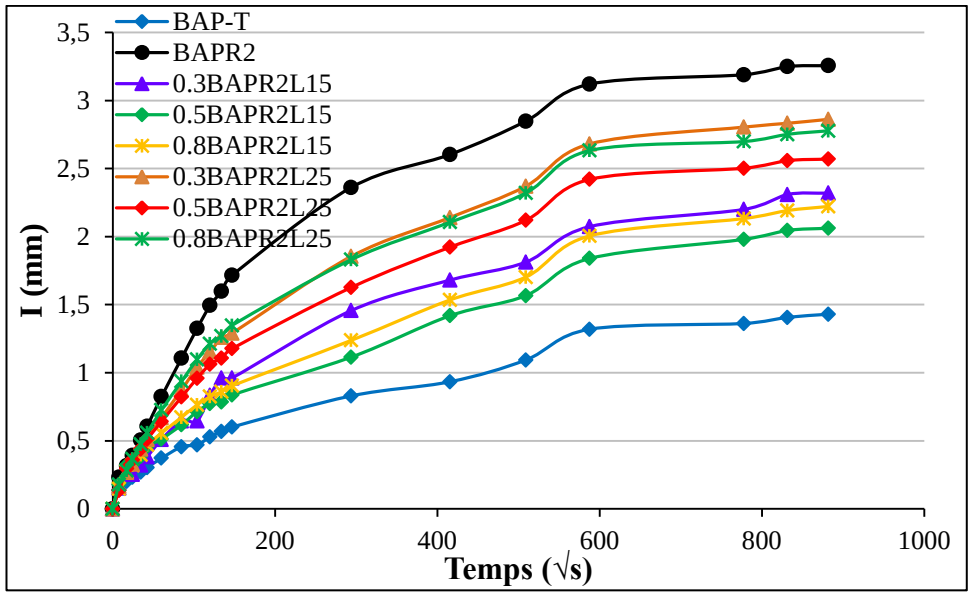


Figure 4. 19 : Absorption d'eau par capillarité des BAPR2.

Les figures 4.18 et 4.19 montrent aussi que l'absorption d'eau par capillarité des échantillons de BAPR de 15% et 25% de laitier est inférieure à celles des BAPR. À titre d'exemple, si on compare le coefficient d'absorption capillaire du BAPR2, on observe une diminution de 31.77% et 14.70% dans les mélanges 0.5BAPR2L15 et 0.5BAPR2L25. La diminution de l'absorption d'eau des bétons à base de GR est attribuée à la capacité du laitier de remplir les vides dans les granulats recyclés, grâce à sa réaction pouzzolanique, le

laitier pouvant produire un liant plus fluide entourant le granulat, ce qui diminue la porosité et réduit l'absorption d'eau [246].

Kouider Djelloul et al. [42] ont constaté que l'incorporation de 15% et 30% de laitier dans un BAP à base de 100% de GR a diminué le coefficient d'absorption par capillarité de 20.23% et 13%. Cette amélioration est expliquée par la structure des pores plus raffinée du BAP à base de laitier par rapport au BAP sans laitier.

Conformément à une étude [77], les valeurs de l'absorption par capillarité du MAP à base de 25% de FGR sont très proches de celles du mortier témoin; mais au-delà, l'absorption augmente avec l'augmentation du taux de FGR. En outre, l'utilisation de laitier à un taux de 20% réduit l'absorption capillaire de 14%, et pour une teneur de laitier de 40%, les valeurs de capillarité ne varient pas trop par rapport à celle de 20%. Ceci est dû à la présence du laitier qui permet de densifier la microstructure lors des réactions pouzzolaniques, ce qui réduit le volume des pores capillaires et à leurs discontinuités conduisant à une amélioration de la résistance à l'absorption [77, 89].

D'autre part, Yahiaoui [197] a indiqué que la quantité totale d'eau absorbée est plus grande dans le BAP non substitué par du laitier, mais, que le coefficient d'absorption d'eau par capillarité a diminué pour les deux pourcentages de laitier (15% et 25%) durant tous les âges de cure. Le faible coefficient d'absorption obtenu est celui de 25% de laitier, après 28 jours de cure humide, et il est inférieur de 59% par rapport au BAP sans laitier.

Selon Huynh et al. [84], l'absorption par capillarité durant 24 heures du béton à base de GN et de 35% de laitier est diminuée de 29% à 90 jours, par rapport à celui sans laitier. Cette réduction a été expliquée par la réduction de la porosité due au mécanisme de remplissage et à la réactivité pouzzolanique du laitier, et aussi par la structure dense des produits formés (C-S-H) durant de la réaction pouzzolanique.

Rahim et al. [85] ont montré que l'utilisation de 20% de laitier en remplacement partiel du ciment dans un béton de haute performance (BHP), de rapport E/C de 0.27, a réduit l'absorption d'eau capillaire par rapport au BHP sans substitution. Cela a été attribué à l'effet filler du laitier, qui augmente la complexité du réseau de pores et rend donc le transfert de l'eau plus difficile. L'activité pouzzolanique du laitier réduit la vitesse d'absorption d'eau en améliorant la structure poreuse, car la surface des vides capillaires est couverte par les C-S-H.

D’autre part, Ali Boucetta et al. [90] ont remarqué que la pente du BAP de 60% du laitier est inférieure à celle du mélange de contrôle. Ceci a été justifié par l'existence de plusieurs familles de pores, dès que la remontée capillaire est terminée dans les pores capillaires les plus grands, l'absorption se poursuit dans les pores les plus fins. Par conséquent, la cinétique d'absorption de ces bétons est ralentie, ce qui explique la diminution de la pente.

4.4.8 Pénétration de l’eau

Le tableau 4.2 représente les résultats expérimentaux de la résistance à la pénétration de l’eau à 90 jours. Une augmentation de la profondeur de la pénétration de l’eau est attribuée à la substitution et à l’augmentation de la teneur en GGR. Le remplacement de granulats naturels par des granulats recyclés a réduit la résistance à la pénétration d’eau des BAP, ce qui est en accord avec la littérature précédente [258, 259]. Les résultats ont montré une augmentation de la profondeur de pénétration des mélanges BAPR1 et BAPR2 de 47.22% et 59.72% par rapport au BAP-T, qui est attribuée initialement à la quantité de mortier poreux collé au granulat recyclé qui permet de fournir un canal perméable pour le transport de l’eau à travers la matrice du béton [260].

D’autre part, l'incorporation des fibres d'acier a un effet favorable sur la résistance à la pénétration d’eau [261]. Il est clair dans le tableau 4.2 que l’inclusion et l’augmentation de taux des fibres d’acier recyclées traitées et la présence de laitier améliorent la résistance à la pénétration d’eau des BAPR. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la pénétration d’eau sous pression des mélanges de BAPR fibrés et contenant du laitier de l’ordre 14.15% à 26.89% et de 7.83% à 23.04%, respectivement, par rapport aux BAPR1 et BAPR2. L’amélioration de la résistance à la perméabilité de l’eau s’explique par le comportement de pontage de fissures des fibres d’acier recyclées traitées et par l’affinement de la microstructure de la pâte de ciment poreuse par les produits d'hydratation secondaire obtenue par le laitier à long terme, donc, les pores sont moins interconnectés et moins accessibles [262].

Riaa et al. [195] ont signalé une diminution de 47.6% lors de l’inclusion de 0.5% de fibres d’acier ondulées dans un BAP à base de granulats naturels. De même, Kaplan et al. [263] ont réduit la profondeur de pénétration d’eau en ajoutant 0% à 2% de fibres d’acier droites dans un MAP de granulats légers, ils ont signalé que les fibres d’acier peuvent réduire les pores interconnectés, bloquant ainsi les chemins d’eau possibles.

D’après Jain et al. [92], l’utilisation de 22.5% de laitier a relativement réduit la profondeur de pénétration d’eau du béton témoin à base de 100% de GN, de 60 mm à 45 mm, à 90 jours, en raison de l’effet filler du laitier qui a contribué à la production de plus de gel C-S-H et à densifier la structure poreuse dans le béton.

L’étude de Yahioui et al. [73] a confirmé l’effet positif du laitier sur la résistance à la pénétration d’eau du BAP. À 90 jours, les BAP à 15% et 30% de laitier ont montré une diminution de la profondeur de pénétration de l'eau d'environ 14.41% et 23.37%, respectivement, par rapport à ceux sans laitier. Ceci a été attribué à l'effet positif du laitier à long terme, ce qui entraîne une diminution de la structure et de la taille des pores et donc une diminution de la perméabilité des mélanges contenant du laitier. D’autre part, Kouider Djelloul et al. [42] ont constaté une diminution de la profondeur de pénétration pour les mélanges de 15% et 30% de laitier de 42.40% et de 19.80%, à 90 jours, respectivement, par rapport aux ceux sans laitier.

Güneyisi et al. [91] ont conclu que l’augmentation du taux de substitution du laitier de 20%, 40% et 60% diminue la profondeur de pénétration de l’eau dans les BAP de 35%, 48% et 42%, respectivement, par rapport au BAP de contrôle. Cela a été attribué à la zone interfaciale moins poreuse et à la structure poreuse raffinée dans la matrice des BAP de laitier.

Dans le même contexte, Abu-Bakr et al. [264] ont noté que la substitution par du métakaolin et l’augmentation du pourcentage en fibres métalliques industrielles a réduit la pénétration d’eau de béton. La perméabilité du mélange à base de 20% de métakaolin et 60 kg/m^3 de fibres a diminué jusqu’à 79.9% à 90 jours. Selon Öz et al. [265], la substitution de cendres volantes, de l’ordre de 0% à 20% et l’augmentation de différentes fractions volumiques de fibres ajoutées de 0% à 2% avec un incrément de 0.5%, n’ont aucune influence sur la profondeur de pénétration.

La figure 4.20 représente les valeurs expérimentales de la porosité accessible à l’eau et de la profondeur de pénétration de l’eau en fonction de la résistance à la compression à l’âge de 90 jours. Une corrélation linéaire est proposée entre les paramètres des BAPR avec GR, FART et laitier, avec des coefficients de corrélation R de 0.803 et 0.708 respectivement, montrant une diminution de la porosité et de la profondeur de perméabilité avec l’augmentation de la résistance à la compression.

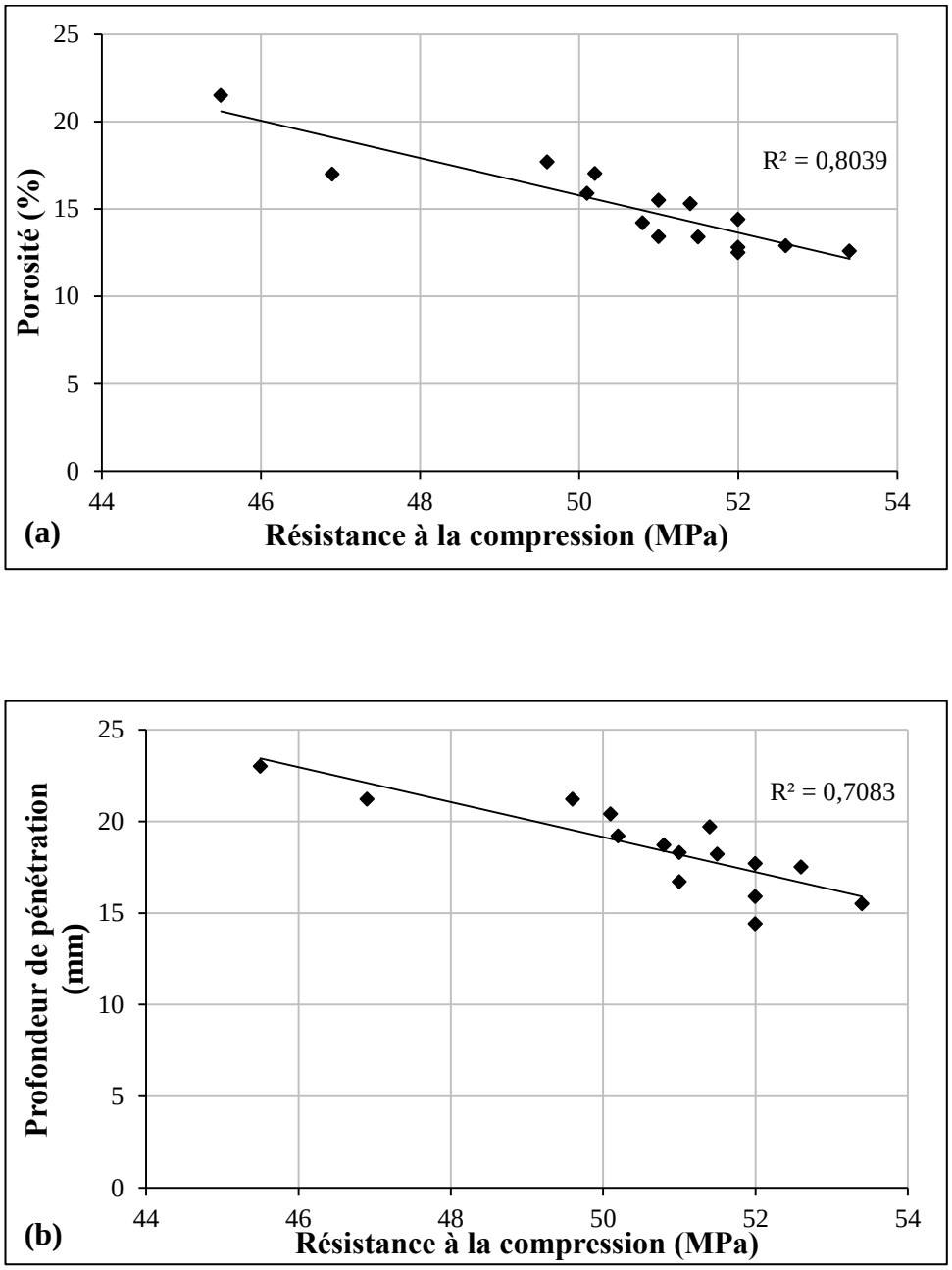


Figure 4. 20 : Corrélation entre : (a) la porosité accessible à l'eau et la résistance à la compression à 90 jours, (b) la profondeur de pénétration de l'eau et la résistance à la compression à 90 jours.

4.4.9 Pénétration aux ions de chlorure

La résistance aux ions de chlorure des BAP a été réalisée après 90 jours de cure humide. La figure 4.21 résume les résultats de la charge totale passante dans les mélanges de BAP. Une tendance décroissante de la résistance aux ions de chlorure est observée dans les BAPR lorsqu'on remplace les granulats naturels par des granulats recyclés. Les résultats montrent que plus la teneur en GGR est importante, plus les valeurs de la charge totale passante augmentent. Le remplacement de 50% et 100% de GGR augmente la charge passante de 22.64% et 34.16%, respectivement, par rapport au BAP témoin. En effet, la présence de l'ancien mortier sur les granulats recyclés augmente le nombre de ZTI et les pores, ce qui accroît l'absorption d'eau et favorise le mouvement des charges électriques, l'eau étant un élément conducteur [266]. La même tendance a été trouvée par Sasanipour et Aslani [238].

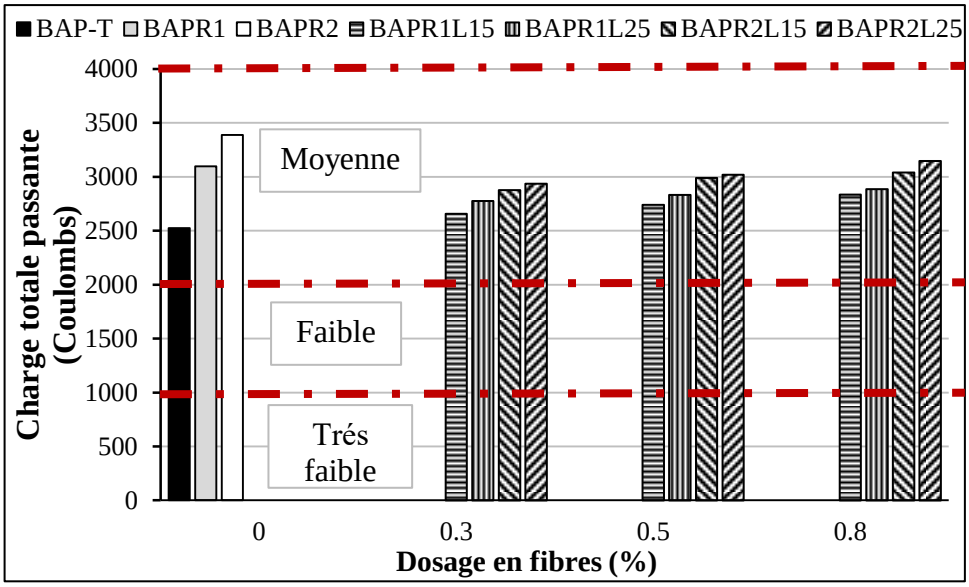


Figure 4. 21 : Résistance aux ions de chlorure.

En outre, la même tendance (figure 4.21) que pour les granulats recyclés est remarquée lors de l'ajout de FART, à cause de leur conductivité électrique [116]. En augmentant le taux en fibres de 0.3% à 0.8% et en fixant la teneur en laitier à 15%, les valeurs de la charge totale passante sont augmentées dans les BAP de 50% et 100% de GGR. La charge totale passante a été enregistrée dans les mélanges 0.8BAPR115 et 0.8BAPR215 avec des valeurs supérieures de 12.31% et 20.42% à celle du BAP-T. On observe également

qu'indépendamment de la teneur en fibres, tous les mélanges ont montré une pénétration des ions chlorures modérée.

Selon Simalti et Singh [116], l'augmentation de la fraction volumique des fibres recyclées de pneus usés de 0.5% à 1.5%, dans un BAP de 100% de granulats naturels, augmente la charge passante totale de 22.98% à 251% à 90 jours, par rapport au BAP de référence. Mohseni et al. [267] ont enregistré une augmentation de 17% de la pénétration des ions chlorures dans des BAP à base de 100% de gros granulats recyclés et 0.5% de fibres à extrémités crochets, en raison de la présence des pores dans les GR et la grande conductivité des fibres d'acier.

Selon Simalti et Singh [116], l'augmentation de la fraction volumique des fibres recyclées de pneus usés de 0.5% à 1.5%, dans un BAP de 100% de granulats naturels, augmente la charge passante totale de 22.98% à 251% à 90 jours, par rapport au BAP de référence. Mohseni et al. [267] ont enregistré une augmentation de 17% de la pénétration des ions chlorures dans des BAP à base de 100% de gros granulats recyclés et 0.5% de fibres à extrémités crochets, en raison de la présence des pores dans les GR et la grande conductivité des fibres d'acier.

En revanche, on remarque dans la figure 4.21, que quel que soit le taux de remplacement du laitier dans la composition des BAPR de granulats et fibres recyclés, la perméabilité aux ions de chlorure reste toujours moyenne et inférieure à celle des BAPR sans laitier. Cette amélioration est due à la capacité de remplissage des vides par le laitier dans la structure poreuse des BAP à base de granulats de béton démolis. La présence du laitier retarde la réaction pouzzolanique pendant la période de cure initiale; à long terme la réaction pouzzolanique fixe la portlandite ($Ca(OH)_2$) libérée lors de l'hydratation et forme des C-S-H secondaires développant, ainsi, une microstructure plus dense et moins poreuse qui permet une diffusion plus faible dans le béton [268]. Par ailleurs, les ions de chlorure pénètrent dans le béton par diffusion à travers les pores discontinus et les pores capillaires et les aluminates tricalciques (C_3A) existant dans la composition du ciment peuvent réagir avec une partie de ces chlorures, formant des chlorures stables. En raison de la grande quantité d'alumine présente dans les ajouts cimentaires, la quantité de C_3A et celles des chlorures stables augmentent dans le mélange, ce qui va diminuer l'excès de chlorures libres et augmenter la résistance à la corrosion [269].

Comme il a été confirmé par Mohamed et al. [270], la substitution de 25% de ciment par du laitier a permis d'améliorer la résistance aux ions chlorures. De plus, la résistance aux ions de chlorure d'un béton ordinaire à base de 100% de granulats naturels a été testée à 180 jours par Prasanna et al. [271], les résultats ont montré que la charge passante totale a diminué de 5.46% à 180 jours, lors du remplacement de 20% de ciment par du laitier d'une finesse égale à 4250 cm^2/g.

D'autre part, une augmentation significative de la conductivité électrique jusqu'à 50% et 100%, dans un béton à haute résistance, a été observée par Ali et al. [272], en raison de l'incorporation de 0.5% et 1% de fibres d'acier de déchets de pneus, tandis que l'utilisation de 15% de cendres volantes a diminué cette conductivité de 32% et 38% et l'utilisation de 25% de cendres volantes de 38% et 45%.

Anastasiou et al. [273] ont remarqué une augmentation de la résistance aux ions de chlorure en mesurant la profondeur de pénétration des ions chlorures des BAP, lors de la substitution de 60 kg/m^3 à 120 kg/m^3 de ciment par du laitier dans des BAP renforcés par 0% à 0.7% de fibres d'acier industrielles. Ils ont expliqué cette amélioration par le fait que la matrice cimentaire du BAP contenant du laitier peut absorber les chlorures (Cl^-) et augmenter la résistance à la diffusion des ions.

Chen et al. [82] ont affirmé que l'utilisation de laitier dans les bétons de granulats recyclés a amélioré la résistance à la pénétration de chlorure mieux que celle des cendres volantes, en raison de sa composition chimique et de ses propriétés physiques qui sont plus uniformes que celles des cendres. La charge totale passante du béton recyclé contenant 50% de GGR est égale à 1480 Coulombs, et lors de l'incorporation de 15%, 30% et 50% de laitier, cette dernière est réduite à 950 Coulombs, 900 Coulombs et 850 Coulombs, respectivement. Cela a été interprété en trois mécanismes possibles : premièrement, les microfissures et les pores de GGR sont remplis de laitier dont la taille des particules est inférieure à celle du ciment; deuxièment, le gel C-S-H produit de la réaction pouzzolanique entre le laitier et le $Ca(OH)_2$ a également rempli les pores de GR; et enfin, l'effet de liaison du chlorure dû à la teneur élevée en alumine de laitier.

4.5 Microstructure

L'imagerie de MEB de l'interface fibre-matrice, l'empreinte et la texture de la surface des fibres d'acier recyclées traitées ont été examinées afin d'évaluer les caractéristiques

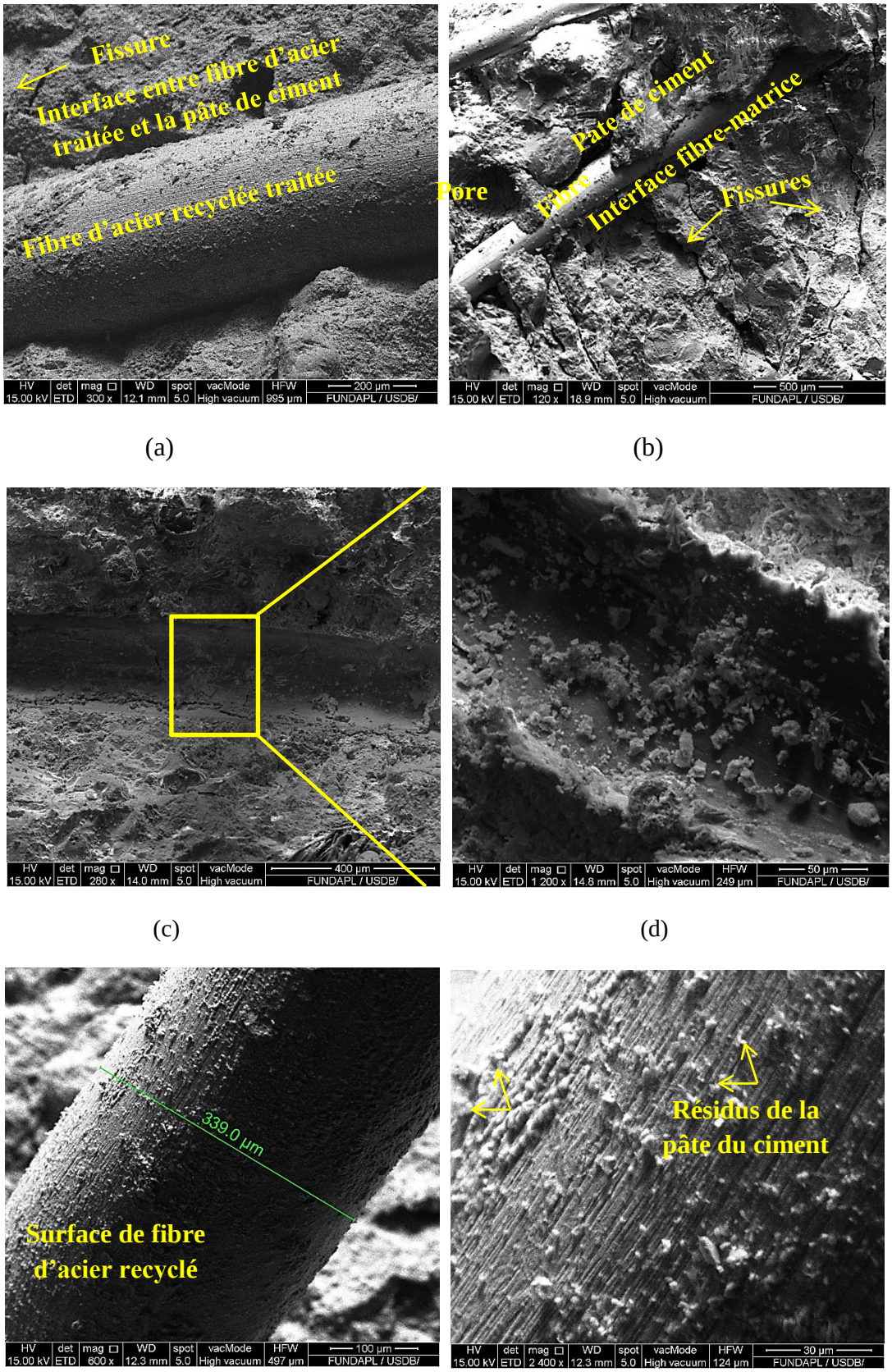
microstructurales du béton fibré. Les images de MEB des bétons autoplaçants recyclés et renforcés par des fibres d'acier de pneus usés sont présentées dans les figures 22 (a, b, c, d, e et f).

A partir des figures 22 (a) et 22 (b), on peut observer une très bonne liaison entre les fibres recyclées traitées et la pâte de ciment. La réaction d'hydratation des composites de ciment autour de la fibre d'acier traitées est suffisante et les surfaces des fibres d'acier recyclées traitées sont recouvertes de la pâte de ciment dense et hydratée. Par conséquent, l'interface fibre-matrice est homogène. Cela limite non seulement l'apparition des fissures, mais joue également un rôle important dans le pontage des fissures, améliorant, ainsi la résistance et la ténacité de la matrice du béton et diminuant le retrait [274].

La forte liaison de l'interface entre la matrice et les fibres d'acier permet aux éprouvettes examinées de résister à la rupture, qui améliore la capacité de post fissuration, ce qui conduit à une augmentation de la charge ultime et de la ductilité de l'échantillon. Par conséquent, les fibres d'acier peuvent retarder de manière significative l'extension des fissures ce qui diminue le retrait. Les fibres d'acier peuvent favoriser la réaction d'hydratation de la pâte environnante. La chaleur générée lors du processus d'hydratation peut être libérée dans l'air plus rapidement, aussi la taille des pores et les fissures dans la matrice diminuent-elles de manière significative [274]. Ces propriétés interfaciales améliorées ont un effet direct sur les caractéristiques de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion, ce qui est en accord avec les résultats des essais mécaniques déjà présentés.

En outre, les figures 22 (c) et 22 (d) montrent la trace (l'empreinte) de la fibre d'acier recyclée traitée qui a été retirée de l'échantillon. On peut voir que la surface de l'empreinte est rugueuse, ce qui indique une bonne liaison entre la fibre recyclée traitée et la matrice. D'autre part, on remarque que les images de MEB, dans les figures 22 (f) et 22 (g), de la surface des fibres recyclées traitées ne montrent pas d'impuretés résiduelles de caoutchouc, mais des résidus de la matrice cimentaire qui sont présents sur la surface de la fibre améliorant ainsi la liaison entre les fibres d'acier recyclées traitées et la matrice du béton.

Selon Köroğlu [275], si les particules de caoutchouc recouvrent les fibres d'acier recyclées, la liaison fibre-matrice sera faible et mauvaise, cette couverture mince maintient un espace à l'interface de la matrice d'acier et du béton, c'est pourquoi, la résistance à la compression diminue.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Figure 4. 22 : Images de MEB de la matrice de BAP fibré.

4.6 Conclusion

Basant les résultats expérimentaux obtenus dans cette recherche sur l'influence des fibres recyclées de pneus usés (FART) et du laitier sur la rhéologie, les propriétés mécaniques et la durabilité des BAPR avec différentes teneurs, les conclusions suivantes peuvent être déduites :

- L'ouvrabilité et la capacité de remplissage des BAPR frais diminuent avec l'augmentation de la teneur en GGR et de la fraction volumique des fibres, à cause de la présence de mortier adhéré aux GR et de la distribution aléatoire des fibres. Cependant, la substitution et l'augmentation du pourcentage en laitier améliorent l'ouvrabilité et la capacité de remplissage des BAPR. En revanche, l'utilisation et l'augmentation de la teneur en GR et en FART a une influence positive sur la viscosité et la résistance à la ségrégation des BAPR.
- Le remplacement des GR dégrade les performances mécaniques des BAPR. L'effet des fibres de pneus usés minimise la perte de la résistance à la compression due à l'utilisation des granulats de déchets de béton. L'utilisation de 0.5% et 0.8% de fibres montre une résistance à la compression comparable à celle du BAP de granulats naturels; de plus, l'utilisation de 100% de granulats recyclés et de 25% de laitier ne diminuent pas l'efficacité des fibres recyclées.
- Une relation proportionnelle de la résistance à la flexion est également révélée avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Par ailleurs, la capacité des fibres recyclées traitées à empêcher la propagation des fissures améliore le module d'élasticité des BAP.

- Les GR diminuent la VPU des BAPR, par contre, l'ajout de fibres d'acier recyclées traitées augmente la VPU. Les résultats de l'essai montrent que tous les BAP étudiés sont homogènes et d'excellente qualité, les VPU étant supérieures à 4500 m/s.

- Le remplacement des GN par des GR a entrainé une augmentation de la déformation de retrait total, tandis que l'incorporation des fibres recyclées traitées et la substitution du laitier dans les BAPR permettent de réduire les déformations de retrait libre jusqu'à 180 jours.

- La durabilité des BAP est dégradée lors du remplacement des GR. Les GR entrainent une augmentation de la porosité accessible à l'eau, de l'absorption d'eau par capillarité, de la profondeur de pénétration d'eau et de la charge passante totale.

- L'effet des fibres d'acier recyclées traitées et du laitier dans les BAPR améliore les performances de durabilité. Les fibres recyclées traitées peuvent ponter les fissures et discontinuer les pores capillaires, quant au laitier, il permet d'affiner les pores, ce qui influe positivement sur la durabilité des BAPR et réduit la porosité, l'absorption d'eau capillaire et la profondeur de pénétration d'eau.

- Les résultats d'essai de pénétration des ions de chlorure des BAPR montrent que l'augmentation de la teneur en fibres d'acier recyclées traitées affecte modérément la résistance aux ions, suite à leur conductivité thermique. Mais, grâce à l'effet de remplissage du laitier, la pénétration des ions dans les BAP reste dans la classe moyenne et inférieure à celle des BAP à base de GR seulement (sans fibre et sans laitier).

- L'examen des images de la microstructure des BAP renforcés confirme une meilleure liaison de l'interface entre les fibres recyclées traitées et la matrice qui fournit un effet positif sur les performances mécaniques et sur la durabilité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de la présente étude était de valoriser le maximum de granulats de déchets de béton dans la formulation du béton autoplaçant. A cet effet, nous avons étudié l'influence du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés, de l'ajout de fibres d'acier recyclées traitées et de la substitution du ciment par du laitier de haut fourneau, sur les performances fraîches, mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant, en incorporant des teneurs variables pour chacun des paramètres cités.

Les granulats naturels (GN), sable et graviers, ont été remplacés, dans la composition des BAP, par des granulats recyclés (GR) avec différents pourcentages. L'utilisation des fibres d'acier recyclées traitées (FART) en différentes fractions volumiques, dans la formulation du BAP à base de GR, a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques du béton autoplaçant de granulats recyclés (BAPR). Le ciment a été substitué par du laitier afin d'améliorer les propriétés rhéologiques et les propriétés de durabilité des BAPR. Le rapport E/C de 0.4 et la teneur en superplastifiant de 1.15% (en poids de ciment) sont constants dans tous les mélanges des BAP, afin de distinguer l'effet réel des GR, des FART et du laitier sur les propriétés des BAPR. Les propriétés rhéologiques, mécaniques, physiques et la durabilité, c'est-à-dire le diamètre d'étalement, le temps T50, le temps Tv et la résistance à la ségrégation; la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module d'élasticité; la vitesse de pulsation ultrasonique et le retrait total ; la porosité, l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité à l'eau et la diffusion des ions chlorures, respectivement, ont été étudiées. Sur la base de l'analyse des résultats expérimentaux, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Le dosage optimal du superplastifiant est de 1.15% du poids de ciment pour la formulation du BAP témoin.
- Tous les mélanges de BAPR présentent une ouvrabilité conforme aux limites exigées par l'ENFARC. La présence de 15% et 25% de laitier compense la chute de l'ouvrabilité des BAPR qui est due à la substitution des GN et l'ajout des FART; le laitier a donc un effet positif sur le temps T50 et le temps Tv.
- L'incorporation des GR et des FART améliore la viscosité et la résistance à la ségrégation des BAPR.

- Les recommandations européennes relatives à l'ouvrabilité du BAP sont satisfaisantes, jusqu'à 100% de GR, 0.8% de FART, 15% et 25% de laitier.
- Les GR diminuent la résistance à la compression et à la flexion ainsi que le module d'élasticité. Néanmoins, la présence des FART minimise effectivement l'impact négatif des GR engendrant des propriétés mécaniques comparables au BAP à base de GN.
- La substitution partielle du ciment par 15% et 25% de laitier conduit à une réduction non significative des propriétés mécaniques des BAPR fibrés à 28 jours. Toutefois, l'effet pouzzolanique du laitier à long terme (90 jours) aide les BAPR à rattraper la chute de ces propriétés observée à 28 jours.
- Quel que soit le taux des FART et de laitier, leur inclusion aide à améliorer la vitesse de pulsation ultrasonique et le retrait total des BAPR.
- L'effet synergique des FART et du laitier dans les BAPR permet de diminuer la porosité, l'absorption d'eau capillaire, la perméabilité à l'eau et la diffusion des ions chlorures.
- Les FART arrêtent la formation et la propagation de micro et macro-fissures comme observé dans les images au microscope à balayage montrant la bonne adhérence dans la zone de contact fibre-pâte.

En conclusion, l'analyse des résultats de ce programme expérimental nous permet d'affirmer que des BAP écologiques, économiques, performants et durables peuvent être conçus avec l'utilisation de 100% de GGR au lieu de granulats naturels et l'ajout jusqu'à de 0.8% de FART et de 25% de laitier en substitution au ciment. Les résultats de ce travail sont, également, une solution possible pour la confection des dalles de chaussées et les dalles industrielles qui résistent à la flexion.

PERSPECTIVES

Cette recherche a étudié l'influence de trois déchets, le béton démoli (GR), les pneumatiques (FART) et le laitier de haut fourneau, sur les performances fraîches et durcies des BAP. D'autres perspectives sont proposées pour compléter cette recherche telles que :

- Des observations microscopiques seraient utiles pour mieux étayer nos propositions sur la capacité du laitier de remplir les vides, à long terme.

- Une modélisation de la prévision des résultats.

RÉFÉRENCES

[1] Belkbir.H., "Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique," mémoire de DEUA, Université de Boumerdes, Algérie, (2011).

[2] Bensaci H., "Performance des bétons autoplaçants à base des déchets des pneus en caoutchouc et ajouts minéraux," *thèse de doctorat*, Université de Blida 1, Algérie, (2019).

[3] Bourmate.N., "Granulats recyclés de substitution pour béton hydraulique, " *thèse de doctorat*, Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie, (2017).

[4] Wu, P., Xia, B., & Zhao, X., "The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, (2014), 360–369. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.070

[5] Freedonia. World Construction Aggregates, in N° 2838, The Freedonia Group: Cleveland, OH, USA, 2012.

[6] Peng, C., "Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling," *Journal of Cleaner Production*, 112, (2016), 453–465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078

[7] Arabani, M., & Azarhoosh, A. R.. "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, 35, (2012) 1–7. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036

[8] Snežana B. Marinković, Ivan S. Ignjatović, Vlastimir S. Radonjanin, and M. M. M., "Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction," *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, Chapiter 7, (2012), 115-130. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1997-2

[9] Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P., "Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA," *Resources, Conservation and Recycling*, 109, (2016), 67–77. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009

[10] Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J., "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Construction and Building Materials*, 172, (2018), 272–292. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240

[11] Pepe, M., "Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications," University of Salerno, Italy, (2015).

[12] Zhang, H., Ji, T., Zeng, X., Yang, Z., Lin, X., & Liang, Y., "Mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) using recycled fine aggregate cured under different conditions and the mechanism based on integrated microstructural parameters," *Construction and Building Materials*, 192, (2018), 489–507. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.117

[13] Gao, D., Gu, Z., Pang, Y., & Yang, L., "Mechanical properties of recycled fine aggregate concrete incorporating different types of fibers," *Construction and Building Materials*, *298*, (2021), 123732. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123732

[14] Ma, J., Sun, D., Pang, Q., Sun, G., Hu, M., & Lu, T., "Potential of recycled concrete aggregate pretreated with waste cooking oil residue for hot mix asphalt," *Journal of Cleaner Production,* 221, (2019). 469–479. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.256

[15] Li, Z., Liu, J., Xiao, J., & Zhong, P., "A method to determine water absorption of recycled fine aggregate in paste for design and quality control of fresh mortar," *Construction and Building Materials,* 197, (2019), 30–41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.115

[16] Manzi, S., Mazzotti, C., & Bignozzi, M. C., "Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties," *Construction and Building Materials,* 157, (2017), 582–590. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129

[17] Akcay, B., "Aggregate restraining effect on autogenous shrinkage of cementitious materials," *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (8), (2018), 3102-3111. https://doi.org/10.1007/s12205-017-0635-5

[18] Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K., "Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review," *Construction and Building Materials,* 77, (2015), 327–339. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102

[19] Li, Z., Liu, J., Xiao, J., & Zhong, P., "Internal curing effect of saturated recycled fine aggregates in early-age mortar," *Cement and Concrete Composites,* 108, (2020), 103444. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103444

[20] ACI, "Self-consolidating concrete-237R-07," Vol. 30, Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 2007.

[21] EPG, (European Project Group), BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, "EFCA EFNARC - The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification - Production and Use," 2005, 63.

[22] Naik, T. R., Kumar, R., Ramme, B. W., & Canpolat, F., "Development of high-strength, economical self-consolidating concrete," *Construction and Building Materials,* 30, (2012), 463–469. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.025

[23] Topcu, I., & Kocataşkin, F., "A two-phase composite materials approach to the workability of concrete," Cement and Concrete Composites, 17(4), (1995), 319–325. https://doi.org/10.1016/0958-9465 (95)00026-9

[24] Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R., "Failure mechanism of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials,* 22(7), (2008), 1500–1506. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032

[25] Sfikas, I. P., Kanellopoulos, A., Trezos, K. G., & Petrou, M. F., "Durability of similar self-compacting concrete batches produced in two different EU laboratories," *Construction and Building Materials,* 40, (2013), 207–216. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.100

[26] Singh, R. B., & Singh, B., "Rheological behavior of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates," *Construction and Building Materials, 161,* (2018), 354–364. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.118

[27] González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., & Roussel, N., "Robustness of self-compacting recycled concrete: analysis of sensitivity parameters," *Materials and Structures,* 51(1), (2018), 1-10. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1136-1

[28] González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., & Seara-Paz, S., "Evaluation of self-compacting recycled concrete robustness by statistical approach," *Construction and Building Materials,* 176, (2018), 720–736. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.059

[29] Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., & Manso, J. M., "The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete," *Construction and Building Materials,* 182, (2018), 309–323. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132

[30] Kou, S. C., & Poon, C. S., "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates," *Cement and Concrete Composites, 31*(9), (2009), 622–627. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005

[31] Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Skaf, M., & Manso, J. M., "Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete," *Construction and Building Materials,* 263, (2020), 120671. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120671

[32] González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Eiras-López, J., & Rojo-López, G., "Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology," *Journal of Cleaner Production,* 156, (2017), 1–18. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.045

[33] González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., & Carro-López, D., "Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box," *Construction and*

Building Materials, *143*, (2017), 537–546. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.156

[34] Carro-López, D., González-Fonteboa, B., De Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., & Silva, P., "Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, 96, (2015), 491–501. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.091

[35] Tang, W. C., Ryan, P. C., Cui, H. Z., & Liao, W., "Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, (2016), 1-11. https://doi.org/10.1155/2016/2761294

[36] Pereira-De-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P., & Vila, M. F. C., "Permeability properties of self-Compacting concrete with coarse recycled aggregates," Construction and Building Materials, 51, (2014), 113–120. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061

[37] Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Salam, M. A., Jumaat, M. Z., Jaafar, F. F., & Saad, H. B., "Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate," *Materials Research*, 14(2), (2011), 248–255. https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000039

[38] Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M., & Ristic, N. S., "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, *24*(7), (2010), 1129–1133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029

[39] Campos, R. S., Barbosa, M. P., Pimentel, L. L., & Maciel, G. F., "Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete," *Revista Matéria*, *23*(1), (2018), 1-20. https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0300

[40] Kapoor, K., Singh, S. P., Singh, B., & Singh, P., "Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of-self compacting concrete," *Materials Today: Proceedings*, (2020). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.753

[41] Sasanipour, H., Aslani, F., & Taherinezhad, J., "Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, 227, (2019), 116598. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324

[42] Kouider Djelloul, O., Menadi, B., Wardeh, G., & Kenai, S., "Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag," *Advances in Concrete Construction*, *6*(2), (2018), 103–121. https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.103

[43] Sadek, D.M., & El-attar M.M., "Development of high-performance green concrete using demolition and industrial wastes for sustainable construction," Journal of American Science, *8*(4), (2012), 120–131.

[44] Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K., "Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate," *Materials and Design*, *53*, (2014), 983–991. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100

[45] Modani, P.O., & Mohitkar, V.M., "Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solution for sustainable development," *Int. J. Civil. Struct. Eng.*, 4 (3), (2014), 430–440. https://doi.org/10.6088/ijcser.201304010041

[46] Xiao, J., Li, W., Corr, D. J., & Shah, S. P., "Simulation Study on the Stress Distribution in Modeled Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), (2013), 504–518. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000598

[48] Gujel, D. A., Kazmierczak, C. S., & MASUERO, J. R., "Stress-strain curve of concretes with recycled concrete aggregates: analysis of the NBR 8522 methodology," *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 10(3), (2017), 547–567. https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000300002

[49] Zdiri, M., & Ben Ouezdou, M., "Mesure et estimation du module d'élasticité du BCR Cas du faible dosage en ciment, *Matériaux Sols et Structures*," (2007), 43–48.

[50] Bogas, J. A., & Gomes, A., "Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica-characterization and normalization," *International Journal of Civil Engineering*, *12*(2 A), (2014), 268–278.

[51] Gesoglu, M., Güneyisi, E., Öz, H. Ö., Taha, I., & Yasemin, M. T., "Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, *98*, (2015), 334–344. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.036

[52] Uygunoğlu, T., Topçu, I. B., & Çelik, A. G., "Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability," *Journal of Cleaner Production*, *84*(1), (2014), 691–700. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.019

[53] Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S., "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review," *Construction and Building Materials*, *68*, (2014), 501–516. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003

[54] Rajhans, P., Panda, S. K., & Nayak, S., "Sustainability on durability of self-compacting concrete from C&D waste by improving porosity and hydrated compounds: A microstructural investigation," *Construction and Building Materials*, *174*, (2018), 559–575. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.137

[55] Manzi, S., Mazzotti, ; C., & Bignozzi, M. C., "Preliminary Studies on the Effect of C&DW on the Long-Term Properties of Sustainable Self-Compacting Concrete," *CONCREEP*, 10, (2015),1554–1560.

[56] Pedro, D., de Brito, J., & Evangelista, L., "Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties," *Construction and Building Materials*, 154, (2017), 294–309. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215

[57] Yacoub, A., Djerbi, A., & Fen-Chong, T., "Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing," *Construction and Building Materials*, 158, (2018), 464–471. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.023

[58] Kapoor, K., Singh, S. P., & Singh, B., "Permeability of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6(5), (2017), 293–313. https://doi.org/10.1080/21650373.2017.1280426

[59] Paul, S. C., & Van Zijl P. A. G., "Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete," *Revista Materia*, 4(4), (2013), 89–103. https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1373

[60] Santos, S. A., Da Silva, P. R., & De Brito, J., "Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry," *Magazine of Concrete Research*, 71(24), (2019), 1265–1282. https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00225

[61] Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E. H., & Aït-Mokhtar, A., "Performance and durability of self-compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan," *Journal of Cleaner Production*, 165, (2017), 415–430. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.139

[62] Zhao, Y., Bi, J., Sun, Y., Wang, Z., Huo, L., & Duan, Y., "Synergetic effect of ground granulated blast-furnace slag and hooked-end steel fibers on various properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete," *Structural Concrete*, 23(1), (2022), 268–284. https://doi.org/10.1002/suco.202000722

[63] Siline, M., "Efficiency of incorporating Algerian ground granulated blast furnace slag as a supplementary cementitious material : a review," *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), (2022), 1–12. https://doi.org/10.1007/s41062-021-00720-9

[64] Meko, B., Ighalo, J. O., & Ofuyatan, O. M., "Enhancement of self-compactability of fresh self-compacting concrete : A review," *Cleaner Materials*, *1*(5), (2021), 100019. https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100019

[65] Alharthy, S. E., & Mostafa, M. A., "Mechanical and thermal charactristics of self-compacting concrete produced with blast furnace slag and fly ash," *HBRC Journal*, 16(1), (2020), 283–298. https://doi.org/10.1080/16874048.2020.1814188

[66] Islam, G. M. S., Akter, S., & Reza, T. B., "Sustainable high-performance, self-compacting concrete using ladle slag," *Cleaner Engineering and Technology*, 7, (2022), 100439. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100439

[67] Yön, M. S., Arslan, F., Karatas, M., & Benli, A., "High-temperature and abrasion resistance of self-compacting mortars incorporating binary and ternary blends of silica fume and slag," *Construction and Building Materials, 355* (6), (2022), 129244. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129244

[68] Al-Oran, A. A. A., Safiee, N. A., & Nasir, N. A. M., "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete using metakaolin and GGBS as cement replacement," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(1), (2019), 379–392. https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1663268

[69] Elsayed, M., Tayeh, B. A., Abu, Y. I., El-nasser, N. A., & Abou, M., "Case Studies in Construction Materials Shear strength of eco-friendly self-compacting concrete beams containing ground granulated blast furnace slag and fly ash as cement replacement," *Case Studies in Construction Materials, 17*(7), (2022), e01354. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01354

[70] Ofuyatan, O. O., Olowofoyeku, A. M., & Oluwafemi, J., "Performance of Self Compacting Concrete Incorporating Ground Granulated Blast furnace Slag and Metakaolin," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 640(1), (2019), 012060. https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012060

[71] Shahryari, L., Nafisinia, M., & Fattahi, M. H., "Investigation of Effects of Recycled Aggregates and Blast Furnace Slag on Properties of Self-Compacting Concrete," *NED University Journal of Research*, XVII(3), (2020), 1–14. https://doi.org/10.35453/nedjr-stmech-2018-0012

[72] Boukendakdji, O., Kadri, E. H., & Kenai, S., "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Composites*, *34*(4), (2011), 583–590. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013

[73] Yahiaoui, W., Kenai, S., Menadi, B., & Kadri, E., "Durability of self-compacted concrete containing slag in hot climate," *Advances in Concrete Construction, 3*, (2017), 271–288.

[74] Saleh Ahari, R., Kemal Erdem, T., & Ramyar, K., "Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete," *Construction and Building Materials*, 75, (2015), 89–98. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.014

[75] Hammat, S., Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., & Kadri, E. H., "Properties of self-compacting mortar containing slag with different finenesses," *Civil Engineering*

Journal (Iran), 7(5), (2021), 840–846. https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091694

[76] Vivek, S. S., "Performance of ternary blend SCC with ground granulated blast furnace slag and metakaolin," *Materials Today: Proceedings*, 49, (2021), 1337–1344. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.422

[77] Bachene, S., Adjoudj, M., Boukendakdji, O., & Ezziane, K., "Elaboration of a Self-Compacting mortar based on concrete demolition waste incorporating blast furnace slag," *Construction and Building Materials*, 366, (2023), 130165. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130165

[78] Naik, B., Chaubey, A. K., Mustakim, S. M., Paul, S., Barua, A., & Jeet, S., "Synthesis and characterization of ladle furnace slag on the mechanical properties of self-compacting concrete," *Materials Today: Proceedings*, (2022). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.265

[79] Bulut, H. A., & Şahin, R., "Radiological characteristics of Self-Compacting Concretes incorporating fly ash, silica fume, and slag," *Journal of Building Engineering*, 58, (2022), 104987. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104987

[80] Vivek, S. S., & Dhinakaran, G., "Fresh and hardened properties of binary blend high strength self-compacting concrete," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(3), (2017), 1173–1179. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.05.003

[81] Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E. H., & Rouis, F., "Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete," *Construction and Building Materials*, 23(7), (2009), 2593–2598. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.029

[82] Chen, C., Lu, C., Lu, C., Wei, S., Guo, Z., Zhou, Q., & Wang, W., "Synergetic effect of fly ash and ground-granulated blast slag on improving the chloride permeability and freeze–thaw resistance of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, 365, (2022), 130015. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130015

[83] Gao, S., Guo, X., Ban, S., Ma, Y., Yu, Q., Sui S., "Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of recycled concrete," *Construction and Building Materials*, *363*, (2023), 129736. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129736

[84] Huynh, T. P., Ho, L. S., & Ho, Q. Van., "Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag," *Construction and Building Materials*, 347, (2022), 128512. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128512

[85] Rahim, O., Achoura, D., Benzerara, M., & Bascoulès-Perlot, C., "Experimental contribution to the study of the physic-mechanical behavior and durability of high-performance concretes based on ternary binder (cement, silica fume and

granulated blast furnace slag)," *Frattura Ed Integrita Strutturale*, *16*(59), (2021), 344–358. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.23

[86] Karakurt, C., & Dumangöz, M., "Rheological and Durability Properties of Self-Compacting Concrete Produced Using Marble Dust and Blast Furnace Slag," *Materials*, *15*(5), (2022), 1795. https://doi.org/10.3390/ma15051795

[87] Vittalaiah, A., Ravinder, R., & Vivek Kumar, C., "Study on effect of strength and durability parameters and performance of Self Compacting Concrete replacement with GGBS at different dosages," *E3S Web of Conferences*, 184, (2020), 2–6. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401106

[88] Hadj Sadok, R., Maherzi, W., Benzerzour, M., Lord, R., Torrance, K., Zambon, A., & Abriak, N. E., "Mechanical properties and microstructure of low carbon binders manufactured from calcined canal sediments and ground granulated blast furnace slag (Ggbs)," *Sustainability*, *13*, (2021), 905. https://doi.org/10.3390/su13169057

[89] Prasanna, P. K., Srinivasu, K., & Ramachandra Murthy, A., "Strength and durability of fiber reinforced concrete with partial replacement of cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Materials Today: Proceedings*, 47, (2021), 5416–5425. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.267

[90] Ali-Boucetta, T., Behim, M., Cassagnabere, F., Mouret, M., Ayat, A., & Laifa, W., "Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag," *Construction and Building Materials*, 270, (2021), 121133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133

[91] Güneyisi, E., Gesoglu, M., & Özbay, E., "Permeation properties of self-consolidating concretes with mineral admixtures," *ACI Materials Journal*, *108*(2), (2011), 150–158. https://doi.org/10.14359/51682308

[92] Jain, K. L., Sharma D. K., Choudhary, R. & Bhargava S., "Impact of Waste Iron Slag on Mechanical and Durability Properties of Concrete," *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17-1, (2023), 45-57.

[93] Mathews, M. E., Kiran, T., Nammalvar, A., Anbarasu, M., Kanagaraj, B., & Andrushia, D., "Evaluation of the Rheological and Durability Performance of Sustainable Self-Compacting Concrete," *Sustainability*, *15*, (2023), 4212. https://doi.org/10.3390/su15054212

[94] Arabiourrutia, M., Lopez, G., Artetxe, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M., "Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129 (2020), 109932. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932

[95] Bocci, E., & Prosperi, E., "Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, (2020). https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.09.006

[96] Trouzine, H., Asroun, A., Asroun, N., Belabdelouhab, F., & Long, N. T., "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie, " *Revue « Nature & Technologie »,* 5, (2011), 28-35. http://www.univ-chlef.dz/revuenatec/art_05_04.pdf

[97] Office National des Statistiques de l'Algérie (ONS), site en ligne. http://www.ons.dz/ (consulté le 3 janvier 2024).

[98] Jang, J. W., Yoo, T. S., Oh, J. H., & Iwasaki, I., "Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea," *Resources, Conservation and Recycling*, 22(1–2), (1998), 1–14. https://doi.org/10.1016/S0921-3449 (97)00041-4

[99] Nadal, M., Rovira, J., Díaz-Ferrero, J., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L., "Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks," *Environment International*, 97, (2016), 37–44. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.016

[100] Dzene, I., Rochas, C., Blumberga, D., Rosa, M., & Erdmanis, A., "Energy Recovery from End-of-Life Tyres: Untapped Possibility to Reduce CO2 Emissions," *Environmental and Climate Technologies*, 4(1), (2010), 35–41. https://doi.org/10.2478/v10145-010-0015-6

[101] Saputra, R., Walvekar, R., Khalid, M., Mubarak, N. M., & Sillanpää, M., "Current progress in waste tire rubber devulcanization," Chemosphere, 265, (2021), 129033. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129033

[102] Glushankova, I., Ketov, A., Krasnovskikh, M., Rudakova, L., & Vaisman, I., "End of life tires as a possible source of toxic substances emission in the process of combustion," *Resources*, 8(2), (2019), 1–10. https://doi.org/10.3390/RESOURCES8020113

[103] Kerekes, Z., Lublóy, É., & Kopecskó, K., "Behaviour of tyres in fire: Determination of burning characteristics of tires," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(1), (2018), 279–287. https://doi.org/10.1007/s10973-018-7001-9

[104] Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A., "Progress in used tyres management in the European Union: A review," *Waste Management*, 32(10), (2012), 1742–1751. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010

[104] Levendis, Y. A., Atal, A., Carlson, J., Dunayevskiy, Y., & Vouros, P., "Comparative study on the combustion and emissions of waste tire crumb and pulverized coal," *Environmental Science and Technology*, 30(9), (1996), 2742–2754. https://doi.org/10.1021/es950910u

[105] Gigli, S., Landi, D., & Germani, M., "Cost-benefit analysis of a circular economy project: a study on a recycling system for end-of-life tyres," *Journal of Cleaner Production*, 229, (2019), 680–694. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.223

[106] Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O., & Mills, J. E., "A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete," *Construction and Building Materials*, 237, (2020), 117651. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117651

[107] Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Tlemat, H., "Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 157(3), (2004), 131–138. https://doi.org/10.1680/ensu.2004.157.3.131

[108] Barros, J. A. O., Frazão, C., Caggiano, A., Folino, P., Martinelli, E., Xargay, H., Zamanzadeh, Z., & Lourenço, L., "Cementitious composites reinforced with recycled fibres," *In Research for Development*, 8 , (2017), 141,-195. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56797-6_8

[109] Bulei, C., Todor, M. P., Heput, T., & Kiss, I., "Directions for material recovery of used tires and their use in the production of new products intended for the industry of civil construction and pavements," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294, (2018), 012064. https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012064

[110] Williams PT, Bottrill RP, Brindle AJ, Cunliffe AM., "The potential of pyrolysis for recycling used tyres," *In: Proceedings of the international symposium on recycling and reuse of used tyres*, 2001, 187–202.

[111] Alsaleh, A., & Sattler, M. L., "Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties," *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 1(4), (2014). 129–135. https://doi.org/10.1007/s40518-014-0019-0

[112] Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T., "High-performance fiber-reinforced concrete: a review," *In Journal of Materials Science*, 51 (14), (2016), 1-35. https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4

[113] Centonze, G., Leone, M., & Aiello, M. A., "Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete : A mechanical characterization," *Construction and Building Materials*, *36*, (2012), 46–57. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088

[114] ACI 544.2R-89 Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, (1999).

[115] Pająk, M., & Ponikiewski, T., "Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers," *Construction and Building Materials*, *47*, (2013), 397–408. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.072

[116] Simalti, A., & Singh, A. P., "Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete," *Construction and Building Materials*, *266*, (2021). 121102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121102

[117] Bjegovic, D., Baricevic, A., Lakusic, S., Damjanovic, D., & Duvnjak, I., "Positive interaction of industrial and recycled steel fibres in fibre reinforced concrete," *Journal of Civil Engineering and Management, 19,* (2013), 50–60. https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802710

[118] ACI Committee 544, "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete," ACI Committee, report 544.1R-96, (1996).

[119] Nacir Siraj, "Steel fiber reinforced concrete made with fibers extracted from used tyres," Thesis of Doctorate, University of Alberta, 2009. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31102.64324

[120] Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P. O., & Kallis, S., "Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost," *Sustainability,* 3(7), (2011), 965–983. https://doi.org/10.3390/su3070965

[121] De Figueiredo, A. D., & Ceccato, M. R., "Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and ve-be test," *Materials Research, 18*(6), (2015), 1284–1290. https://doi.org/10.1590/1516-1439.022915

[122] Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F., & Aiello, M. A., Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behavior," *Construction and Building Materials, 161,* (2018), 141–155. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101

[123] Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F., & Aiello, M. A., "Experimental Study on Bond Behavior in Fiber-Reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber," *Journal of Materials in Civil Engineering, 28*(9), (2016), 04016068. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001534

[124] EFNARC, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete", in: Eur. Guide. Self-Compacting-Concrete, 2005.

[125] Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., & Maffezzoli, A., "Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete : Pull-out behaviour , compressive and flexural strength," *Waste Management, 29*(6), (2009), 1960–1970. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002

[126] Sengul, O., "Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires," *Construction and Building Materials, 122,* (2016), 649–658. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.113

[127] Samarakoon S.S.M., Ruben P., Pedersen J.W., Evangelista L., "Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste," *Case Studies in Construction Materials,* 11, 2019, 00259.
https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019. e00259

[128] Papakonstantinou, C. G., & Tobolski, M. J., "Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete," *Cement and Concrete Research*, *36*(9), (2006), 1686–1691. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.015

[129] Rossli, S., & Ibrahim, I., (2012). "Mechanical Properties of Recycled Steel Tire Fibres in Concrete," *Civil.Utm.My*. http://civil.utm.my/ms/iznisyahrizal/files/2013/02/Technical-Report-1.pdf

[130] Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S., "Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material," *Construction and Building Materials*, *24*(9), (2010), 1664–1671. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025

[131] Mastali, M., & Dalvand, A., "Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC)," *Construction and Building Materials*, *125*, (2016), 196–209. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046

[132] Najim, K. B., Saeb, A., & Al-Azzawi, Z., "Structural behavior and fracture energy of recycled steel fibre self-compacting reinforced concrete beams," *Journal of Building Engineering*, *17*, (2018), 174–182. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.02.014

[133] Crane, G., Elefritz, R. A., Kay, E. L., & Laman, J. R., "Scrap tire disposal procedures," In *Rubber Chemistry and Technology*, 51(3), (1978), 577–599). https://doi.org/10.5254/1.3535750

[134] Smrkić, M. F., Damjanović, D., & Baričević, A., "Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading," *Gradjevinar*, *69*(10), (2017), 893–905. https://doi.org/10.14256/JCE.2059.2017

[135] Baricevic, R. S., Bjegovic, A., Skazlic & M., "Hybrid Fiber – Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers," *Journal of Materials in Civil Engineering*, © ASCE, 0899-1561., (2016). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001906.

[136] Li, N., Jin, Z., Long, G., Chen, L., Fu, Q., Yu, Y., Zhang, X., & Xiong, C., "Impact resistance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete (SCC) at high strain rates," *Journal of Building Engineering*, 38, (2021), 102212. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102212

[137] Bensaci H.., Kenai, S., & Menadi, B., "The influence of recycled steel fibers on self-compacting concrete performance," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(10), (2018), 102008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/10/102008

[138] Köroğlu, M. A., "Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires," *Revista de La Construccion*, 17(3), (2019), 484–498. https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.484

[139] Younis, K. H., Ahmed, F. S., & Najim, K. B., "Self-Compacting Concrete Reinforced with Steel Fibers from Scrap Tires: Rheological and Mechanical Properties," *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 4(1), (2018), 1–11. https://doi.org/10.23918/eajse.v4i1sip1

[140] Simalti, A., & Singh, A. P., "Mix proportioning of recycled steel fiber reinforced self-compacting concrete," *In: Proceeding Int. UKIERI Concr., NIT Jalandhar, India, Jalandhar*, 35, (2019).

[141] Simalti, A., Singh, A.P., "Fresh and Mechanical Properties of Recycled Steel Fiber Reinforced Self-consolidating Concrete," *In: Reddy, Lecture Notes in Civil Engineering*, 90, (2021), 271-279. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51354-2_24

[142] Khatib, Z. K., & Bayomy, F. M., "RUBBERIZED PORTLAND CEMENT CONCRETE," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11, (1999), 206–213.

[143] Tlemat, H., Pilakoutas, K., & Neocleous, K., "Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres," *Materials and Structures*, 39(287), (2006), 365–377. https://doi.org/10.1617/s11527-005-9009-4

[144] Martinelli, E., Caggiano, A., & Xargay, H., "An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete," *Construction and Building Materials*, 94, (2015), 290–298. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.007

[145] Caggiano, A., Folino, P., Lima, C., Martinelli, E., & Pepe, M., "On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers," *Construction and Building Materials*, 147, (2017), 286–295. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160

[146] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R., Abdollahnejad, Z., & Illikainen, M., "Characterization and optimization of hardened properties of self- consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers," *Composites Part B*, 151, (2018), 186–200. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.021

[147] Chang, J., Cui, K., & Zhang, Y., "Effect of hybrid steel fibers on the mechanical performances and microstructure of sulphoaluminate cement-based reactive powder concrete," *Construction and Building Materials*, 261, (2020), 120502. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120502

[148] Mastali, M., & Dalvand, A., "Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Hybrid Recycled Steel–Polypropylene Fiber," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), (2017), 04017012. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001851

[149] Aiello MA, Maffezzoli A, Tarzia A., Use of recycled materials from waste tyres in concrete),," *In: Proceedings of the 15th CTE congress*, 1, (2004), 265-272. http://hdl.handle.net/11587/334369

[150] Younis, K. H., “Mechanical performance of concrete reinforced with recycled steel fibres extracted from post-consumer tyres,” *2nd International Engineering Conference on Developments in Civil and Computer Applications IEC2016*, February, (2016).

[151] Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z. S., & Tang, W., “Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate,” *Journal of Cleaner Production*, 168, (2017), 605–613. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.070

[152] Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S., “Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review,” *Construction and Building Materials*, 68, (2014), 501–516. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003

[153] Gao, D., & Zhang, L., “Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, 159, (2018), 126–136. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.073

[154] Meesala, C. R., “Influence of different types of fiber on the properties of recycled aggregate concrete,” *Structural Concrete*, 20(5), (2019), 1656–1669. https://doi.org/10.1002/suco.201900052

[155] Guo, Y., Zhang, J., Chen, G., & Xie, Z., “Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates , rubber crumb and reinforced with steel fibre , subjected to elevated temperatures,” *Journal of Cleaner Production*, 72, (2014), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.036

[156] NF EN 196-1, Méthodes d’essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances, (Septembre 2016).

[157] Dreux G., & Festa J., “Nouveau guide du béton, ” Huitième édition, Eyrolles, Paris, (1998), 409 pages.

[158] NF EN 934-2, Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour bétons, Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, (Août 2012).

[159] Okamura, H., Ouchi, M., “Self-Compacting Concrete”, J. Adv. Concr. Technol. 1, (2003), 5–15. doi:10.3151/jact.1.5.

[160] Okamura, H., Ouchi, M., “Self-compacting concrete: development, present use and future”, in: Frst Int. Conf. Self-Compacting Concr., (1999). 3–14.

[161] Boukendakdji, O., “Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires”, Thèse de doctorat, université de Blida 1, Algérie, (2010).

[162] 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.

[163] NF EN 12350 – 8, Essai pour béton frais, Partie 8 : Béton auto-plaçant, Essai d'étalement au cône d'Abrams, (Juin 2019).

[164] AFGC, Recommandations pour l’emploi des bétons autoplaçants”, Document scientifique et technique, (2008).

[165] NF EN 12350 – 9, Essai pour béton frais, Partie 9 : Béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V, (Novembre 2010).

[166] NF EN 12350 – 11, Essai pour béton frais, Partie 11 : Béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis, (Novembre 2010).

[167] NF EN 12390 – 3, Essai pour béton durci, Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, (Juin 2019).

[168] NF EN 12390 – 5, Essai pour béton durci, Partie 3 : Résistance à la flexion des éprouvettes, (Juin 2019).

[169] BS EN 12390 – 13, Testing hardened concrete, Part 13 : Determination of secant modulus of elasticity in compression, (July 2021).

[170] NF EN 12504 – 4, Essai pour béton durci, Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci, (Mai 2005)

[171] ASTM C 157 – 17**,** Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete, USA, (Août 2017).

[172] NF P 18 – 459, Essai pour béton durci, Essai de porosité accessible à l’eau et de masse volumique apparente d'un corps de béton durci, (Août 2022).

[173] ASTM C1585 – 11, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes, (Février 2013).

[174] NF EN 12390 – 8, Essai pour béton durci, Partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression, (Juin 2019).

[175] ASTM C1202 – 12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration, (Juillet 2017).

[176] Silva, Y. F., Delvasto, S., Izquierdo, S., & Araya-Letelier, G., “Short and long-term physical and mechanical characterization of self-compacting concrete made with masonry and concrete residue,” *Construction and Building Materials*, *312*(10), (2021), 125382. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125382

[177] Martínez-García R., Jagadesh J., Fraile-Fernández F. J., & de Prado-Gil1 J., "Influence of design parameters on the fresh and durable properties of self-compacting concrete with recycled aggregate," *IOP_Conferance series: Materials Science and Engineering*, 1222, (2022), 012012. https://doi:10.1088/1757-899X/1222/1/012012

[178] Suaiam, G., & Makul, N., "Self-compacting concrete produced with recycled concrete aggregate coated by a polymer-based agent: A case study," *Case Studies in Construction Materials*, *19*(July), (2023), e02351. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02351

[179] Zhong, H., & Zhang, M., "Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres," *Journal of Cleaner Production*, 259, (2020), 120914. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120914

[180] Chen, M., Si, H., Fan, X., Xuan, Y., & Zhang, M., "Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, 316, (2022), 125896. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125896

[181] Mohammed, V. R., Abdulhaleem, K. N., Hamada, H. M., Humada, A. M., & Majdi, A., "Effect of Recycled Aggregate Concrete and Steel Fibers on the Strength of Self-Compacting Concrete," E3S Web of Conferences, 427, (2023), 1–7. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342702012

[182] El-Hassan, H., Kianmehr, P., Tavakoli, D., El-Mir, A., & Dehkordi, R. S., "Synergic effect of recycled aggregates, waste glass, and slag on the properties of pervious concrete," *Developments in the Built Environment*, 15(April), (2023), 100189. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100189

[183] Kavyateja, B. V., Reddy, P. N., & Kumar, C. A., "Properties of self-compacting concrete modified with ultrafine slag," *Research on Engineering Structures and Materials*, 8(2), (2021), 371-384. https://doi.org/10.17515/resm2021.351st1008

[184] Goyal, G., Phukan, A. C., Hussain, M., Lal, V., Modi, M., Goyal, M. K., & Sehgal, R., "Radiological characteristics of Self-Compacting Concretes incorporating fly ash, silica fume, and slag," *Journal of Building Engineering*, (2022), 116544. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104987

[185] Skaf, M., Revilla-cuesta, V., Ortega-l, V., Khan, A., & Manso, J. M., "Deformational behavior of self-compacting concrete containing recycled aggregate , slag cement and green powders under compression and bending : Description and prediction adjustment," *Journal of Building Engineering*, 54, (2022), 104611. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104611

[186] Kathirvel, P., Murali, G., Vatin, N. I., & Abid, S. R., "Experimental Study on Self Compacting Fibrous Concrete Comprising Magnesium Sulphate Solution Treated Recycled Aggregates," *Materials*, 15(1). (2022), 1-17, https://doi.org/10.3390/ma15010340

[187] Zrar, Y. J., Younis, K. H., & Sherwani, A. F. H., "Properties of sustainable self-compacted concrete with recycled concrete and waste tire crumb rubber aggregates," *Construction and Building Materials*, 407(September), (2023), 133524. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133524

[188] Lashari, H. R., Memon, N. A., Memon, M. A., & Lashari, M. H., "Flow Characteristics of Recycled Coarse Aggregates (RCA) based Self-Compacted Concrete (SCC)," *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, *9*(7), (2021), 908–911. https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/12972021

[189] Srikanth, N., Dakshina Murthy, N. R., & Seshagiri Rao, M. V., "Stress–Strain Behaviour of Self-consolidated Processed Recycled Aggregate Concrete," *In Lecture Notes in Civil Engineering*, 135, (2021), 51-59. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6389-2_6

[190] Saini, B. S., & Singh, S. P., "Estimation of flexural fatigue strength of self-compacting concrete made with coarse recycled concrete aggregates," *Innovative Infrastructure Solutions*, *7*(1), (2022), 1–18. https://doi.org/10.1007/s41062-021-00606-w

[191] Rahmani, I., Maleki, A., & Lotfollahi-Yaghin, M. A., "A Laboratory Study on the Flexural and Shear Behavior of RC Beams Retrofitted with Steel Fiber-Reinforced Self-compacting Concrete Jacket," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, *45*(4), (2021), 2359–2375. https://doi.org/10.1007/s40996-020-00547-x

[192] Guler, S., Akbulut, Z. F., Siad, H., & Lachemi, M., "Effect of macro polypropylene, polyamide and steel fibers on the residual properties of SCC at ambient and elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, 289, (2021), 123154. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123154

[193] Nalanth, N., Venkatesan, P. V., & Ravikumar, M. S., "Evaluation of the fresh and hardened properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete using recycled aggregates as a replacement material," *Advances in Civil Engineering*, 2014, (2014), 1-6. https://doi.org/10.1155/2014/671547

[194] Bensaci, H., Menadi, B., & 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 and Composites, 24, (2019), 8–13. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/nhc.24.8

[195] Raia, A., Tahwia, A., Raheem, A. H. A., & Elrahman, M. A., "Synergistic influence of metakaolin and slag cement on the properties of self-compacting fiber-reinforced concrete," *Innovative Infrastructure Solutions*, *7*(1), (2022), 1–13. https://doi.org/10.1007/s41062-021-00657-z

[196] Li, N., Jin, Z., Long, G., Chen, L., Fu, Q., Yu, Y., Zhang, X., & Xiong, C., "Impact resistance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete (SCC) at high strain rates," *Journal of Building Engineering*, *38*, (2021), 102212. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102212

[197] Yahiaoui W., "Durabilite du beton autoplaçant en climat chaud," *Thèse de doctorat*, Université de Blida 1, Algérie, (2018).

[198] Pereira-de Oliveira, L. A., Nepomuceno, M., & Rangel, M., "An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates," *In Informes de la Construccion,* 65, EXTRA 1, (2013), 31–41. https://doi.org/10.3989/ic.11.138

[199] Chaib, S., Azzouz, L., Benabed B., "Use of recycled aggregates from different sources in the production of SCC Part I: Mix design and fresh properties," *Journal of Silicate Based and Composite Materials Use*, 745(6), (2022), 210–217. https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2022.30

[200] Ganapathy, G. P., Keshav, L., Ravindiran, G., & Razack, N. A., "Strength Prediction of Self-Consolidating Concrete Containing Steel Fibre with Different Fibre Aspect Ratio," *Journal of Nanomaterials,* 2022, (2022), 1-16. https://doi.org/10.1155/2022/7604383

[201] Simalti, A., & Singh, A. P., "Comparative study on direct shear behavior of manufactured and recycled shredded tire steel fiber reinforced self-consolidating concrete," *Journal of Building Engineering,* 29, (2020), 101169. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101169

[202] Abed, M. A., Fořt, J., Naoulo, A., & Essa, A., "Influence of polypropylene and steel fibers on the performance and crack repair of self-compacting concrete," *Materials,* 14, (2021), 1-15. https://doi.org/10.3390/ma14195506

[203] Kotwal, S., Singh, H., & Kumar, R., "Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates," *Materials Today: Proceedings,* 48, (2021), 1032–1037. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.436

[204] Mishra, S. K., & Sahoo, P. R., "Experimental study on the mechanical and durability properties of fiber-reinforced self-compacting concrete," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science,* 07, (2022), 2576–2582.

[205] Samoel, M. S. & Fareed. H. M., "Shear Strength of Headed Stud Connectors in Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate," *Buildings,* 12(505), (2022), 1-13. https://doi.org/10.3390/ buildings12050505%0AAcademic

[206] Safiuddin, M. D., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z., "Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete," *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11*(4), (2011), 1023–1041. https://doi.org/10.1016/s1644-9665(12)60093-4

[207] Matar, P., & Assaad, J. J., "Concurrent effects of recycled aggregates and polypropylene fibers on workability and key strength properties of self-consolidating concrete," *Construction and Building Materials, 199,* (2019), 492–500. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.091

[208] Karrem N. A., Najim, K. B., & Mahmoud, A. S., "Mechanical Properties of Self-Compacted Concrete Made," *AIP Conf. Proc.*, *3009*, (2024), 1–9. https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0198002

[209] Mezzal, S. K., Al-Azzawi, Z., & Najim, K. B., "Effect of discarded steel fibers on impact resistance, flexural toughness and fracture energy of high-strength self-compacting concrete exposed to elevated temperatures," *Fire Safety Journal*, 121, (2021), 103271. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103271

[210] Abdullah, G. M. S., Alshaikh, I. M. H., M. Zeyad, A., Magbool, H. M., & Bakar, B. H. A., The effect of openings on the performance of self-compacting concrete with volcanic pumice powder and different steel fibers, *Case Studies in Construction Materials*, 17, (2022), e01148. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01148

[211] Bayah, M., & Debieb, F., "Performance of self-compacting concrete based on fine recycled concrete aggregate incorporating polyethylene terephtalate fibers,". *Advanced topics in mechanics of materials, structures and construction*, *31*, (2024), 155–164. https://doi.org/10.21741/9781644902592-17

[212] Boubakeur, A., Menadi, B., Kouider-Djelloul, O., & Kenai, S., "Combined effect of ground granulated blast-furnace slag and metakaolin on the performance of recycled self-compacting concrete," *MRS Advances*, *8*(10), (2023), 596–601. https://doi.org/10.1557/s43580-023-00583-5

[213] Katar, I., Ibrahim, Y., Abdul Malik, M., & Khahro, S. H., "Mechanical properties of concrete with recycled concrete aggregate and fly ash," *Recycling*, 6(23), (2021), 1-13. https://doi.org/10.3390/recycling6020023

[214] Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Faleschini, F., Santamaría, A., & Skaf, M., "Compressive-Strength Evaluation Of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete Through Hammer Rebound Index," *In Lecture Notes in Civil Engineering*, 200 LNCE, (2022), 236-243. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_28

[215] Gao, D., & Wang, F., "Effects of recycled fine aggregate and steel fiber on compressive and splitting tensile properties of concrete," *Journal of Building Engineering*, 44, (2021), 102631. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102631

[216] Sahraei Moghadam, A., Omidinasab, F., & Abdalikia, M., "The effect of initial strength of concrete wastes on the fresh and hardened properties of recycled concrete reinforced with recycled steel fibers," *Construction and Building Materials*, *300*(7), (2021), 124284. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124284

[217] Vadim Z., Leonid D., Dmyrto K. and Yuri R., "Using Experimental Statistical Models for Predicting Strength," *Materials*, 15, (2022), 1–14. https://doi.org/10.3390/ma15124110

[218] Boukendakdji. O., (“Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires, ” *Thèse de Doctorat*, l’Université de Blida1, Algérie, 2010).

[219] Zaid, O., Mukhtar, F. M., M-García, R., El Sherbiny, M. G., & Mohamed, A. M., “Characteristics of high-performance steel fiber reinforced recycled aggregate concrete utilizing mineral filler,” *Case Studies in Construction Materials*, 16(2), (2022), e00939. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00939

[220] Mo, K. H., Ling, T. C., & Cheng, Q., “Examining the Influence of Recycled Concrete Aggregate on the Hardened Properties of Self-compacting Concrete,” *Waste and Biomass Valorization*, 12(2), (2021), 1133–1141. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01045-x

[221] Singh, A., Mehta, P. K., & Kumar, R., “Properties of Binary Admixtures and Recycled Coarse Aggregate Mixed Self-compacting Concrete,” *Advances in Sustainable Construction Materials*, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 222, (2022), 49-57. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8496-8

[222] Malagavelli, V., Siva Rama Krishna, S., Tarun Kumar, K., & Siva Chennakesava Rao, M., “Strength Parameters of Blended Recycled Aggregate for M40 Self-Compacted Concrete,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 822(1), (2021), 1–8. https://doi.org/10.1088/1755-1315/822/1/012024

[223] Martínez-García, R., de Rojas, M. I. S., Pozo, J. M. M. Del, Fraile-Fernández, F. J., & Juan-Valdés, A., “Evaluation of mechanical characteristics of cement mortar with fine recycled concrete aggregates (FRCA),” *Sustainability*, 13(1), (2022), 1–23. https://doi.org/10.3390/su13010414

[224] Omidinasab, F., Moazami Goodarzi, S., & Sahraei Moghadam, A., “Characterization and Optimization of Mechanical and Impact Properties of Steel Fiber Reinforced Recycled Concrete,” *International Journal of Civil Engineering*, 20(1), (2022), 41–55. https://doi.org/10.1007/s40999-021-00656-2

[225] Çelikten, S., “Properties of recycled steel fibre reinforced expanded perlite based geopolymer mortars,” *Advances in Concrete Construction*, 13(1), (2022), 25–34. https://doi.org/10.12989/acc.2022.13.1.025

[226] Kumar, M. H., Saikrishnamacharyulu, I., Mohanta, N. R., Ashutosh, A., Mishra, P., & Samantaray, S., “Mechanical behavior of high strength concrete modified with triple blend of fly ash, silica fume and steel fibers,” *Materials Today: Proceedings*, (2022). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.528

[227] Ali, B., Raza, S. S., Kurda, R., & Alyousef, R., “Synergistic effects of fly ash and hooked steel fibers on strength and durability properties of high strength recycled aggregate concrete,” *Resources, Conservation and Recycling*, 168, (2021), 105444. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105444

[228] Muthupriya, P., Manjunath, N. V., Keerdhana B., “Strength study on fiber reinforced self-compacting concrete with fly ash and GGBFS,” *International*

Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, *03*(02), (2014), 2319–5347. https://www.researchgate.net/publication/295616496

[229] Yu, F., Feng, C., Wang, S., Huang, W., Fang, Y., & Bu, S., "Mechanical performance of recycled aggregate self-consolidating concrete column," *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(3), (2021), 188–202. https://doi.org/10.3846/jcem.2021.14117

[230] Fiol, F., Thomas, C., Manso, J. M., & López, I., "Transport mechanisms as indicators of the durability of precast recycled concrete," *Construction and Building Materials*, 269, (2021), 121263. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121263

[231] Mohammed, S. I., & Najim, K. B., "Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete," *Structures*, 23, (2020), 34–43. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.010

[232] Kachouh, N., El-Hassan, H., & El-Maaddawy, T., "Influence of steel fibers on the flexural performance of concrete incorporating recycled concrete aggregates and dune sand, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*," 10(3), (2021), 165–192. https://doi.org/10.1080/21650373.2020.1809546

[233] Sulthan, F., "Influence of hooked-end steel fibers on flexural behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC)," *International Journal of GEOMAT*, 23(95), (2022), 127–135.

[234] Raidyarto, A., Papua, U. Y., Parung, H., Hasanuddin, U., Tjaronge, M. W., & Hasanuddin, U., "Mechanical behavior of self-compacting concrete (SCC) using seawater and sea sand strengthened by steel fiber," *Design Engineering*, 7, (2021), 7145-7156.

[235] Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B., "The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures," *Journal of Cleaner Production*, *95*, (2015), 66–74. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.050

[236] Mahalingasharma, S. J., Parasivamurthy, P., Das, V. R., & Arun, B. R., "The combined effect of GGBS and low volume fibres on the low-velocity impact and mechanical properties of self-compacting concrete," *Materials Today: Proceedings*, 49, (2021), 2260–2266. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.339

[237] Kapoor, K., Singh, S. P., & Singh, B., "Improving the Durability Properties of Self-Consolidating Concrete made with Recycled Concrete Aggregates using Blended Cements," *International Journal of Civil Engineering*, 19(7), (2021), 759–775. https://doi.org/10.1007/s40999-020-00584-7

[238] Sasanipour, H., Aslani, F., & Taherinezhad, J., "Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, 227, (2019). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324

[239] Sasanipour, H., & Aslani, F., "Effect of specimen shape, silica fume, and curing age on durability properties of self-compacting concrete incorporating coarse recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, 228, (2019), 117054. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117054

[240] Haddadou, N., Chaid, R., Ghernouti, Y., & Adjou, N., "The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete," *Journal of Building Materials and Structures*, 1(2), (2014), 65–76. https://doi.org/10.34118/jbms.v1i2.10

[241] Behera, M., Minocha, A. K., & Bhattacharyya, S. K., "Flow behavior, microstructure, strength and shrinkage properties of self-compacting concrete incorporating recycled fine aggregate," *Construction and Building Materials*, 228, (2019), 116819. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116819

[242] Guo, Z., Jiang, T., Zhang, J., Kong, X., Chen, C., & Lehman, D. E. "Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume," *Construction and Building Materials*, 231, (2020), 117115. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117115

[243] Fiol, F., Thomas, C., Manso, J. M., & López, I. "Influence of recycled precast concrete aggregate on durability of concrete's physical processes," *Applied Sciences*, 10(20), (2020), 1–16. https://doi.org/10.3390/app10207348

[244] Younis, K. H., Ahmed, F. S., & Najim, K. B., "Effect of recycled-steel fibers on compressive strength and shrinkage behavior of self-compacting concrete," *Proceedings - International Conference on Developments in Esystems Engineering (DeSE)*, 2018(10), (2019), 268–272. https://doi.org/10.1109/DeSE.2018.00054

[245] Cao, Q., Gao, Q., Wang, R., & Lin, Z., "Effect of Fibers and Expansive Agent on Shrinkage of Self-Consolidating Concrete under Two Curing Schemes," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), (2019), 1–9. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002761

[246] Ahmad, J., Martínez-García, R., Szelag, M., De-Prado-gil, J., Marzouki, R., Alqurashi, M., & Hussein, E. E., "Effects of steel fibers (Sf) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete," *Materials*, *14*(24), (2021), 74-97. https://doi.org/10.3390/ma14247497

[247] Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T., "Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete," *Composite Structures*, 181, (2017), 273-284. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.086

[248] Sasanipour, H., & Aslani, F., "Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, 236, (2020), 117540. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540

[249] Alwesabi, E. A. H., Abu Bakar, B. H., Alshaikh, I. M. H., Abadel, A. A., Alghamdi, H., & Wasim, M., "An experimental study of compressive toughness of Steel–Polypropylene hybrid Fibre-Reinforced concrete," *Structures*, 37(1), (2022), 379–388. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.025

[250] Alsaif, A., & Alharbi, Y. R., "Strength, durability and shrinkage behaviours of steel fiber reinforced rubberized concrete," *Construction and Building Materials*, 345(7), (2022), 128295. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128295

[251] Siddique, R., Kaur, G., & Kunal., "Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres," *Construction and Building Materials*, 103, (2016), 15–22. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.044

[252] Awoyera, P. O., Akinwumi, I. I., Karthika, V., Gobinath, R., Gunasekaran, R., Lokesh, N., Manikandan, M., & Narmatha, T., "Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Industrial Rejects and Mineral Admixtures: Strength and Durability Assessment," *Silicon*, 12(8), (2020), 1779–1785. https://doi.org/10.1007/s12633-019-00279-2

[253] Bao, J., Li, S., Zhang, P., Ding, X., Xue, S., Cui, Y., & Zhao, T., "Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete," *Construction and Building Materials*, 239, (2020), 117845. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117845

[254] Revilla-Cuesta, V., Faleschini, F., Zanini, M. A., Skaf, M., & Ortega-López, V., "Porosity-based models for estimating the mechanical properties of self-compacting concrete with coarse and fine recycled concrete aggregate," *Journal of Building Engineering*, 44(10), (2021), 103425. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103425

[255] El-Hassan, H., Hussein, A., Medljy, J., & El-Maaddawy, T., "Performance of steel fiber-reinforced alkali-activated slag-fly ash blended concrete incorporating recycled concrete aggregates and dune sand," *Buildings*, 11(8), (2021), 1-31. https://doi.org/10.3390/buildings11080327

[256] Frazão, C., Camões, A., Barros, J., & Gonçalves, D., "Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, 80, (2015), 155–166. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.061

[257] Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Gholampour, A., Gencel, O., Koksal, F., & Ozbakkaloglu, T., "Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate," *Structural Concrete*, 22(5), (2021), 2791–2812. https://doi.org/10.1002/suco.202100028

[258] Ayub, T., Mahmood, W., & Khan, A. U. R., "Durability performance of SCC and SCGC containing recycled concrete aggregates: A comparative study," *Sustainability*, 13(15), (2021), 1-21. https://doi.org/10.3390/su13158621

[259] Marko Popović, Aleksandar Savić, Gordana Broćeta & Branko Borozan, M. Š., "Experimental investigation of SCC with recycled rubber and recycled concrete aggregate," *STEPGRAD*, 6, (202), 63-71. https://doi.org/DOI 10.7251/STP2215063P ISSN

[260] Singh, N., Singh, T., Kumar, M., Singh, A., & Kumar, P., "Investigating the fresh state performance of concrete containing iron slag and recycled concrete aggregates," *Materials Today: Proceedings*, (2022). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.462

[261] Gupta, S., "Development of High Strength Self Compacting Mortar with Hybrid Blend of Polypropylene and Steel Fibers," *International Journal of Engineering and Technology*, 4(10), (2014), 571–576.

[262] Abendeh, R. M., & Bani Baker, M., "Using steel slag aggregate to strengthen self-compacting concrete durability," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, (2021). https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00067

[263] Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., & Memis, S., "Effect of high volume fly ash and micro-steel fiber on flexural toughness and durability properties in self-compacting lightweight mortar (SCLM)," *Construction and Building Materials*, 307(6), (2021), 124877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124877

[264] Abu-Bakr, M., Mahmood, H. F., & Mohammed, A. A., "Investigation of metakaolin and steel fiber addition on some mechanical and durability properties of roller compacted concrete," *Case Studies in Construction Materials*, 16(2), (2022), 1-13. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01136

[265] Öz, A., Bayrak, B., & Aydın, A. C., "The effect of trio-fiber reinforcement on the properties of self-compacting fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, 274, (2021), 12-25. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121825

[266] Poongodi, K., Murthi, P., Awoyera, P. O., Gobinath, & R., & Olalusi, O. B., "Durability Properties of Self-compacting Concrete Made With Recycled Aggregate for Pavement Application," *Silicon*, 13, (2020), 2727–2735. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00635-7

[267] Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z. S., & Tang, W., "Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate," *Journal of Cleaner Production*, 168, (2017), 605–613. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.070

[268] Boubekeur, T., Boulekbache, B., Aoudjane, K., Ezziane, K., & Kadri, E. H., "Prediction of the durability performance of ternary cement containing limestone powder and ground granulated blast furnace slag," *Construction and Building Materials*, 209, (2019), 215–221. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.120

[269] Karthik, D., Nirmalkumar, K., & Priyadharshini, R., "Characteristic assessment of self-compacting concrete with supplementary cementitious materials," *Construction and Building Materials*, 297, (2021), 123845. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123845

[270] Mohamed, O., "Durability and compressive strength of high cement replacement ratio self-consolidating concrete," *Buildings*, 8(11), (2018), 1-18. https://doi.org/10.3390/buildings8110153

[271] Prasanna, P. K., Srinivasu, K., & Ramachandra Murthy, A., "Strength and durability of fiber reinforced concrete with partial replacement of cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Materials Today: Proceedings*, 47, (2021), 5416–5425. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.267

[272] Ali, B., Yilmaz, E., Tahir, A. R., Gamaoun, F., El Ouni, M. H., & Murtaza Rizvi, S. M., "The Durability of High-Strength Concrete Containing Waste Tire Steel Fiber and Coal Fly Ash," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, (2021), 1-19. https://doi.org/10.1155/2021/7329685

[273] Anastasiou, E. K., Papayianni, I., & Papachristoforou, M., "Behavior of self-compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement," *Materials and Design*, 59, (2014), 454–460. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.030

[274] Peng, G. F., Niu, X. J., & Long, Q. Q., "Experimental study of strengthening and toughening for recycled steel fiber reinforced ultra-high performance concrete," *Key Engineering Materials*, 629–630, (2015), 104–111. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.104

[275] Köroğlu, M. A., "Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires," *Revista de La Construccion*, 17(3), (2019), 484–498. https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.484

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 : ρ_C =3050 kg/m^3
- Sable : ρ_S =2650kg/m^3
- Superplastifiant : ρ_{Sp}=1070kg/m^3
- Eau : ρ_E =1000kg/m^3

Coefficient d'absorption du sable Ab= 1.34

On fixe le rapport Sable/Mortier *S/M* = 0.50 (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids) *E/C* = 0.4 ou (par volume) *E/C* =1.22

Le superplastifiant (MEDAFOW 01) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : Sp% =1.15 % 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=300 g (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 = 295 g et on calcul l'humidité du sable μ_S

$$\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_S - Ab$$

A.3. Calcul des quantités de chaque constituant :

A.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C% :

$$C_{vol}\,\% = \frac{(1-\frac{S}{M})}{(1+E/C_{par\ volume})} *100$$

La quantité de ciment C en kg :

$$C(kg) = \frac{V \times E/C_{par\ volume}}{100} \times \rho_c$$

A.3.2. Le sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S\ (kg) = (1+ \frac{Correction}{100}) \times (\frac{V \times S/M \times \rho_S}{100})$$

A.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

$$Sp\ (kg) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

A.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux partie 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'adjuvantest ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : $\%\ E_{vol}$

$$\%\ E_{vol} = \frac{(1-\frac{S}{M}) \times 100 \times E/C_{par\ volume}}{(1+\frac{E}{C_{par\ volume}})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = (\frac{V \times \%E_{vol}}{100} \times \frac{\rho_E}{1000}) - (\frac{Sp \times 70}{100}) - (\frac{V \times S/M \times \rho_S}{1000} \times \frac{Correction}{100})$$

Eau 1 : E1= E × 0.7

Eau 2 : E2= E × 0.3

Annexe B

Exemple de calcul de la composition du béton

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 : ρ_G = 1500 kg/m^3
  - Masse volumique absolue du gravier : ρ_{AG} = 2631 kg/m^3
  - Masse volumique absolue du sable : ρ_S = 2650 kg/m^3
  - Masse volumique absolue du ciment ρ_C = 3050 kg/m^3
- Les coefficients d'absorption :
  - Coefficient d'absorption du sable : Ab_S = 1.34
  - Coefficient d'absorption du gravier : Ab_G = 0.79
- Le rapport Sable/Mortier : S/M = 0.5
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G\left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : A=1% du volume du béton ;
- Le rapport Eau/Ciment est de E/C_{volume}=1.22 par unité de volume de ciment et $E/C_{poids} = E/C_{volume}/ \rho_C$=0.40 par unité de poids de ciment ;
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : %Sp= 1.15% du poids de ciment, le MEDAFLOW30 ;

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 M1 et un échantillon de gravier de masse M'1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse M2 et M'2 les masses respectives du gravier et du sable.

- L'humidité du sable : $\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$
- 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 :

$$G(kg) = \frac{G(^{kg}/_{m^3}) \times V - M_2}{1000}\left[1 + \frac{\mu_{G-A_{bG}}}{100}\right]$$

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 dans le béton :

$$G(\%) = \frac{G(^{kg}/_{m^3})}{\rho_{AG} \times 10}$$

- Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$M(\%) = 100 - G(\%) - A(\%)$$

- Le pourcentage du sable dans le béton :

$$S(\%) = \frac{M(\%) \times S/M}{100}$$

- Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{S(\%) \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left[1 + \frac{\mu_{S-A_{bS}}}{100}\right]$$

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) :

$$C(\%) = \frac{1}{1 + \frac{E}{C_{Volume}}} \times P(\%)$$

- La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = C(\%) \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.3.4. Superplastifiant

- Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m^3)

$$Sp(kg/m^3) = C(\%) \times \rho_C \times 10 \times \frac{S_p(\%)}{100}$$

- La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

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) :

$$E(\%) = \frac{\frac{E}{C_{Volume}}}{1 + \frac{E}{C_{Volume}}} \times P(\%)$$

Le 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 : e_1

$$e_1(kg) = \frac{S(\%) \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left[\frac{\mu_{S-A_{bS}}}{100}\right]$$

- L'eau contenue dans le sable : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(^{kg}/_{m^3}) \times V}{1000}\left[\frac{\mu_{G-A_{bG}}}{100}\right]$$

- L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

$$e_3(kg) = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

- 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 Vde béton :

$$E(kg) = \frac{E(\%) \times 10 \times V}{1000} - e)$$