



Université De Blida 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en génie civil

**PERFORMANCE D'UN MORTIER AUTOPLAÇANT A BASE DE
DECHETS DE FIBRE DE VERRE ET DE MARBRE RECYCLES**

Présenté par :

KHELIFA Nihed

BANI Nerdjes Ferial

Devant les membres de jury :

YAHIAOUI Walid	M.C.B	U.S.D.B. 1	Président
BENSACI Hamza	M.C.B	U.S.D.B. 1	Examineur
BENTLEMSAN Nadia	M.C.A	U.S.D.B. 1	Promotrice

Blida, juillet 2022

REMERCIEMENTS

En premier lieu, on exprime notre profonde gratitude à Allah le Tout Puissant de nous avoir donné la force, la patience, le courage, et la volonté pour réaliser ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promotrice Dr N. BENTLEMSAN pour le temps qu'elle a consacré à nous apporter les outils aussi bien méthodologiques que scientifiques, indispensables à la conduite de cette recherche et qu'elle a tout autant su nous orienter et nous conseiller.

Nous exprimons également nos remerciements au Pr S. KENAI de nous avoir accepté dans son laboratoire de recherche et accorder sa confiance, ainsi qu'à monsieur W. YAHIAOUI et monsieur H.BENSACI maitres de conférences à l'université de Blida1 pour leurs judicieux conseils, les formations qu'ils nous ont accordé et leur orientation tout au long de notre cursus universitaire.

Nous exprimons notre sincère gratitude aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer notre travail.

Nos vifs remerciements vont à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil ainsi qu'à tous les techniciens et l'équipe du laboratoire de génie civil et géomatériaux de l'université de Blida1.

Nous souhaitons enfin, remercier les camarades, les amis du laboratoire et toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études.

Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être.

A ma sœur besma ainsi que son mari mounir

A mes tante fethia et souad ainsi que mes oncles mouhamed et tarek et leurs femmes faiza et rafika

A ma chère cousine yousra

A ma chère binôme Nihed pour sa patience, sa tolérance, et pour les bons moments qu'on a partagés ensemble durant notre cursus afin de donner naissance à ce projet et sa maman qui nous a aidé dans notre travail

Enfin pour tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié personne dans cette courte page.

Que Dieu le tout puissant vous préserve tous.

BANI Nerdjes Feriel

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

A mon modèle de sacrifice, d'amour et de générosité, la lumière de mon chemin et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, ma très chère maman que j'aime tellement

A ma grand-mère, qu'ALLAH lui accorde les plus hauts degrés du paradis.

A mon oncle Raouf ainsi que sa femme

A ma petite sœur Melissa

A ma chère binôme Nerdjes pour sa patience, sa tolérance, et pour les bons moments qu'on a partagés ensemble durant notre cursus afin de donner naissance à ce projet et sa maman qui nous a tant aidé dans notre travail

Enfin pour tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié personne dans cette courte page.

Que Dieu le tout puissant vous préserve tous.

KHELIFA Nihed

ملخص

تعد حماية البيئة من خلال إعادة تدوير النفايات أحد التحديات الرئيسية في قرننا هذا. تمثل النفايات الخاملة، خاصة من الصناعة، جزءًا مهمًا يضر بالبيئة من خلال تراكمها في الطبيعة.

الألياف الزجاجية هي إحدى الألياف التي تستخدم في قطاعات مختلفة. ومع ذلك، بين خردة الإنتاج والمواد التي انتهى عمرها، يصبح تراكم نفايات الألياف الزجاجية مشكلة.

الغرض من هذا العمل هو تبيين نفايات الألياف الزجاجية من خلال اعتماد ثلاث طرق لإعادة التدوير. وقد استخدمت هذه الألياف في صناعة ملاط مضغوط ذاتيًا. تم تحقيق إمكانية استبدال الرمل بـ 30٪ رمل رخامي.

تمت دراسة سلوك هذه الملاط في الحالة الطازجة (الانتشار، التدفق، الهواء المحبوس، الكثافة) وكذلك في الحالة (و الشعري) FVF المتصلبة (مقاومة الانضغاط، المسامية، الامتصاص).

تم الحصول على أفضل النتائج FVF و للرخام 30% + FVF

لكلمات المفتاحية: ملاط مضغوط ذاتيًا، إعادة التدوير، الألياف الزجاجية، الرخام

Résumé

La protection de l'environnement par le recyclage des déchets représente l'un des enjeux majeurs de notre siècle. Les déchets inertes, majoritairement issus de l'industrie, représente une partie non négligeable qui nuisent à l'environnement par leurs accumulations dans la nature.

La fibre de verre fait partie des fibres qui sont utilisées dans différents secteurs, Cependant, entre les rebuts de la production et les matériaux en fin de vie, l'accumulation des déchets de fibre de verre devient problématique.

Le but de ce travail est de valoriser les déchets des fibres de verre en adoptant trois méthodes de recyclage. Ces fibres ont été utilisée dans la confection des mortiers autoplaçants, La possibilité substitution du sable par le sable de marbre à 30% a été réalisée.

Le comportement de ces mortiers à l'état frais (étalement, écoulement, l'air occlus, masse volumique) ainsi qu'à l'état durci (résistance à la compression à la flexion, porosité, absorption capillaire) ont été étudiés.

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les fibres de verres en fil et les fibres de verre en fil +30% marbre.

Mots clés : motier autoplaçant, recyclage, fibre de verre, marbre

Abstract

Protecting the environment by recycling waste is one of the major challenges of our century. Inert waste, mainly from industry, represents a significant part that harms the environment through its accumulation in nature.

Fiberglass is one of the fibers that are used in different sectors. However, between production scrap and end-of-life materials, the accumulation of fiberglass waste becomes problematic.

The purpose of this work is to valorize waste glass fibers by adopting three recycling methods. These fibers have been used in the manufacture of self-compacting mortars. The possibility of replacing sand with 30% marble sand has been realized.

the behavior of these mortars in the fresh state (spreading, flow, entrapped air, density) as well as in the hardened state (compressive strength, porosity, capillary absorption) were studied.

The best results were obtained for FVF and FVF +30% marble.

Key words : self-compacting mortar, recycling, fiber glass, marble

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Pâte d'un mortier ordinaire.	23
Figure 1.2 : Constituants des mortiers.	25
Figure 1.3 : La différence entre les constituants des mortiers ordinaires et des mortiers autoplaçants.	26
Figure 1.4 : Mortier autoplaçant.	26
Figure 1.5 : Poudre de ciment courant.	28
Figure 1.6 : L'essai d'étalement au mini-cône.	38
Figure 1.7 : Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).	39
Figure 1.8 : Essai au cône de Marsh ou viscosimètre de Marsh.	40
Figure 1.9: Essai de compression.	40
Figure 1.10 : Essai de traction.	41
Figure 1.11 : Classification des déchets (%).	43
Figure 1.12 : Essais de la résistance à la traction.	48
Figure 1.13 : Vue microscopique de fibres d'amiante.	50
Figure 1.14 : Pales d'éoliennes fabriquées à partir de composites renforcés de fibres de carbone.	51
Figure 1.15 : Fibre de verre.	52
Figure 1.16 : Pyrolyse de pales éoliennes.	54
Figure 1.17 : Effets des adjuvants minéraux sur les courbes d'écoulement du mortier frais lors de l'essai initial.....	57
Figure 1.18 : L'effet du mélange des fibres et du cisaillement en rotation sur les propriétés rhéologiques du mortier frais.	58
Figure 1.19 : limite élastique et viscosité plastique du mortier binaire frais à base de ciment-cendres volante.	58
Figure 1.20 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à l'essai initiale pour mortier binaire ciment-cendres volante.	59
Figure 1.21 : Limite élastique et viscosité plastique du mortier binaire frais à base de ciment-cendres volante.....	60
Figure 1.22 : Indice rhéologique de mortier binaire ciment-cendres volantes sous différents volume de fibres de verre et mélange par cisaillement en rotation.	60
Figure 1.23 : L'étalement en fonction du type de béton.....	61
Figure 1.24 : La boîte en « L » en fonction du type de béton.	61

Figure 1.25 : La masse volumique en fonction des bétons (BAP).	62
Figure 1.26 : Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation.	62
Figure 1.27 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation.	63
Figure 1.28 : L'étalement en fonction de type de béton.	64
Figure 1.29 : La boîte en « L » en fonction du type de béton.	64
Figure 1.30 : La masse volumique en fonction du type de béton (BAP).	65
Figure 1.31 : Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation.	65
Figure 1.32 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation.	66
Figure 1.33 : Maniabilité du mortier avec longueur 2cm de Fpp.	67
Figure 1.34 : Maniabilité du mortier avec longueur 4cm de Fpp.	67
Figure 1.35 : La variation de l'absorption d'eau du mortier (L2-0.125%,L2-0.25%,L2-0.5%).	68
Figure 1.36 : La variation de l'absorption d'eau du mortier (L4-0.125%,L4-0.25%,L4-0.5%).	68
Figure 1.37 : La variation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types de mortier (L2-0.125%, L2-0.25%, L2-0.5%).	68
Figure 1.38 : La variation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types de mortier (L4-0.125%,L4-0.25%,L4-0.5%).	69
Figure 1.39 : La variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types du mortier (L2-0.125%, L2-0.25%, L2-0.5%).	70
Figure 1.40 : La variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types du mortier (L4-0.125%, L4-0.25%, L4-0.5%).	70
Figure 1.41 : Les différents types de marbre.	72
Figure 1.42 : (a) Carrière de marbre, (b) Déchets de marbre à l'état poudreux.	73
Figure 1.43 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre.	76
Figure 1.44 : Variation de la résistance à la compression.	77
Figure 1.45 : Résultats d'absorption d'eau.	77
Figure 1.46 : Résultats de la porosité.	78

Figure 2.1 : Sable de Baghlia	81
Figure 2.2 : Sable de Boughezoul.	81
Figure 2.3 : Sable corrigé.....	81
Figure 2.4 : Essai de l'équivalent de sable.	82
Figure 2.5 : Agitatrice électrique.....	83
Figure 2.6 : Courbes granulométriques des sables.....	84
Figure 2.7 : Tamiseuse électrique.	84
Figure 2.8 : Essai de la masse volumique apparente.....	85
Figure 2.9 : Essai de la masse volumique absolue.	86
Figure 2.10 : Essai de la masse volumique absolue du ciment.....	87
Figure 2.11 : Superplastifiant MEDAFLOW 30.....	87
Figure 2.12 : Courbe granulométrique du sable de marbre et du sable corrigé.....	88
Figure 2.13 : Sable de marbre obtenu.....	89
Figure 2.14 : Broyeur à billes.	90
Figure 2.15 : Représentation schématique d'un broyeur à billes ainsi que les billes réelles dans le broyeur.	90
Figure 2.16 : Résultat après 2h de broyage.....	91
Figure 2.17 : Concasseur.	91
Figure 2.18 : Fibres de verre obtenues après concassage.....	92
Figure 2.19 : Fibres de verre obtenues après mixage.....	92
Figure 2.20 : Fibres de verre déchiquetées à la main (FVF).	93
Figure 2.21 : Fibres de verre découpées au ciseau (FVD).....	93
Figure 2.22 : Moulin à café.....	94
Figure 2.23 : Fibres de verre coton (FVC).	94
Figure 2.24 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant.	95
Figure 2.25 : Séquence de malaxage du MAP à base de fibre de verre.	95
Figure 2.26 : Séquence de malaxage du MAP à base de sable de marbre.....	96
Figure 2.27 : Séquence de malaxage du MAP à base de fibre de verre et déchet de sable de marbre.....	96
Figure 2.28 : Malaxeur.	96
Figure 2.29 : Essai d'étalement au Mini-Cône.	97
Figure 2.30 : Dispositif de l'essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).	98
Figure 2.31 : Essai de l'air occlus.	98

Figure 2.32 : Moule prismatique à mortiers.	99
Figure 2.33 : Des éprouvettes 4×4×16 cm ³	100
Figure 2.34 : Essai de flexion pour MAP.	101
Figure 2.35 : Essai de compression pour MAP.....	102
Figure 2.36 : Absorption d'eau par succion capillaire.	103
Figure 2.37 : Scie pour préparation des éprouvettes.	104
Figure 2.38 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.	104
Figure 2.39 : Essai de la mesure de conductivité thermique.	105
Figure 2.40 : Organigramme des essais réalisés sur mortiers autoplaçants.....	106
Figure 3.1 : Etalement en fonction du dosage en superplastifiant.....	109
Figure 3.2 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.	110
Figure 3.3 : Absorption des fibres de verre en fonction du temps.	112
Figure 3.4 : Etalement en fonction du dosage en fibres de verre.....	114
Figure 3.5 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en fibres de verre.	115
Figure 3.6 : L'air occlus en fonction du dosage en fibres de verre.	116
Figure 3.7 : La masse volumique en fonction des fibres de verre.	116
Figure 3.8 : La résistance à la flexion à.....	118
Figure 3.9 : La résistance à la flexion à.....	118
Figure 3.10 : La résistance à la flexion à 28 jours.	118
Figure 3.11 : La résistance à la flexion (FVC) à 7/14/28 jours.....	119
Figure 3.12 : La résistance à la flexion (FVD) à 7/14/28 jours	119
Figure 3.13 : La résistance à la flexion (FVF) à 7/14/28 jours.	119
Figure 3.14 : La résistance à la compression à 7 jours.....	121
Figure 3.15 : La résistance à la compression à 14 jours.....	121
Figure 3.16 : La résistance à la compression à 28 jours.....	121
Figure 3.17 : La résistance à la compression (FVC) à 7/14/28 jours.	122
Figure 3.18 : La résistance à la compression (FVD) à 7/14/28 jours.....	122
Figure 3.19 : La résistance à la compression (FVF) à 7/14/28 jours.	122
Figure 3.20 : L'absorption capillaire en fonction du dosage des fibres FVC.	124
Figure 3.21 : L'absorption capillaire en fonction du dosage des fibres FVD.	124
Figure 3.22 : L'absorption capillaire en fonction du dosage des fibres FVF.....	124
Figure 3.23 : Sorptivité en fonction du dosage en fibres FVC.	125

Figure 3.24 : Sorptivité en fonction du dosage en fibres FVD.	125
Figure 3.25 : Sorptivité en fonction du dosage en fibres FVF.	125
Figure 3.26 : La porosité accessible à l'eau en fonction du dosage des fibres de verre. ...	126
Figure 3.27 : La densité en fonction du dosage des fibres de verre.	127
Figure 3.28 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité pour les fibres FVC.	128
Figure 3.29 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité pour les fibres FVC.	128
Figure 3.30 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité pour les fibres FVD.	128
Figure 3.31 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité pour les fibres FVD.	128
Figure 3.32 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité pour les fibres FVF.	129
Figure 3.33 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité pour les fibres FVF.	129
Figure 3.34 : Conductivité thermique en fonction des fibres FVC.	130
Figure 3.35 : Conductivité thermique en fonction des fibres FVD.	130
Figure 3.36 : Conductivité thermique en fonction des fibres FVF.	130
Figure 3.37 : Conductivité thermique en fonction du dosage en fibres de verre.	130
Figure 3.38 : Etalements en fonction du dosage des fibres FVF.	132
Figure 3.39 : Temps d'écoulement en fonction du dosage des fibres FVF.	133
Figure 3.40 : L'air occlus en fonction du dosage en fibres FVF.	134
Figure 3.41 : La masse volumique en fonction du dosage en fibres FVF.	134
Figure 3.42 : La résistance à la flexion à 7 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	135
Figure 3.43 : La résistance à la flexion à 14 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	135
Figure 3.44 : La résistance à la flexion à 28 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	136
Figure 3.45 : La résistance à la flexion à 7/14/28 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	136
Figure 3.46 : La résistance à la compression à 7 jours.	138
Figure 3.47 : La résistance à la compression à 14 jours.	138

Figure 3.48 : La résistance à la compression à 28 jours.....	138
Figure 3.49 : La résistance à la compression à 7/14/28 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	139
Figure 3.50 : L'absorption capillaire en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre. ..	140
Figure 3.51 : Sorptivité en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	141
Figure 3.52 : Sorptivité en fonction du dosage fibres de verre.	141
Figure 3.53 : Porosité en fonction du dosage en FVF +30% Marbre.....	142
Figure 3.54 : Densité en fonction du dosage en FVF +30% Marbre.	142
Figure 3.55 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité.	143
Figure 3.56 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité.	143
Figure 3.57 : Comparaison entre l'étalement de FVF et FVF+ Marbre.	143
Figure 3.58 : Comparaison entre le temps d'écoulement de FVF et FVF+ Marbre.	144
Figure 3.59 : Comparaison entre l'air occlus de FVF et FVF+ Marbre.	144
Figure 3.60 : Comparaison entre la masse volumique de FVF et FVF+ Marbre.....	145
Figure 3.61 : comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de la référence.	145
Figure 3.62 : Comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de 0,5 g/l de fibres FVF.	146
Figure 3.63 : Comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de 1 g/l de fibres FVF.....	146
Figure 3.64 : Comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de 1,5 g/l de fibres FVF.	146
Figure 3.65 : Comparaison entre la résistance à la flexion à 7jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.	147
Figure 3.66 : Comparaison entre la résistance à la flexion à 14jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.	148
Figure 3.67 : Comparaison entre la résistance à la flexion à 28jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.	148
Figure 3.68 : Comparaison entre la résistance à la compression à 7jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.	149
Figure 3.69 : Comparaison entre la résistance à la compression à 14jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.	149
Figure 3.70 : Comparaison entre la résistance à la compression à 28jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.	150

LISTE ES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Exemples de compositions de mortier de ciment.	24
Tableau 1.2 : Composition minéralogique et chimique du clinker.	29
Tableau 1.3 : Les différents types de ciment courants.	30
Tableau 1.4 : Classification des ciments selon leurs résistances mécaniques.	31
Tableau 1.5 : Classification de sables en fonction de sa composition (teneurs en % massique).	32
Tableau 1.6 : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement.	41
Tableau 1.7 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.	52
Tableau 1.8 : Liste des abréviations pour les types de BAP (Fibres de verre).	61
Tableau 1.9 : Liste des abréviations pour les types de BAP (Fibres métalliques).	63
Tableau 1.10 : Notations des fibres de polypropylène selon leurs longueurs.	67
Tableau 2.1 : Equivalent de sable de Baghlia et Boughezoul.	82
Tableau 2.2 : Masse volumique apparente des sables.	85
Tableau 2.3 : Masse volumique absolue des sables.	86
Tableau 2.4 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment.	86
Tableau 2.5 : Caractéristiques du « MEDAFLOW 30 ».	88
Tableau 2.6 : Caractéristiques physiques du marbre.	89
Tableau 2.7 : Caractéristiques chimiques du marbre.	89
Tableau 3.1 : Variation du dosage en superplastifiant.	108
Tableau 3.2 : Valeurs d'étalements des MAP en fonction du dosage en superplastifiant.	109
Tableau 3.3 : Valeurs du temps d'écoulement des MAP en fonction du dosage en superplastifiant.	110
Tableau 3.4 : Les valeurs du coefficient d'absorption des fibres de verre en fonction du temps.	112
Tableau 3.5 : Les différents mélanges et leurs désignation.	113
Tableau 3.6 : Valeurs d'étalements des MAP en fonction du dosage en fibres de verre. .	114
Tableau 3.7 : Valeurs du temps d'écoulement des MAP en fonction du dosage en fibres de verre.	115

Tableau 3.10 : Les valeurs de la résistance à la flexion.	117
Tableau 3.11 : Valeurs de la résistance à la compression.	120
Tableau 3.12 : Valeurs de l'absorption capillaire.	123
Tableau 3.13 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau.	126
Tableau 3.14 : Les équations de corrélation.	129
Tableau 3.15 : Valeurs d'étalements en fonction du dosage des fibres FVF.	131
Tableau 3.16 : Valeurs du temps d'écoulement en fonction du dosage des fibres FVF. ...	132
Tableau 3.17 : Valeurs de l'air occlus en fonction du dosage en fibres FVF.	133
Tableau 3.18 : Valeurs de la masse volumique en fonction du dosage en fibres FVF.	134
Tableau 3.19 : Valeurs de la résistance à la flexion.	135
Tableau 3.20 : Les valeurs de la résistance à la compression.	137
Tableau 3.21 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.	140
Tableau 3.22 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau.	142
Tableau 3.23 : Les équations de corrélation.	142

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
DÉDICACES	3
ملخص.....	5
Résumé	6
Abstract.....	7
LISTE DES FIGURES	8
LISTE ES TABLEAUX	14
TABLE DES MATIERES.....	16
Introduction générale.....	21
CHAPITRE 1 : Revue bibliographique.....	22
1.1. Généralités sur les mortiers :	23
1.1.1. Définition :.....	23
1.1.2. Les types de mortiers :.....	23
1.2. Les mortiers autoplaçants :	25
1.2.1 Applications :.....	26
1.2.2 Précautions particulières :.....	26
1.2.3 Structure du MAP :	26
1.2.4 Composition du mortier autoplaçant :.....	28
1.2.4.1. Le ciment :.....	28
1.2.4.2. Le sable :.....	31
1.2.4.3. L'eau de gâchage :	34
1.2.4.4. Les adjuvants :	34
1.2.4.5. Les additions minérales :.....	35
1.2.5 Formulation d'un mortier autoplaçant :.....	36
1.2.6 Caractérisation des MAP à l'état frais :.....	38
1.2.6.1 Essai d'étalement au mini-cône :.....	38

1.2.6.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) :	38
1.2.6.3	Essai au cône de Marsh (Essai de saturation) :	39
1.2.7	Caractéristiques des MAP à l'état durci :	40
1.2.7.1	Résistance à la compression :	40
1.2.7.2	Résistance à la flexion :	40
1.3.	Valorisation des déchets dans le domaine de construction :	41
1.3.1	Les déchets dans l'histoire :	41
1.3.2	Définition des déchets :	42
1.3.3	Classification des déchets :	42
1.3.3.1	Déchets inertes (DI) :	42
1.3.3.2	Déchets industriels banals (DIB) :	42
1.3.3.3	Déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD) :	43
1.3.4	Type de valorisation des déchets :	43
1.3.4.1	Broyage-stérilisation :	43
1.3.4.2	La pyrolyse et la gazéification :	43
1.3.5	Le recyclage :	44
1.3.5.1	Les avantages du recyclage :	45
1.4.	Mortier à base de déchets de fibre de verre :	45
1.4.1	Historique des fibres :	45
1.4.2	Définition des fibres :	46
1.4.3	Propriétés des fibres :	46
1.4.3.1.	La notion de fibres structurales :	46
1.4.3.2.	Le facteur d'élanement :	46
1.4.3.3.	La performance :	46
1.4.3.4.	La valeur de résistance résiduelle :	47
1.4.3.5.	La distribution des contraintes mécaniques :	47
1.4.3.6.	La résistance à l'abrasion :	48

1.4.3.7.	Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres :.....	48
1.4.4.	Différentes natures de fibres :.....	49
1.4.4.1.	Fibres naturelles :.....	49
1.4.4.2.	Fibres organiques :.....	49
1.4.4.3.	Fibres Métalliques :.....	50
1.4.4.4.	Fibres minérales :.....	50
1.4.5.	Les fibres de verre :.....	51
1.4.5.1.	Applications :.....	52
1.4.5.2.	Les avantages des fibres de verres :.....	52
1.4.5.3.	Classification des fibres de verre :.....	53
1.4.5.4.	Le traitement et le recyclage des déchets de fibre de verre :.....	53
1.4.5.5.	Effet des déchets de fibre de verre sur mortier et béton :.....	57
1.5.	Mortier à base de déchets de marbre :.....	71
1.5.1.	Historique du marbre :.....	71
1.5.2.	Déchet de marbre :.....	72
1.5.2.1.	Définition :.....	72
1.5.2.2.	Composition du marbre :.....	73
1.5.2.3.	Le recyclage des déchets de marbre :.....	74
1.5.2.4.	Utilisation des déchets de marbre dans le bâtiment :.....	74
1.5.2.5.	Les avantages de la poudre de marbre :.....	74
1.5.2.6.	Effet des déchets de marbre sur le mortier et béton à l'état frais :.....	75
1.5.2.7.	Effet des déchets de marbre sur le mortier et béton à l'état durci :.....	76
1.6.	Conclusion :.....	79
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS.....		80
2.1	Introduction :.....	81
2.2	Caractéristiques des matériaux utilisés :.....	81
2.2.1	Sable :.....	81

2.2.1.1	Essai de l'équivalent de sable :	82
2.2.1.2	Essai de l'analyse granulométrique :	83
2.2.1.3	Essai de la masse volumique apparente :	85
2.2.1.4	Essai de la masse volumique absolue :	85
2.2.2	Ciment :	86
2.2.3	Eau de gâchage :	87
2.2.4	Superplastifiant :	87
2.2.5	Sable de déchet de marbre :	88
2.2.6	Les fibres de verres :	89
2.3	Formulation des mortiers :	94
2.4	Les essais réalisés sur MAP à l'état frais :	97
2.4.1	Essai d'étalement au Mini-Cône :	97
2.4.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel) :	97
2.4.3	L'essai de l'air occlus :	98
2.4.4	Essai de la masse volumique du mortier :	99
2.5	Les essais réalisés sur MAP à l'état durci :	99
2.5.1	La résistance à la traction par flexion :	100
2.5.2	La résistance à la compression :	101
2.5.3	Absorption capillaire :	102
2.5.4	Porosité accessible à l'eau :	103
2.5.5	La conductivité thermique :	105
2.6	Conclusion :	106
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS		107
3.1.	Introduction :	108
3.2.	Optimisation du superplastifiant :	108
3.2.1.	Essai d'étalement au Mini-Cône :	109
3.2.2.	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).....	110

3.3. Effet des déchets de fibres de verre recyclées :	111
3.3.1. L'absorption de l'eau par les fibres de verre :	111
3.3.2. Les essais réalisés à l'état frais :	113
3.3.2.1. Mini cône :	113
3.3.2.2. V-Funnel :	115
3.3.2.3. Air occlus et masse volumique :	116
3.3.3. Les essais réalisés à l'état durci :	117
3.3.3.1. La résistance à la flexion :	117
3.3.3.2. La résistance à la compression :	119
3.3.3.3. Absorption capillaire :	123
3.3.3.4. Porosité accessible à l'eau :	126
3.3.3.5. Conductivité thermique :	129
3.4. Effet de la combinaison des fibres de verre et sable de marbre :	131
3.4.1. Les essais réalisés à l'état frais :	131
3.4.1.1. Mini cône :	131
3.4.1.2. V-Funnel :	132
3.4.1.3. Air occlus et masse volumique :	133
3.4.2. Les essais réalisés à l'état durci :	135
3.4.2.1. La résistance à la flexion :	135
3.4.2.2. La résistance à la compression :	137
3.4.2.3. Absorption capillaire :	139
3.4.2.4. Porosité accessible à l'eau :	141
3.5. Comparaison entre les FVF et leurs mélange avec 30% de sable de marbre : ...	143
3.5.1. A l'état frais :	143
3.5.2. A l'état durci :	147
3.6. Conclusion Générale :	151
Références bibliographiques	153

Introduction générale

Le monde a considérablement changé au cours du dernier siècle, il a connu des transformations, et des mutations économiques, politiques, sociales, technologiques, et surtout écologiques.

Les recherches actuelles dans le domaine des matériaux de construction sont orientées vers l'utilisation de nouveaux matériaux sous forme de fibres, poudres, granulats légers et sables recyclés pour assurer d'une part, la pérennité des sables naturels conventionnels, l'allègement des éléments de construction, d'autre part une promotion de nouveaux matériaux de terrain et la mise en évidence de l'aspect écologique (recyclage des déchets solides).

Les mortiers présentent une durabilité améliorée et très bonne résistance à la compression, mais présente une faible résistance à la traction, donc il reste toujours un matériau fragile et vulnérable.

Une des alternatives qui peut faire face à cette faiblesse de la résistance à la traction des mortier l'ajout de fibres et poudres font l'objet de plusieurs recherches. Ces derniers présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques intéressantes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique des mortiers, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail est de formuler des mortiers avec des déchets de fibres de verre préparées avec différentes méthodes de recyclage à des dosages variant de 0.5, 1, 1.5 kg/m³ et des mortiers avec des fibres de verre et granulats recyclés. En fonction de la fibre utilisée, de son dosage, de la qualité de la matrice mais aussi de la mise en œuvre, les propriétés peuvent varier de manière significative.

Le présent manuscrit de notre travail comporte trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue bibliographique sur les déchets de fibres de verre ainsi que leur recyclage, nous aborderons aussi l'utilisation des déchets de marbre en tant que sable recyclé.

Le deuxième chapitre comprend une description des matériaux utilisés et les méthodes des différents essais sur le MAP à l'état frais et à l'état durci.

Dans le troisième chapitre, nous reportons les différents résultats ainsi que les discussions et on finit par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.1. Généralités sur les mortiers :

1.1.1. Définition :

Dans toute structure, il est important de relier divers éléments (blocs de béton, briques, éléments préfabriqués en béton, etc.) à du mortier de ciment ou d'autres liants qui a pour but de :

- Solidariser les éléments entre eux.
- Assurer la stabilité de l'ouvrage.
- Comblent les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est un matériau composite hétérogène. Au niveau macroscopique, il présente une structure constituée de pâte de ciment, de différentes tailles, formes, pores et microfissures dans la zone de transition interfaciale autour des grains de sable. Le comportement mécanique en traction d'un mortier dépend de sa microstructure, de sa qualité et de l'interface agrégat-matrice. [1][2]



Figure 1.1 : Pâte d'un mortier ordinaire. [3]

1.1.2. Les types de mortiers :

Les mortiers se partagent en différents types : [4]

➤ Les mortiers de ciment :

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables La quantité de dosage habituelle est de 300 à 400 kg de ciment pour 1m³ de sable.

Tableau 1.1 : Exemples de compositions de mortier de ciment. [5]

Matériaux	Pose de briques et blocs	Mortier de chape
Utilisation		
Ciment	50Kg	50Kg
Sable	120 à 130 kg	180Kg
Eau	50 litres	50 litres
Nature du mélange	Onctueux	Pâteux

➤ **Les mortiers de chaux :**

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux, ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment surtout si la chaux est calcique.

➤ **Les mortiers bâtards :**

Un mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir ensemble les propriétés de ces deux liants. Généralement, la chaux et le ciment sont utilisés en proportions égales. Cependant, il est plus ou moins utilisé selon l'application et la qualité recherchée.

➤ **Les mortiers réfractaires :**

Il est fabriqué avec du ciment fondu qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues.

➤ **Les mortiers rapides :**

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

➤ **Mortier industriel :**

Ce sont des mortiers fabriqués à partir de matériaux secs, soigneusement sélectionnés et emballés dans des sacs contrôlés en usine et parfaitement réguliers pour l'utilisation de ce type de mortier. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits pour répondre à tous les besoins :

- ❖ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- ❖ Mortiers d'imperméabilisation.

- ❖ Mortier d'isolation thermique.
- ❖ Mortier de jointoiment.
- ❖ Mortier de ragréage.
- ❖ Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- ❖ Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- ❖ Mortier de réparation. [4]

1.2. Les mortiers autoplaçants :

Le mortier autoplaçant MAP se caractérise par sa grande fluidité et sa grande capacité de remplissage. Il garantit également d'excellentes performances mécaniques et une grande durabilité. Ces propriétés sont directement liées à leur composition. En effet, des études récentes ont montré que le MAP est formulé différemment du mortier ordinaire. Le MAP contient des éléments plus fins et doit contenir au moins un additif minéral et une forte dose de réducteur d'eau à haute performance. [6]

Le mortier autoplaçant est une alternative économique au coulis de ciment et offre également une excellente stabilité volumique. Il se compose de ciment, d'eau, de sable, et d'adjuvant spécialisé. Ce produit peut être pompé pour être mis en place. [6]

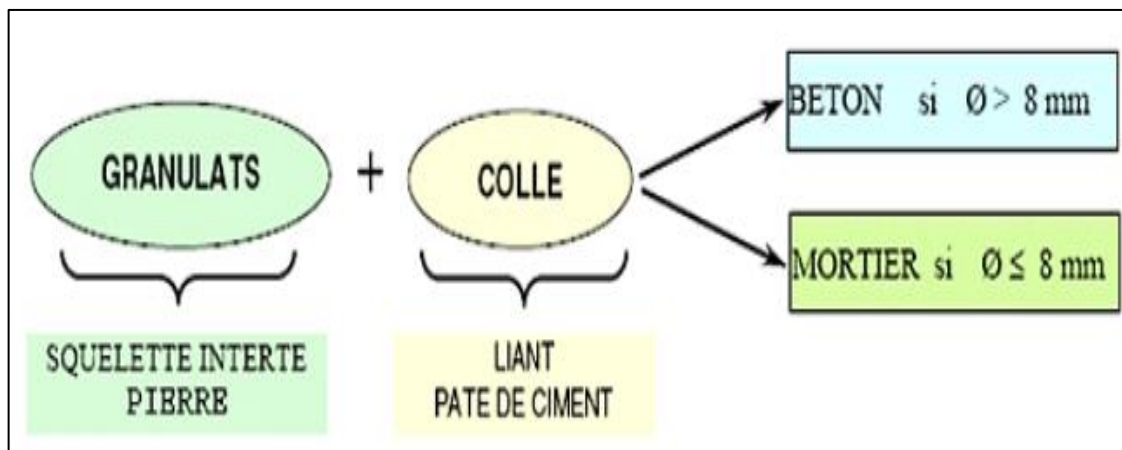


Figure 1.2 : Constituants des mortiers. [6]

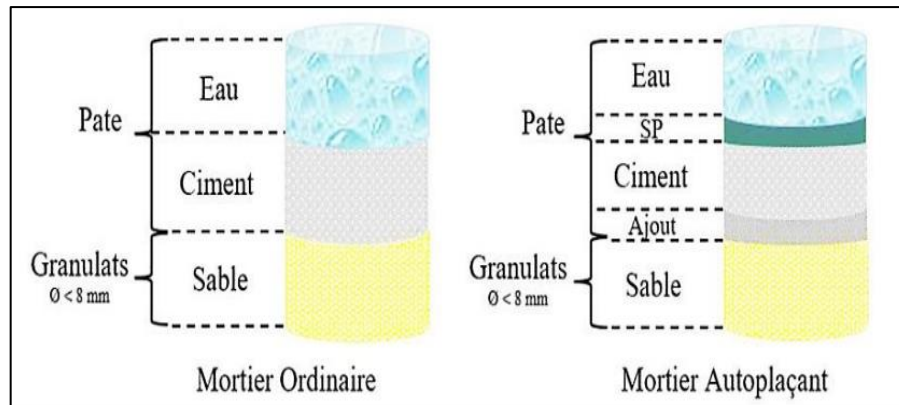


Figure 1.3 : La différence entre les constituants des mortiers ordinaires et des mortiers autoplaçants. [6]

1.2.1 Applications :

Le mortier autoplaçant est généralement utilisé pour remplir les conduites, les réservoirs souterrains, les tunnels, les espaces vides ou des chambres abandonnées.

Le mortier autoplaçant peut être injecté jusqu'à 100 mètres de distance pendant 2 heures (jusqu'à 3 heures). [7]

1.2.2 Précautions particulières :

Le mortier autoplaçant est très fluide et facile à couler là où il y a des ouvertures ou des pentes. Le sable contient jusqu'à environ 5% d'agrégat > 5mm. Une crépine peut être utilisée dans le cas où un grand volume est pompé dans une très petite ouverture. [3]



Figure 1.4 : Mortier autoplaçant. [3]

1.2.3 Structure du MAP :

La structure du MAP est basée sur une formulation de pâte et de mortier cimentaire autoplaçants qui offrira un comportement optimal en termes de stabilité et de fluidité, en

utilisant des matériaux dans les proportions appropriées de chaque constituant. Un programme expérimental est mis en œuvre afin de délimiter un domaine de MAP qui offrira un ensemble de mélanges homogènes et stables aux propriétés d'écoulement mesurables. Cependant, afin d'obtenir un mélange de composants possédant les réponses optimales, un plan de mélanges sera élaboré permettant d'obtenir un grand nombre d'informations (rôle des composants, interactivité) avec un minimum d'essais.

Le rôle de l'expérimentateur et la démarche expérimentale d'élaboration de la pâte de ciment sont deux facteurs importants, compte tenu de la sensibilité du comportement de cette dernière.

La pâte de ciment est composée de quatre composants (ciment, fillers, plastifiant, eau). [3]

- **Un volume de pâte élevé :**

Les frottements entre les gravillons limitent l'écoulement des mortiers. Pour cette raison, le MAP contient un volume de pâte important dont le rôle est de séparer les gravillons les uns des autres. [8]

- **Une quantité importante de fines :**

Les MAP contiennent plus de fines que les mortiers afin d'assurer une maniabilité suffisante tout en limitant le risque de ségrégation et de ressuage. Cependant, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation et de réduire leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [7] voire ternaire [9] composé de ciment portland mélangé avec des cendres volantes, de laitier, des fillers de calcaire, des pouzzolanes naturelles ou de la fumée de silice.

- **Un fort dosage de superplastifiant :**

L'introduction de dosage relativement élevé de superplastifiant dans les MAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en maintenant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé [10] peut augmenter la sensibilité du mortier à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

- **Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal :**

Bien que ce ne soit pas systématique, les MAP contiennent la plupart du temps un agent colloïdal [11]. Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de

limiter les risques de ségrégation des granulats en épaississant la pâte. De manière générale, l'utilisation de ce produit semble se justifier pour les mortiers à fort rapports eau/liant car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le mortier. En revanche, il semble inutile dans le cas des MAP avec de faibles rapports massiques eau/liant et des résistances supérieures à 50 MPa. L'agent colloïdal a la réputation de rendre les MAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis aux problèmes de ségrégation et de ressuage. [12] [13]

1.2.4 Composition du mortier autoplaçant :

1.2.4.1. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique. En d'autres termes, il s'agit d'une substance minérale finement broyée qui, lorsqu'elle est mélangée à de l'eau, forme une pâte, qui fait prise et durcit par le processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même dans l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment repose principalement sur l'hydratation des silicates de calcium. Les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement du ciment. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. [14]



Figure 1.5 : Poudre de ciment courant. [15]

a. Les constituants du ciment :

➤ Le clinker :

C'est un produit qui est homogénéisé par cuisson jusqu'à ce que le mélange (calcaire + argile) soit partiellement fondu, avec la chaux (CaO), la silice (SiO₂) et l'alumine (Al₂O₃) comme composants principaux.

Le mélange est généralement fabriqué à partir de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) agissant comme régulateur, donne des Portland. [16]

Les éléments simples (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants :

- Silicate tricalcique (C_3S) : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Alite).
- Silicate bicalcique (C_2S) : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Belite).
- Aluminate tricalcique (C_3A) : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$.
- Ferroaluminate calcique (C_4AF): $4\text{CaO} .\text{Al}_2\text{O}_3 .\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Célite)

Tableau 1.2 : Composition minéralogique et chimique du clinker. [17]

Composants Minéralogiques	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne (%)
C_3S	40-70	60
C_2S	00-30	15
C_3A	02-15	08
C_4AF	00-15	08
Oxydes	/	/
CaO	60-69	65
SiO_2	18-24	21
Al_2O_3	04-08	06
Fe_2O_3	01-08	03
MgO	<05	02
$\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}_3$	<02	01
SO_3	<03	01

➤ **Le gypse (CaSO_4) :**

L'ajout de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, en particulier de ceux qui contiennent des taux importants d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment se produit dans les 30 minutes suivant le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait instable et pourrait intervenir rapidement.

b. Classification des ciments en fonction de leur composition :

Tableau 1.3 : Les différents types de ciment courants. [18]

Désignations	Types de Ciments	Teneur en clinker	Teneur en % des autres constituants	Teneur en constituants secondaires (filler)
C P A- CEM I	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
C PJ-CEM II/A	Ciment portland Composé	80 à 94%	- 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où les constituant sont des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%	0 à 5%
CPJ-CEMII/B		79%	- 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5%
CHF-CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64%	- 35 à 65 % de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CHF-CEM III/B		20 à 34%	- 66 à 80 % de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CLK-CEMIII/C		5 à 19%	- 81 à 95% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CPZ-CEMIV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	- 10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%.	0 à 5%
CPZ-CEMIV/B		45 à 64%	- 36 à 55 % comme ci-dessus	0 à 5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	- 18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
CLC-CEM V/B		20 à 39%	- 31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5%

c. Classification des ciments selon leurs résistances mécaniques :

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression ; exprimées en MPa à 28 jours.

Tableau 1.4 : Classification des ciments selon leurs résistances mécaniques. [19]

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32,5 N	/	32,5	52,5
32,5 R	$\geq 13,5$		
42,5 N	$\geq 12,5$	42,5	62,5
42,5 R	≥ 20		
52,5 N	≥ 20	52,5	/
52,5 R	≥ 30		

1.2.4.2. Le sable :

a. Définition:

Le sable est défini comme la fraction des agrégats pierreux dont la granulométrie est comprise entre $5\mu\text{m}$ et $80\mu\text{m}$; il s'agit d'une définition globale avec des limites différentes pour chaque classification, c'est un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à $80\mu\text{m}$ ne dépasse pas 30%. Dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5mm des fines. [20]

Les sables rencontrés résultent de la décomposition chimique ou de la désintégration mécanique des roches, suivie du processus de transport qui est à l'origine de leurs propriétés physico-chimiques ; les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils impliquent, dans une plus ou moins grande mesure, la décomposition de diverses roches sur le terrain, suivie d'un transport fluviatile et parfois éolien. [20]

b. Classification des sables :

➤ **Selon l'origine :**

Le sable, en fonction de son origine, peut être classé en trois catégories :

- **Naturel:** d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières), de roches massives (sédimentaire, éruptives, métamorphique, etc.) ou de

dunes. Le sable naturel n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
 - **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées.
- **Selon la composition :**

En fonction de sa composition minéralogique (teneurs en silice, alumine et chaux), le sable peut être classé en quatre catégories :

Tableau 1.5 : Classification de sables en fonction de sa composition (teneurs en % massique). [21]

Composition	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)
Siliceux	70 à 90	0,1 à 1	1 à 10
Silico-alumineux	50 à 70	1 à 5	10 à 25
Silico-calcaires	15 à 20	15 à 30	3 à 10
Calcaires	2 à 10	30 à 50	0,5 à 2

➤ **Selon la densité :**

Selon la densité de sable, on distingue trois types :

- **Léger** : de masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³, et le plus usuel est à base d'argile expansée, de schiste expansés ou de laitier expansé.
- **Courant** : de masse volumique entre 2000 et 3000 kg/m³, c'est généralement les basaltes, quartzites, grès, porphyre, diorite, granites, schistes, laitier.
- **Lourd** : de masse volumique varie de 4000 à 8000 kg/m³, le plus utilisé est la barytine (d'une densité absolue de 4,2 à 4,7), la magnétite (d'une densité absolue de 4,5 à 5,1), les riblons (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8) et la grenaille (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8).

➤ **Selon la forme :**

Selon la forme de sable, on peut désigner deux grands types :

- Roulé : dont la forme a été acquise par l'érosion de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières) ou des dunes.
- Angulaire ou Concassé : dont la forme a été obtenue par abattage et concassage de roches massives et dures. [22]

c. Types de sable :

- **Sable alluvionnaire :**

Le sable alluvionnaire aussi appelé sable roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion dérive de roches, meubles, des dépôts, des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Les roches varient selon le lieu d'origine, mais la plupart du sable utilisé pour le béton est siliceux.

Recommandé pour la fabrication du béton, ce sable doit avoir une granulométrie de façon à ce que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faibles proportions. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis qu'un sable trop grossier entraînera une plasticité insuffisante du mélange, rendant la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée par le module de finesse (Mf).

- **Sable de dune :**

Le sable de dune est un produit de l'effondrement lent des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air et la pluie. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire.

Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté d'aspect, constitue une solution au problème d'épuisement des ressources naturelles, et tient sa position de matériau d'avenir. [23]

d. Module de finesse (Mf) :

C'est une caractéristique importante, en particulier dans le cas des sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse (Mf) compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable contient la plupart des éléments fins et des éléments très fins, il faut donc augmenter le dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin.

- $1.8 \leq M_f \leq 2.2$: Le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- $2.2 \leq M_f \leq 2.8$: le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- $2.8 \leq M_f \leq 3.2$: le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- **Pour $M_f > 3,2$** : le sable est à rejeter.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons (NF P18-540). [17]

1.2.4.3. L'eau de gâchage :

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre ne contenant aucune impureté nuisible (matières organiques, alcalis). Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé, Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. [24]

L'eau de gâchage ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés physiques et mécaniques (résistance, prise et consistance), les propriétés esthétiques (tache, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du mortier). L'eau ajoutée assure deux fonctions principales, l'hydratation de ciment pour la prise et le durcissement, et l'amélioration de la maniabilité à l'état frais, ainsi que d'autres fonctions, mouillage des granulats et véhicule des adjuvants. [25]

1.2.4.4. Les adjuvants :

Ce sont des produits qui sont ajoutés à moins de 5% du poids du liant au moment du malaxage des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont encore frais pour améliorer certaines de leurs propriétés. Cette définition ne considère pas comme adjuvants des produits ajoutés au moment du broyage du clinker. Les adjuvants ne sont pas des panacées permettant de transformer un béton médiocre en béton de bonne qualité. Cependant, dans de nombreux cas, ces produits permettent d'effectuer des travaux que les moyens traditionnelles ne le permettent pas. [26]

Il existe plusieurs types d'adjuvants :

- **Hydrofuges de masse** : Leur principale fonction est de réduire la porosité du béton. Ils agissent sur les pores du béton en les colmatant. On les utilise en milieux agressifs ou pour la réalisation d'ouvrages tels que les fondations, les radiers, les piscines etc.
- **Accélérateurs de prise** : Les accélérateurs de prise sont utilisés pour éviter que les températures basses ne bloquent la prise du béton en le transformant en glace lors de la prise, ou pour accélérer sa montée en résistance. Ils sont employés pour les ouvrages épais ou volumineux particulièrement sensibles au gel en raison d'une prise plus longue.
- **Retardateurs** : Contrairement aux accélérateurs de prise, les retardateurs ont pour but de retarder la prise ce qui peut être utile en cas de fortes chaleurs, ou lorsqu'il faut attendre un certain temps avant de couler le béton (comme le transport). La plupart des retardateurs de prise se présentent sous forme liquide. [27]

1.2.4.5. Les additions minérales :

Les additions minérales sont des produits de dimensions inférieures à 80µm récupérés des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches par broyage. Pour améliorer les propriétés rhéologiques des BAP, l'addition des fines inertes ou réactives est importante, leur présence peut remplacer une quantité de ciment dans la formulation et réduit la chaleur d'hydratation ce qui réduit le retrait endogène. [28]

- **Filler calcaire :**

Les additions calcaires sont des produits secs obtenus par broyage et/ou sélection de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) les fillers calcaires présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse. [29]

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée < 80 micron.

- **Cendres volantes :**

Les cendres volantes sont des particules non combustibles pulvérulentes de grande finesse entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les

chaudières des centrales thermiques de minéraux solides. Les particules de cendres volantes sont sphériques ce qui est bénéfique en termes de la demande en eau. Elles se présentent sous forme de poudre grise noirâtre. [30]

- **Laitiers de hauts fourneaux :**

C'est un résidu minéral issu du traitement de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. La composition chimique comporte de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine entre (15 à 20 %) et 10% environ de magnésie. Trempé à l'air ou à l'eau, le laitier est principalement vitreux. Il est broyé et ajouté au clinker dans diverses proportions. Le laitier peut être introduit dans les matrices cimentaires par différents taux de substitution. Les laitiers améliorent la durabilité des mortiers et des bétons grâce à leur capacité de lier la chaux et augmentent les performances mécaniques à long terme.

- **Fumées de silice :**

La fumée de silice est un produit en poudre ultrafine provenant des usines de fabrication d'alliage de silicium et de Ferrosilicium obtenu à partir de quartz et de carbone de haute pureté dans un four à arc électrique. [31]

La fumée de silice représente une poudre de silice très fine (inférieur à $1\mu\text{m}$), environ 100 fois plus petites que les grains de ciment ($\text{SSB} = 20000 \text{ m}^2 / \text{kg}$). Sa forte teneur en silice amorphe (vitreuse) et sa finesse qui complète la granulométrie des ciments confère à la fumée de silice des propriétés pouzzolaniques. Les propriétés des fumées de silice sont assez diverses. Conformées à la norme NF EN 13263- 1+A1, elle confère au béton de très bonnes propriétés rhéologiques, mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité.

1.2.5 Formulation d'un mortier autoplaçant :

- **Méthode d'Okamura :**

La formulation des MAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sûre, en priorisant le volume de pâte au détriment des agrégats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'être économiquement optimal. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

- **Dosage des gravillons :** Le risque de blocage est minimisé si le volume du gravillon pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition,

la compacité d'un mélange de particule est le rapport du volume des particules et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

- **Dosage du sable :** Le volume du sable est fixé à un taux de 40% du volume de mortier ou du béton. La fluidité du béton est garantie en réduisant le frottement des particules.
- **Dosage du liant :** La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes. Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- **Dosage de l'eau et du superplastifiant :** Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers (essai d'étalement au mini-cône et d'écoulement à l'entonnoir), dont le volume de sable est fixé à 40 %. [32]

➤ **L'approche suédoise :**

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S, le volume de pâte critique pour le blocage est estimé, le rapport G/S est maintenu, et les propriétés rhéologiques recherchées sont vérifiées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour fournir une viscosité appropriée, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche améliore l'optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type d'agrégats. [8]

➤ **L'approche LCPC :**

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible [33] [34] qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par des particules solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Cette approche est basée sur l'intégration de 15 années de recherche et est simplifiée par la mise en place d'un logiciel (BétonlabPro2) qui prend en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [33] et permet la détermination des formulations de différents

types de bétons (Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants).

Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs [34] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la compression et à la traction).

1.2.6 Caractérisation des MAP à l'état frais :

1.2.6.1 Essai d'étalement au mini-cône :

L'essai consiste à remplir un mini-cône en MAP et à le soulever verticalement. Lorsque le cône est retiré, le MAP s'étale sur la plaque. Après l'arrêt de l'écoulement, on mesure l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires d_1 et d_2 . L'étalement final est la moyenne des deux valeurs obtenues. Le temps d'écoulement T25 (le temps qu'il faut au mortier pour s'étaler et atteindre un diamètre de 25 cm) est également mesuré pour estimer empiriquement la viscosité du MAP. Un contrôle visuel de la galette du mortier est aussi effectué pour voir s'il y a ou non une ségrégation ou un ressuage. [35]

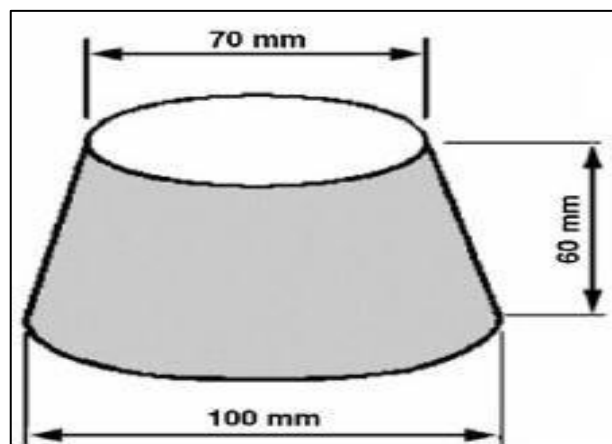


Figure 1.6 : L'essai d'étalement au mini-cône. [35]

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

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-Funnel test) permet d'évaluer la fluidité et la viscosité des MAP. Un entonnoir de dimensions définies est rempli de mortier jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, on mesure le temps (T_v) que met le mortier à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide. Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du mortier. Si le mortier s'écoule plus rapidement, la viscosité est trop faible.

Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du MAP que celle de l'écoulement. La forme du cône inversée fera bloquer l'écoulement du mortier si, par exemple il y a de gros granulats. D'autre part, un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité en raison d'une viscosité élevée de la pâte et/ou un frottement intergranulaire élevé.

Cet essai définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-Funnel) : $T_v \leq 6$ secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et $9 \leq T_v \leq 25$ pour les autres cas. [36]



Figure 1.7 : Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel). [8]

1.2.6.3 Essai au cône de Marsh (Essai de saturation) :

Cette méthode est utilisée depuis longtemps par l'industrie pétrolière pour mesurer la fluidité des coulis de ciment ou de bentonite. C'est pourquoi cette technique est adoptée pour la mesure de la fluidité et l'étude des propriétés rhéologiques des coulis de ciment.

Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant un volume donné de pâte à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre. Le cône de Marsh doit être solidement fixé pour ne pas être déplacé par les vibrations et sa partie supérieure doit être horizontale. [37]

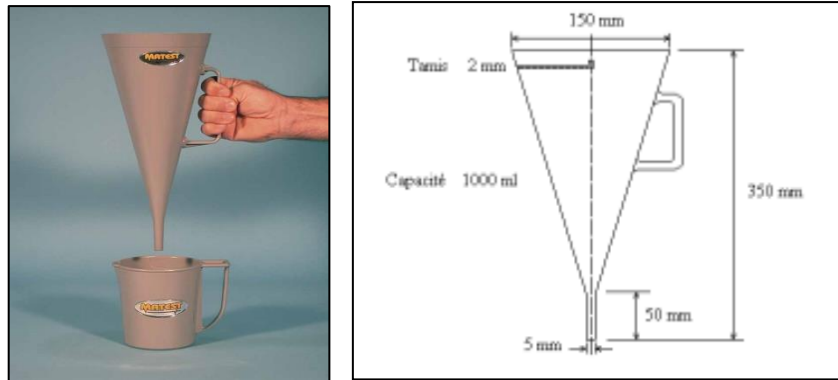


Figure 1.8 : Essai au cône de Marsh ou viscosimètre de Marsh. [37]

1.2.7 Caractéristiques des MAP à l'état durci :

1.2.7.1 Résistance à la compression :

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques, cubiques ou prismatiques selon la norme EN 196-1 [38]. L'essai de compression se fait sur des éprouvettes prismatiques qui ont été préalablement écrasées par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture dans une presse hydraulique d'une capacité de 2000 kN, cette presse est muni d'un affichage digital permettant d'entrer la surface de l'éprouvette, la vitesse de chargement (2,5 kN/s) et d'obtenir la résistance à la compression. [35]

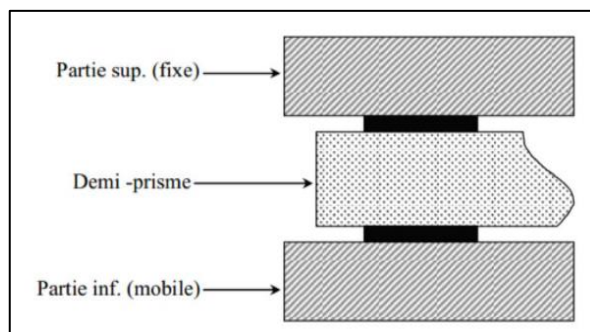


Figure 1.9: Essai de compression. [19]

1.2.7.2 Résistance à la flexion :

La résistance à la flexion des mortiers est mesurée sur des éprouvettes. Le prisme est centré entre les deux appuis de l'appareil (l'un fixe et l'autre mobile). La force de flexion et la contrainte sont affichées sur l'écran de l'appareil. La résistance à la flexion est la moyenne de trois mesures de chaque pourcentage. Les essais seront effectués conformément à la Norme EN 196-1. [39]

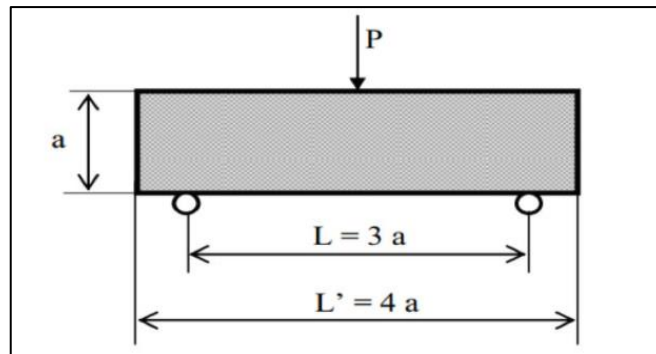


Figure 1.10 : Essai de traction. [19]

1.3. Valorisation des déchets dans le domaine de construction :

1.3.1 Les déchets dans l'histoire :

Les déchets sont apparus dans l'activité humaine lorsque les habitants jetaient leurs ordures par les portes et les fenêtres au moyen âge, la taille des villes augmentait et les déchets des citadins été jetés dans la rue ou dans les rivières, provoquant des problèmes de salubrité. Les habitudes de consommation héritées de la révolution industrielle du XIXe siècle croissaient de plus en plus. Le début du XXème siècle est marqué par une production diversifiée des déchets liée à la révolution technologique.

La croissance rapide économique dans lequel les biens sont produits à partir de matières premières vendus à engendrée une augmentation importante des volumes de déchets sur le territoire urbain. Cette situation, dont les effets sont visibles par tous, engendre des nuisances importantes pour les habitants et a des conséquences néfastes rejets ce qui fait d'elle une problématique nouvelle. Mise en décharge sauvage l'utilisation inconsidérée des ressources et l'élimination des déchets dans l'environnement contribuent à la dégradation du milieu. [40]

Tableau 1.6 : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement. [41]

Produit	Temps de dégradation
Chaussures en cuir	25 à 40 ans
Tissu en nylon	30 à 40 ans
Boite de conserve	50 à 100 ans
Sac plastique	400 ans
Bouteilles en plastique	400 ans
Bouteilles verre	4 000 ans

1.3.2 Définition des déchets :

Plusieurs définitions ont été données à la notion du mot "Déchet" :

- Certains mots sont utilisés, dans le langage courant, désignant « déchets » comme : une ordure, une immondice, une chute, un reste et tout autre résidu rejet par ce qu'il n'est plus consommable ou utilisable et donc, n'a pas de valeur. [42]
- Au sens de la loi algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001 (Article3), on entend par déchet « Tout résidu du processus de production, de transformation ou d'utilisation plus généralement, tout matériel, produit ou bien meuble dont le propriétaire a été abandonné ou prévoit d'en disposer ou a l'obligation d'ignorer ou de l'éliminer» [43]
- Au sens de la loi française un déchet est défini comme « toute substance, qui est de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement». [43]

1.3.3 Classification des déchets :

Les granulats recyclés sont générés à partir des déchets de construction ou de démolition. Ces déchets de chantier sont constitués de résidus des processus de production et de transformation comme les déchets chimiques et les emballages.

Ces déchets de démolition font partis des déchets industriels dans la classification usuelle. Il est donc nécessaire de distinguer les différentes catégories des déchets industriels. [44]

1.3.3.1 Déchets inertes (DI) :

Ce sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique d'une manière susceptible de polluer l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont autorisés dans les installations de stockage et proviennent principalement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. [45]

1.3.3.2 Déchets industriels banals (DIB) :

Ils comprennent tous les déchets non dangereux produits par les industriels et les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des

déchets d'entretien et les matériels en fin de vie. Certains déchets inertes sont concassés, criblés, transformés en granulats pour être réutilisés dans les travaux publics. [45]

1.3.3.3 Déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD) :

En opposition avec les DIB, ce type de déchet est traité par des procédés qui diffèrent de ceux employés pour les résidus ménagers, ils contiennent des substances dangereuses pour l'homme et pour l'environnement, leur stockage et leur traitement sont soumis à des règles strictes comme l'amiante, les solvants, peintures, huiles, colles, goudron, bois traités ou emballages souillés. [46]

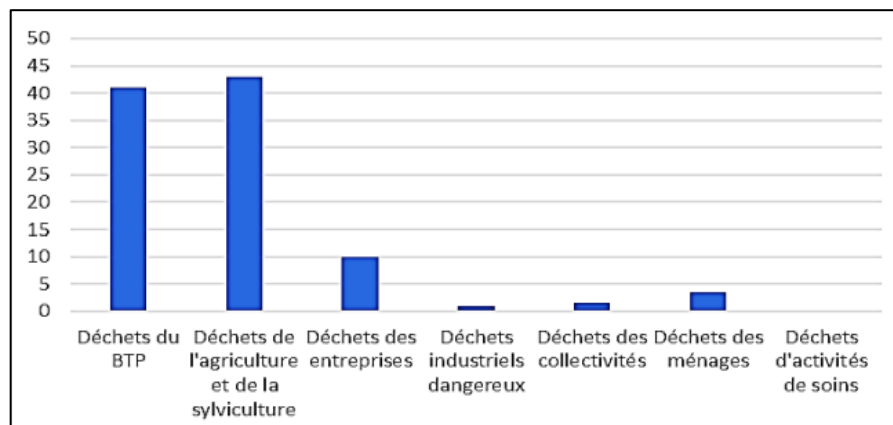


Figure 1.11 : Classification des déchets (%). [46]

1.3.4 Type de valorisation des déchets :

1.3.4.1 Broyage-stérilisation :

Dans le système de traitement des déchets à risque par broyage et stérilisation, les déchets sont broyés puis stérilisés dans la même enceinte à 138 °C sous une pression de 3,8 bars. Le résultat final est constitué de broyats stérilisés qui peuvent être classés parmi les déchets ménagers. Le volume initial est réduit de 80%. Cette technique présente plusieurs avantages : neutralisation du risque d'infection à proximité du lieu de production, aucune émanation de dioxines ou de furanes dans l'atmosphère, pas de rejets liquides polluants de nature à contaminer la nappe phréatique, ni de rejets polluants au sol, protection de l'environnement. [47]

1.3.4.2 La pyrolyse et la gazéification :

La pyrolyse et la gazéification sont deux méthodes de traitements thermiques qui chauffent les matériaux à très haute température et utilisent très peu d'oxygène.

Ce processus est généralement effectué dans une cuve étanche sous haute pression transformant les matériaux en énergie. Cette méthode est plus efficace que l'incinération directe car elle permet de récupérer et d'utiliser plus d'énergie.

- La pyrolyse : La pyrolyse des déchets solides transforme les matériaux en produits solides, liquides ou gazeux. L'huile pyrolytique et les gaz peuvent être brûlés pour produire de l'énergie ou être raffinés en d'autres produits. Les résidus solides (charbon) peuvent être transformés plus tard en produits tels les charbons actifs.
- La gazéification : La gazéification est utilisée pour transformer directement des matières organiques en un gaz de synthèse appelé syngaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz est ensuite brûlé pour produire de l'électricité et de la vapeur. La gazéification est utilisée dans les centrales produisant de l'énergie à partir de la biomasse pour produire de l'énergie renouvelable et de la chaleur. [47]

1.3.5 Le recyclage :

Au fil des années, une prise de conscience générale a permis de développer des concepts de gestion et des politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : réduire la quantité des déchets et préserver les ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- Réduire, cela inclut tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- Réutiliser, cela implique le processus de donner de nouvelles utilisations aux produits utilisés.
- Recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la réduction de la quantité de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. [48]

La chaîne du recyclage est comme suit : Le recyclage commence par la collecte des déchets. Ensuite, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier pour optimiser les opérations de

transformation. Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne en tant que déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi. Après transformation, les produits finis issus du recyclage sont utilisés pour la fabrication de nouveaux produits fournis aux consommateurs et consommés pour être, en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

I.3.5.1 Les avantages du recyclage :

- Récupération de matière première : lorsque le produit est principalement constitué d'une ou plusieurs matières premières facilement séparables et réutilisables, il peut être collecté à cette fin ;
- Le recyclage réduit l'extraction de matières premières ;
- Transformation en d'autres produits : sans certains cas (matières fermentescibles), les produits ne peuvent être recyclés ni sous la forme initiale ni sous forme de matières premières, on peut tout de même les réutiliser après compostage ou fermentation pour en faire des engrais et/ou du carburant (gaz naturel, biogaz principalement). On parle alors de revalorisation.
- Récupération d'énergie : on peut faire brûler le déchet pour récupérer de l'énergie : c'est l'incinération de déchet. Cependant, il ne s'agit pas d'un processus de recyclage. On parle alors de « valorisation énergétique » par opposition à la « valorisation de matière » qui consiste le recyclage. [49]

1.4. Mortier à base de déchets de fibre de verre :

1.4.1 Historique des fibres :

Une analyse approfondie de ce concept révèle que l'idée est très ancienne et remonte à l'Antiquité. En effet, les pharaons ont eu l'idée d'utiliser de la paille pour renforcer les briques de boue, tout comme les Finlandais ont d'abord utilisé des fibres d'amiante pour renforcer la poterie en terre cuite, qui a une histoire de 5 000 ans.

En 1910, Porter mena une série d'expériences pour augmenter la résistance du béton et conclut que la présence de fibres courtes dans le béton augmentait sa résistance à la compression et à la traction. Il conclut que dans un avenir proche, il n'est pas impossible d'utiliser ce type de renfort, c'est-à-dire d'offrir une résistance aux particules dans toute la masse, et d'introduire des tôles d'acier courtes, notamment du côté étiré. [50]

Depuis 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces processus recommandent généralement d'ajouter des fibres au béton pour améliorer ses performances. Cependant notons ici que les paramètres de renforcement de Constantinesko au Royaume-Uni en 1943 et aux États-Unis en 1954 méritent une attention particulière. Les paramètres de renforcement qu'il préconisait à l'époque étaient semblables à ceux utilisés aujourd'hui pour le béton fibré.

1.4.2 Définition des fibres :

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible. La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : (25-1500) de longueur courte (5-60mm) et dont l'épaisseur (0,005-0,75) mm. Les fibres varient sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, elles sont courtes et dispersées dans toute la masse du béton. [51]

1.4.3 Propriétés des fibres :

1.4.3.1. La notion de fibres structurales :

La notion de fibres structurales ne s'applique qu'à certains types de fibres métalliques dont les résistances résiduelles s'apparentent à l'action structurale des armatures traditionnelles.

Il est à noter que les applications de dalles sur sol ne sont pas considérées comme étant structurales. Les fibres métalliques et les macros fibres synthétiques peuvent être utilisées en concentration nécessaire pour satisfaire aux spécifications du devis. [52]

1.4.3.2. Le facteur d'élanement :

Le facteur d'élanement est défini par un ratio géométrique. Il est par conséquent le ratio qui représente le rapport de la longueur sur le diamètre équivalent de la fibre.

Le lien entre la matrice du béton et la fibre augmente proportionnellement avec le facteur d'élanement. En revanche, les fibres avec un facteur d'élanement supérieur à 60 et dotées d'une forme particulière peuvent avoir tendance à former des «oursins». [52]

1.4.3.3. La performance :

La performance des fibres est directement liée à la valeur de résistance résiduelle obtenue avec une formulation donnée d'un béton. La performance des fibres est évaluée selon diverses normes japonaises et américaines. [52]

1.4.3.4. La valeur de résistance résiduelle :

Les fibres dans le béton apportent une meilleure résistance aux déformations en flexion des structures en béton soumises à des charges. Lorsque la première fissure apparaît, les fibres sont sollicitées et une valeur de résistance résiduelle peut être déterminée. En effet, les fibres offrent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice augmentant ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration. Les fibres permettent une reprise de charge en post-fissuration.

Il existe trois méthodes d'essais de référence qui donnent des valeurs différentes pour la détermination de la résistance résiduelle :

- ASTM C1018 : détermine le facteur de résistance résiduelle.
- ASTM C1399 : détermine la résistance résiduelle moyenne.
- JCI SF-4 : détermine la résistance résiduelle équivalente.

L'essai JCI SF-4 est le plus utilisé pour les méthodes de conception. [52]

1.4.3.5. La distribution des contraintes mécaniques :

L'un des principaux avantages de l'ajout des fibres est un meilleur contrôle après la fissuration du béton. Les fibres ont la particularité d'absorber l'énergie de fissuration et de redistribuer les contraintes mécaniques dans la matrice du béton.

La répartition des fibres dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile du béton en s'opposant à la propagation des microfissures, cela dépend des fibres utilisées et des ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations en post fissuration relatives à :

- La résistance à la traction.
- La résistance aux impacts.
- La résistance à la fatigue.
- La résistance à l'abrasion.
- La réduction des fissures de retrait.

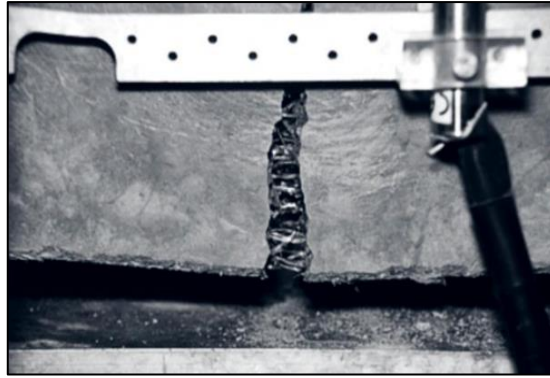


Figure 1.12 : Essais de la résistance à la traction. [52]

1.4.3.6. La résistance à l'abrasion :

L'essai de résistance à l'abrasion s'effectue selon les normes ASTM C 418 et C 779. Un article de la revue « Concrete Technology Today » de l'Association Canadienne du Ciment explique la résistance à l'abrasion de la manière suivante :

Les informations sur la résistance à l'abrasion du béton fibré sont rares et conflictuelles. Selon les valeurs disponibles, lorsque l'érosion est provoquée par la cavitation et par l'action abrasive d'un fort débit d'eau ou à l'impact de larges débris, c'est alors que le béton fibré améliore la résistance à l'abrasion. Par contre, pour une érosion de basse vitesse, c'est plutôt la propriété de la matrice et des granulats que celle de l'utilisation de fibres qui détermine la résistance à l'abrasion.

De la même façon, c'est également la propriété de la matrice qui détermine la résistance à l'usure pour le pavage et les dalles sur sol. [52]

1.4.3.7. Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres :

Les fibres ont un rôle qui se traduit par des résultats variables, donc des applications différentes en fonction de leur nature. Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

Le type de liant utilisé dans le béton, la forme et la composition des fibres, ainsi que leur orientation, leur distribution et leur densité à travers le béton, sont des facteurs qui influencent les propriétés du béton frais et durci. [52]

1.4.4. Différentes natures de fibres :

Il existe de nombreux types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques varient selon leur nature ou leur forme. Les propriétés des fibres choisies dépendent de :

- La qualité conférée à la matrice cimentaire.
- La compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats ».
- Une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.
- Conservation de leurs propriétés dans le temps.

Les fibres généralement utilisées pour la fabrication de bétons fibrés sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur application, ses différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux à base de ciment ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles). [53]

1.4.4.1. Fibres naturelles :**➤ Fibres végétales :**

La fibre végétale la plus importante est la cellulose qui résiste aux alcalis. Il existe quatre types de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois). [54]

➤ Fibres animales :

Les fibres animales sont composées essentiellement de protéines. La kératine constitue les poils et les plumes. La soie est une sécrétion de fibroïne produite par le ver à soie, chenille d'un papillon du genre bombyx et les araignées. La laine et les plumes sont de très bons isolants pour la construction.

1.4.4.2. Fibres organiques :

Les fibres de polymères sont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir. [55]

- Le polyamide (PA) qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA résiste mal aux acides minéraux.
- Le polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.
- Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères.

1.4.4.3. Fibres Métalliques :

➤ Les fibres d'Acier :

Les fibres d'acier restent parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des bétons ou des mortiers. En effet, ces fibres présentent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité très élevé. [56]

1.4.4.4. Fibres minérales :

➤ Les fibres d'amiante :

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et sont également utilisées dans la fabrication de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bâchettes de microfibrilles très fines, difficile à fondre (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur. [15]

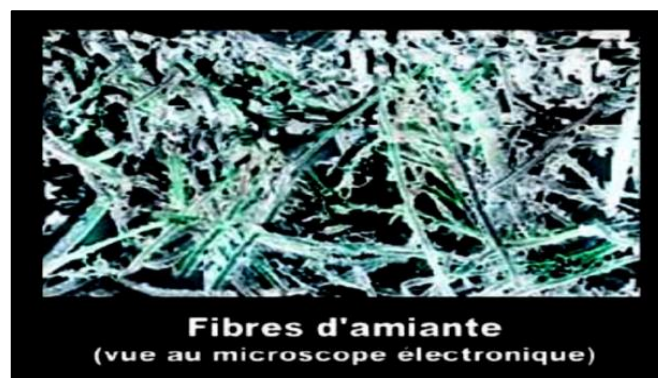


Figure 1.13 : Vue microscopique de fibres d'amiante. [15]

➤ **Les fibres de carbone :**

La lignine constitue une molécule plateforme pour la fabrication de fibres de carbone. Parmi de nombreuses applications, les pales d'éoliennes sont la plus grande application de composites techniques dans le monde. Ces grandes structures composites sont essentiellement constituées à partir de résines époxy renforcées de fibres de verre. En raison de leur faible densité et de leur haute résistance à la fatigue, les fibres de carbone offrent de meilleures performances mécaniques que les fibres de verre, ce qui accroît la durée de vie des pales. [57]



Figure 1.14 : Pales d'éoliennes fabriquées à partir de composites renforcés de fibres de carbone. [57]

1.4.5. Les fibres de verre :

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre d'environ 10 à 100 µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de rouleaux (découpées à la demande) ou sous forme de pièces prédécoupées de longueurs 3, 6, 12 et 50mm.

Elles sont regroupées en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate. Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice ;
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...) ;
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;
- Conductivité thermique relativement faible. [15]



Figure 1.15 : Fibre de verre. [15]

Tableau 1.7 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre. [15]

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture Sfu (MPa)	3400	4400	4900
Module de Young E (GPa)	73	86	87
Masse volumique (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

1.4.5.1. Applications :

Sur chantier, les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique. En préfabrication les domaines d'application sont très vastes :

- Panneaux de façade minces d'épaisseur de 10 à 15 mm ou panneaux sandwich à isolant incorporé,
- Éléments de bardage et éléments décoratifs mobilier urbain ; éléments divers : coffrets, coffrages, habillages.
- Produit d'assainissements : tuyaux, caniveaux. [58]

1.4.5.2. Les avantages des fibres de verres :

- Coût faible,
- Grande résistance en tension,
- Grande résistance aux produits chimiques,
- Excellent isolant,
- Grande ténacité,
- Excellente résistance aux impacts,
- Module d'élasticité faible (réduit perte de précontrainte),
- Bonne fiabilité. [58]

1.4.5.3. Classification des fibres de verre :

Les fibres de verre peuvent être classées vis-à-vis de plusieurs facteurs, parmi ces classements on cite les suivants :

- **Classification des fibres de verre suivant leur longueur :**
 - Fibres continues appelées aussi fibres textiles, leur longueur peut atteindre plusieurs centaines de mètres et leur diamètre est d'une moyenne de 12 μm .
 - Fibres courtes : leur diamètre varie de 0.5 à 30 μm et leur longueur est de quelques centimètres, ces fibres sont utilisées dans l'industrie textile et pour l'isolation. [59]
- **Classification des fibres suivant leur application :**

Parmi les différents types de fibres on peut citer les fibres destinées aux usages suivantes :

- Fibres pour l'isolation électrique.
 - Fibres pour l'isolation acoustique.
 - Fibres pour l'isolation thermique.
 - Fibres pour la fabrication des filtres.
 - Fibres pour le renforcement des plastiques et des liants minéraux. [59]
- **Classification des fibres de verre selon la fabrication :**
 - Fibres étirées d'un four en platine.
 - Fibres soufflées d'un four en platine.
 - Fibres fabriquées par étirage centrifuge.
 - Fibres étirées à partir d'une baguette. [59]

1.4.5.4. Le traitement et le recyclage des déchets de fibre de verre :**➤ Recyclage chimique :**

Le recyclage chimique des composites thermodurcissables aussi appelé solvolysé, consiste à dissoudre la portion organique afin d'en récupérer les monomères [60] et de libérer les fibres de leur matrice polymérique. [61] L'opération nécessite l'utilisation de solvants et/ou de catalyseurs pouvant être toxiques et difficiles à éliminer après coup, ce qui polémique le concept de recyclage des renforts. La qualité des fibres sortantes est variable, jusqu'à être trop dégradée pour qu'elles soient réutilisables. La recherche dans ce domaine en est à ses débuts, mais s'est considérablement développée au cours de la

dernière décennie. Les résultats préliminaires montrent qu'elle ne sera pas financièrement viable dans le cas des renforts en verre. [60]

➤ **Recyclage thermique :**

Trois méthodes sont possibles en recyclage thermique des composites thermodurcissables : la pyrolyse, le lit fluidisé ainsi que l'incinération. Cette dernière consiste à brûler la portion organique afin d'en tirer de l'énergie thermique. Du CO₂, de la vapeur d'eau ainsi que des résidus solides sont émis en plus du dégagement d'énergie. [62] Lorsque l'opération est menée dans une cimenterie, les fibres de verre peuvent être récupérées et intégrées dans la matrice cimentaire, avec laquelle leur composition minérale a une bonne compatibilité. C'est actuellement la méthode la plus viable économiquement pour les GFRCs thermodurcissables. [60] [63] [61] Il s'agit toutefois du palier de valorisation des matières résiduelles le moins recommandé dans la hiérarchie des 3RV-E.

La pyrolyse, quant à elle, vise à récupérer les fibres nettoyées en décomposant thermiquement les chaînes polymères dans une chambre anoxique. [63] Les températures s'y élèvent entre 300 et 800 °C. La matrice est récupérée sous forme d'huile, de gaz ou de produits de charbon solides. Ces éléments peuvent ensuite être récupérés comme intrants pour d'autres procédés chimiques [62] ou simplement comme source d'énergie. Tout comme pour la solvolyse, la pyrolyse coûte trop cher pour justifier le recyclage des fibres de verre de cette façon. De plus, une perte de résistance à la traction de 20 % a été enregistrée sur les fibres de verre ayant subi ce processus. [60] C'est pourquoi les recherches à ce sujet portent principalement sur les CFRCs, dont la valeur économique est supérieure. La figure 1.16 illustre le processus sur une pale éolienne.

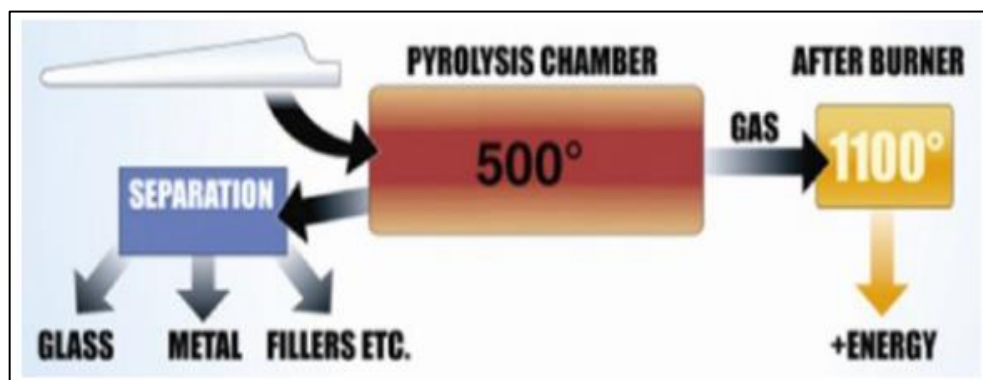


Figure 1.16 : Pyrolyse de pales éoliennes. [62]

Enfin, dans un lit fluidisé, la matrice est décomposée alors que le composite est chauffé rapidement à l'aide d'un flux d'air. [64]

➤ **Recyclage mécanique :**

Le recyclage mécanique est le seul potentiellement rentable pour des GFRCs. En effet, la valeur économique des fibres de verre est faible et c'est la méthode dont les coûts de processus sont les plus bas. C'est également elle qui a reçu le plus d'attention pour les composites therm durcissables, peu importe le type de fibre, car elle permet de recycler tout le matériau, sans miser uniquement sur le renfort ou la portion organique. [65] [66] Plus spécifiquement, ce sont les GFRCs de type SMC et BMC qui ont fait l'objet du plus grand nombre de recherches, en raison de leur très grande prévalence sur le marché. [66] [60] Il semble que ce soit une technique indiquée particulièrement lorsque les rebuts sont propres et non contaminée. [67]

• **Broyage et séparation granulométrique :**

Le processus commence typiquement par deux étapes de broyage ; la première servant à réduire la taille des morceaux jusqu'à ce qu'ils puissent entrer dans un broyeur plus fin. La sortie de ce dernier est équipée d'un crible à la taille prédéterminée. Le broyeur à marteaux est le modèle le plus commun, suivi du broyeur à boulets. [64] Le recyclat, alors sous forme de poudre et de morceaux fibreux, est ensuite séparé en classes granulométriques. [68]

Le premier broyage, ou broyage grossier, est effectué à l'aide d'un concasseur ou d'un broyeur à vitesse lente. [67] Les morceaux ainsi formés contiennent des fibres dont l'intégrité structurale est préservée [65] et dont la taille réduite facilite le transport. ERCOM, une compagnie allemande qui avait mis au point une technologie de recyclage des SMCs et BMCs, détenait un broyeur mobile qui permettait de réduire la densité des déchets sur le site même de leur collecte. Cette opération réduisait les coûts de transport. [67] La granulométrie du recyclat issue de cette étape se situe communément entre 50 et 100 mm de diamètre. [68]

Le second broyage, étape principale de réduction de la granulométrie, est effectué par un broyeur à haute vitesse. Les broyeurs à marteaux et ceux à boulets y ont un avantage sur les broyeurs à couteaux, dont les lames s'émousent et doivent être aiguisées régulièrement. [67] De plus, Silva et al. [69] ont observé qu'un broyage d'une minute de

résidus de GFRCs en polyester issus d'un procédé RTM génèrent un recyclat plus uniforme avec un broyeur à boulets qu'un broyeur à couteaux. C'est la qualité de ce broyage qui détermine le potentiel de recyclage de l'extrait. [68] À ce sujet, Shuaib et Mativenga [70] ont étudié l'effet des trois paramètres suivants sur la qualité du recyclat ainsi que l'énergie consommée durant l'opération : la taille des orifices du crible, l'épaisseur du matériau ainsi que la taille des morceaux. La granulométrie du recyclat après ce second broyage se situe typiquement entre 50 μ m et 10mm. [68] Son aspect comprend des poudres ainsi que des flocons de fibres de différentes longueurs endimanchées de résine réticulée. [60] Outre la réduction de la longueur des fibres, ce broyage raccourcit les chaînes moléculaires du polymère et impacte sa capacité à créer de nouvelles liaisons. [68] Bream et Hornsby [65] ont mesuré la longueur des fibres post broyage et ont constaté une étendue des longueurs allant de 0,1 à 10mm. Le crible de leur broyeur à marteaux était de 4 mm et 50 % de leur recyclat était plus gros que 0,6mm. Silva et al. [69] ont obtenu 89,3 % de particules < 1,2 mm avec un broyage d'une minute seulement dans un broyeur à boulets.

L'étape de séparation granulométrique, qui précède généralement une caractérisation du contenu, n'est pas standardisée. Les techniques varient donc beaucoup d'un cas à l'autre. ERCOM combinait les cyclones et les tamis, alors que Phoenix Fiberglass Inc utilisait des cribles couplés à un séparateur pneumatique. [67] Toutefois, ces deux compagnies ne cherchaient qu'à récupérer les fractions les plus fines, au détriment des morceaux fibreux. La motion des tamis vibrants, une autre méthode assez répandue, agglutine les fibres courtes, causant la formation de boules à l'aspect pelucheux. De plus, les tamis permettent aux fibres longues de contaminer toutes les classes > 20 μ m. [71]

Chacune des classes a un contenu différent en polymère, en renfort et en charge. Les plus fines contiennent davantage de polymère et de charge que le composite d'origine, alors que les plus grossières tendent à rassembler plus de fibres ainsi qu'à contenir des particules avec un plus grand rapport de longueur/diamètre. [67] [68] Les fibres sont typiquement recouvertes de polymère réticulé. [72]

Toutefois, des exceptions existent. Beauson et al. [73], ont généré une portion fine et une portion grossière à partir de pales d'éoliennes dont le contenu de fibres en poids était similaire : environ 74 %. Certains chercheurs [69] ont tenté de séparer les morceaux de composite fibreux et non fibreux avant les opérations de broyage. Il en résulte un contenu en fibres largement supérieur dans le recyclat du premier cas (36,5 % versus 2,8 %). [74]

1.4.5.5. Effet des déchets de fibre de verre sur mortier et béton :

➤ L'étude de Dengwu Jiao et Al :

L'auteur dans son travail s'intéresse à l'étude des propriétés rhéologiques des mortiers renforcés par les fibres de verre à cause de l'importance des contraintes de cisaillement appliquées sur le béton frais lors des processus de mélange et de transport, qui ont une influence significative sur la dispersion et l'agglomération des particules de ciment.

• Propriétés rhéologiques du mortier frais :

Courbes rhéologiques :

Les courbes rhéologiques des mortiers avec adjuvants minéraux et fibres de verre courtes sont montrées dans la figure 1.17.

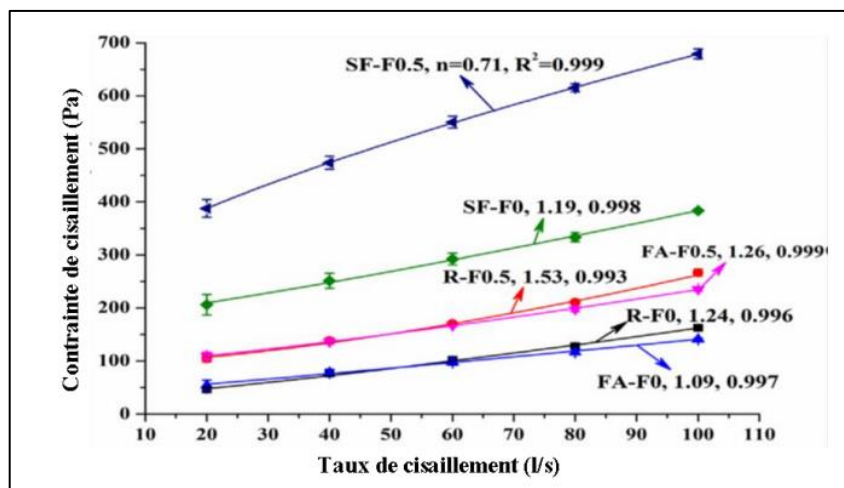


Figure 1.17 : Effets des adjuvants minéraux sur les courbes d'écoulement du mortier frais lors de l'essai initial. [75]

La teneur en fibres de verre avait une grande influence sur le cisaillement contrainte induite par les mortiers, en fonction des types d'adjuvants minéraux. L'intensité d'épaississement par cisaillement du mortier de ciment a augmenté avec l'ajout de fibre de verre, tandis que l'addition de 0,5 % de fibre de verre a entraîné le comportement rhéologique de mortier binaire de fumée de ciment-silice changé de l'épaississement par cisaillement à éclaircir le cisaillement. [75]

Limite d'élasticité et viscosité plastique :

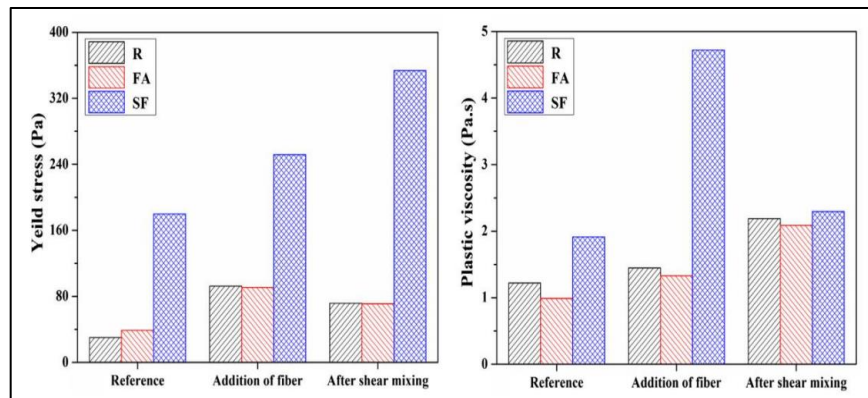


Figure 1.18 : L'effet du mélange des fibres et du cisaillement en rotation sur les propriétés rhéologiques du mortier frais. [75]

La limite d'élasticité a augmenté progressivement avec l'ajout de fibre de verre ou éprouvant un mélange de cisaillement en rotation. Dans le cas de viscosité plastique, les influences de l'ajout de fibre de verre étaient beaucoup plus élevées que celui éprouvant un cisaillement en rotation mélange. [75]

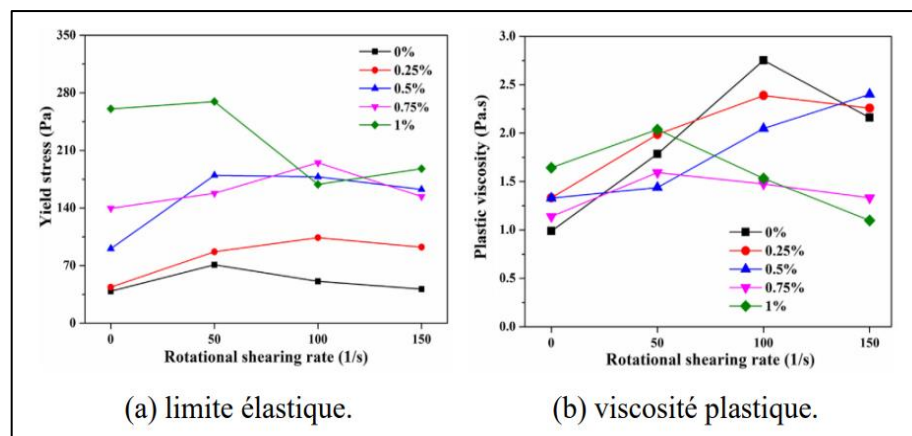


Figure 1.19 : limite élastique et viscosité plastique du mortier binaire frais à base de ciment-cendres volantes. [75]

- Effets couplés du mélange de fibres de verre et de cisaillement en rotation :

Courbes rhéologiques :

La contrainte de cisaillement subie par le nouveau mortier a augmenté progressivement avec l'augmentation de la fraction volumique de fibre de verre, en particulier à des taux de cisaillement relativement élevés.

L'ajout des fibres de verre courtes augmente légèrement la ségrégation des agrégats et réduction de la stabilité dynamique des mortiers frais. Comme pour l'indice rhéologique, il a également augmenté avec l'augmentation de la fibre de verre fraction volumique. [75]

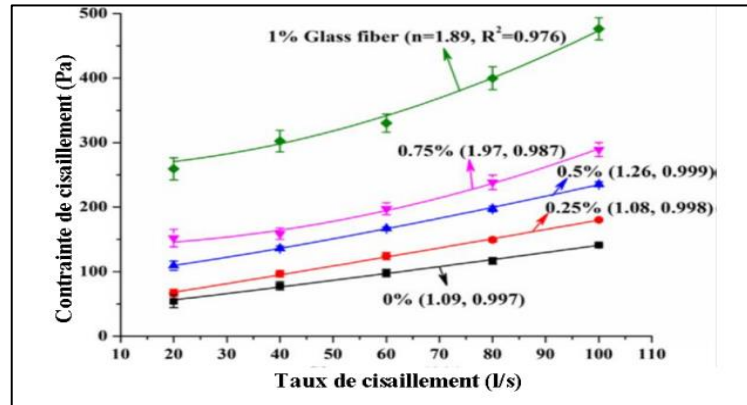


Figure 1.20 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à l'essai initiale pour mortier binaire ciment-cendres volante. [75]

Limite d'élasticité et viscosité plastique :

Lors de l'essai initial, l'addition de 0,25 % de fibre de verre a eu moins d'influence sur la limite d'élasticité. Cependant, la limite d'élasticité a augmenté de manière significative avec la fraction volumique des fibres de verre courtes supérieures à 0,5 % en raison des enchevêtrements mécaniques des fibres.

L'ajout de 0,5 % de fibres de verre a entraîné l'augmentation de la viscosité plastique des mortiers frais. Quand le volume fraction de fibre de verre augmentée de 0,5 % à 0,75 %, la viscosité plastique a montré une légère diminution. Au volume de fibres de 1 %, cependant, la viscosité plastique a encore augmenté. Mais dans l'ensemble, la viscosité plastique des mortiers frais à fibres de verre courtes était plus élevée que celle des mortiers sans fibres. [75]

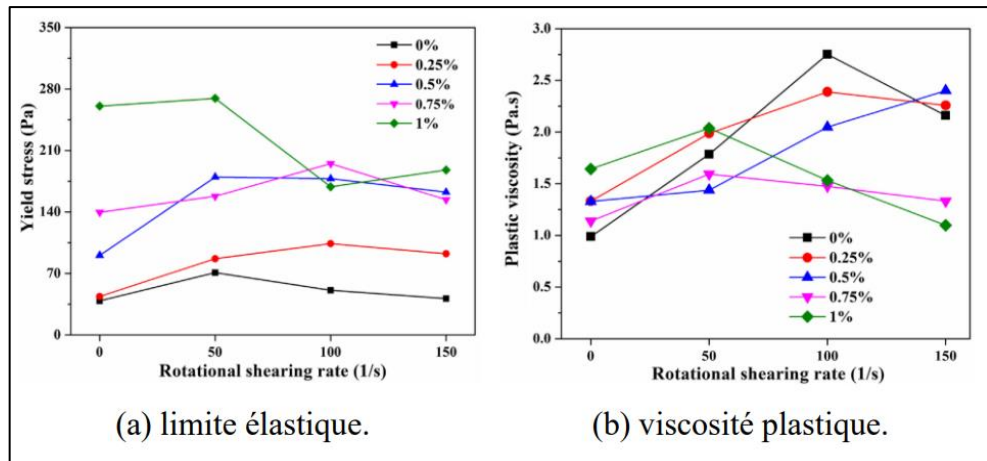


Figure 1.21 : Limite élastique et viscosité plastique du mortier binaire frais à base de ciment-cendres volantes. [75]

Indice rhéologique :

Après avoir soumis le mélange au cisaillement par rotation, la contrainte de cisaillement a augmentée de manière significative et les mortiers frais ont montré facilement un comportement d'épaississement par cisaillement. Les variations de la viscosité plastique et l'indice rhéologique dépendent des fractions volumiques de fibres de verre. [75]

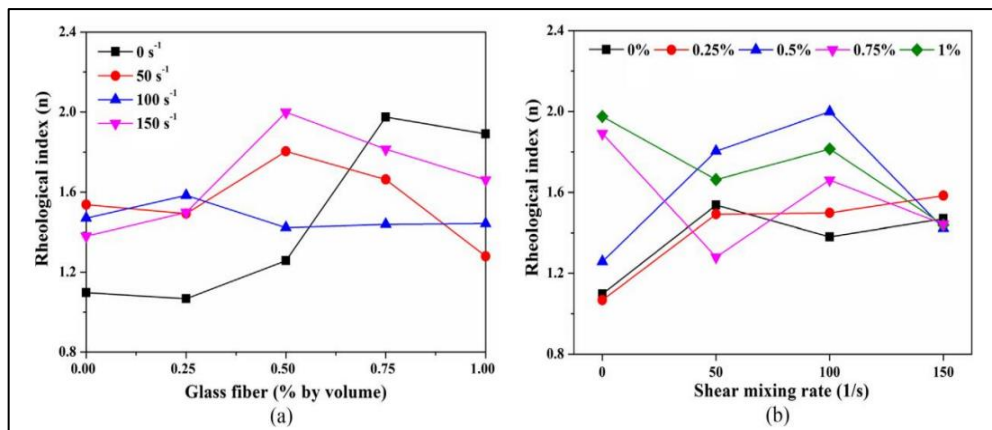


Figure 1.22 : Indice rhéologique de mortier binaire ciment-cendres volantes sous différents volume de fibres de verre et mélange par cisaillement en rotation. [75]

➤ L'étude de Djebri Noura (Effet des fibres de verre) :

Tableau 1.8 : Liste des abréviations pour les types de BAP (Fibres de verre). [76]

Désignation	Type de fibre	Dosage en fibre (%)
BAPT	Témoin (sans fibre)	0
BAPV1	Fibre de verre (L=5cm)	0,1
BAPV2	Fibre de verre (L=5cm)	0,15
BAPV3	Fibre de verre (L=2,5cm)	0,1
BAPV4	Fibre de verre (L=2,5cm)	0,15

Essai de l'étalement :

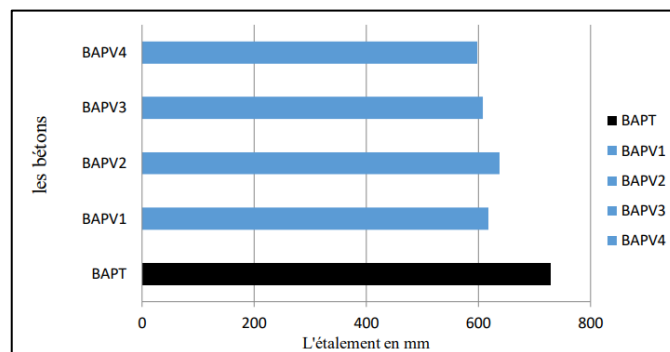


Figure 1.23 : L'étalement en fonction du type de béton. [76]

On a remarqué une réduction des valeurs d'étalement des bétons fibrés dont le pourcentage varie de 0.1% et 0.15% par rapport au béton témoin. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du béton, ce qui conduit à une diminution de maniabilité ; on remarque aussi que les dimensions de fibre de verre n'ont pas une grande influence sur l'étalement des BAP, tous les BAP fibrés possèdent presque les mêmes étalements. [76]

Essai de la boîte en L :

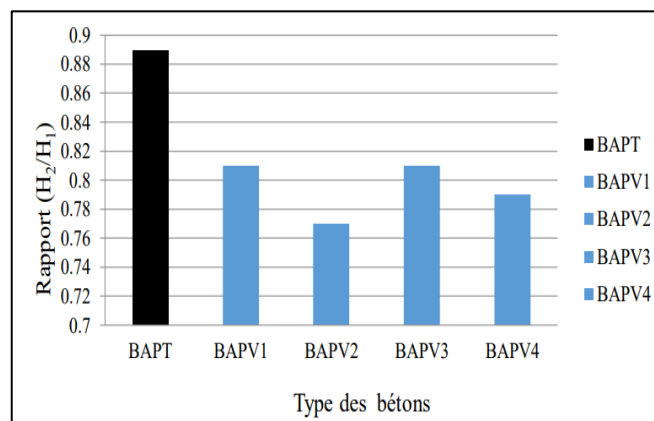


Figure 1.24 : La boîte en « L » en fonction du type de béton. [76]

Les mélanges de témoin et ceux dosés en 0,1% de fibre de verre donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, alors que les BAP dosés en 0,15% de fibre de verre donnent des valeurs de 0.77 et 0.79 alors qu'elle doit être supérieure ou égale à 0.8 [8]. L'augmentation du dosage des fibres a rendu difficile l'écoulement et a entraîné un blocage du béton. On peut noter aussi pour les BAP fibré à des dosages optimums de 0.15%. Mais au-delà de cette teneur, on relève une diminution des taux de remplissage.

La masse volumique :

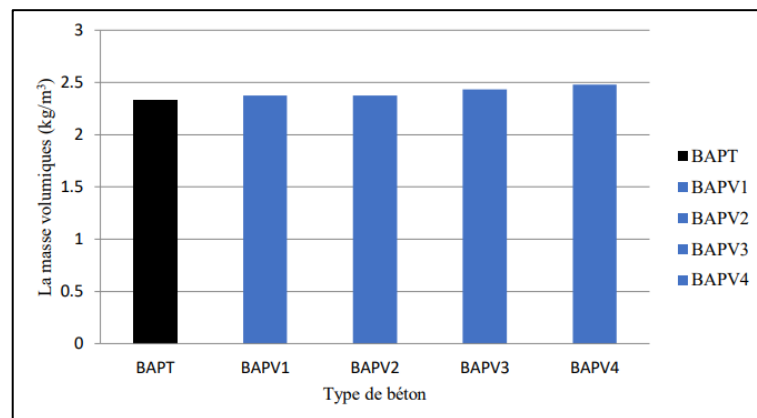


Figure 1.25 : La masse volumique en fonction des bétons (BAP). [76]

À partir des résultats obtenus, on constate que la masse volumique des BAP fibrés (avec des fibres de verre) est légèrement supérieure à la masse volumique du béton témoin ceci est dû à la présence des fibres dans le béton et à leurs masses volumiques qui se sont proches de celles des autres composants du béton.

Résistance à la compression :

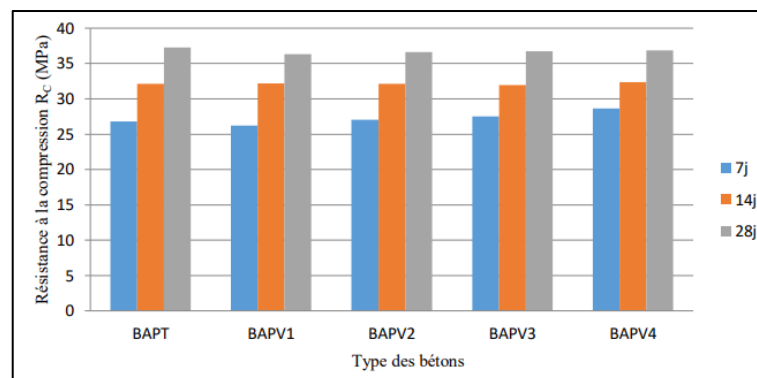


Figure 1.26 : Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation. [76]

D'après les résultats inscrits dans la figure ci-dessus, on constate une légère amélioration de résistance à la compression dans la formulation contenant des fibres de verre longues, et pour celle qui contiennent des fibres de verre courtes.

Résistance à la traction :

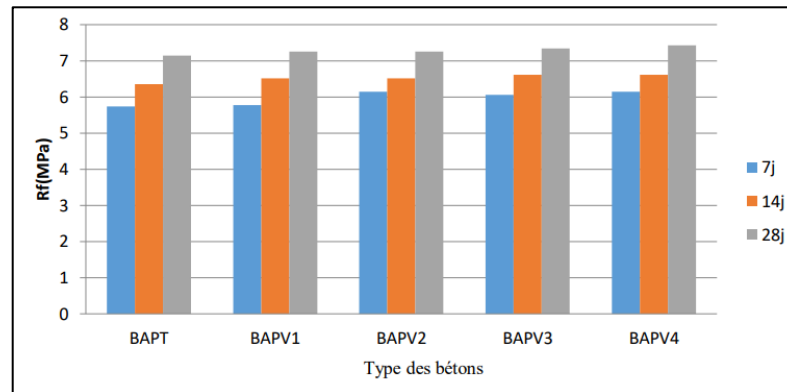


Figure 1.27 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation. [76]

Concernant la résistance à la flexion il y a une légère augmentation de résistance pour la formulation qui contient des fibres de verre longues, et pour celle qui contient des fibres de verre courtes et les résultats obtenus montrent que les améliorations des fibres courtes sont meilleures que celles des fibres longues. Donc les dimensions des fibres de verre jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des BAP et la performance du BAP avec fibres courtes mieux qu'à fibres longues

Effet des fibres métalliques :

Tableau 1.9 : Liste des abréviations pour les types de BAP (Fibres métalliques). [76]

Désignation	Type de fibre	Dosage en fibre (%)
BAPT	Témoin (sans fibre)	0
BAPF1	FIBERTEX A	0.3
BAPF2	FIBERTEX A	0.4
BAPF3	FIBERTEX A	0.5
BAPD1	Fibre métallique	0.3
BAPD2	Fibre métallique	0.4
BAPD3	Fibre métallique	0.5
BAPM1	Mélange (50%F+50%D)	0.3
BAPM2	Mélange (50%F+50%D)	0.4
BAPM3	Mélange (50%F+50%D)	0.5

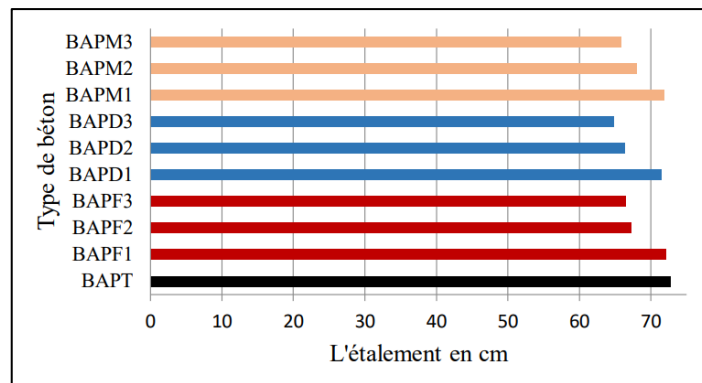
Essai de l'étalement :

Figure 1.28 : L'étalement en fonction de type de béton. [76]

On a remarqué une légère réduction des valeurs d'étalement des bétons fibrés dont le pourcentage varie de 0.3, 0.4 et 0.5% par rapport au béton témoin. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du béton, ceci conduit à une diminution de maniabilité; cette réduction est plus importante pour le dosage de 0.5% suite à leurs dosages qui bloquent le système lors de son étalement.

L'influence des fibres métalliques sur l'écoulement des bétons est en fonction de leurs dosages et de leurs types. En revanche les particules fines de l'addition de la poudre de marbre remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice. Par conséquent la quantité d'eau qui occupait les vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Cependant, au-delà d'un dosage critique en fibres, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes.

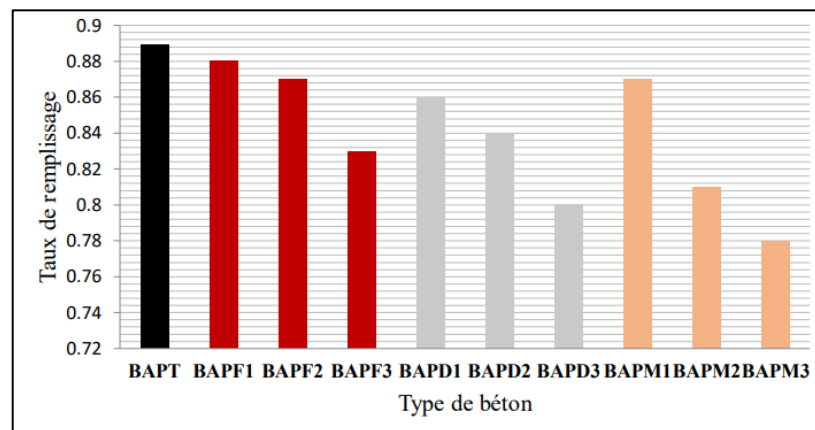
Essai de la boîte en L :

Figure 1.29 : La boîte en « L » en fonction du type de béton. [76]

Il apparait clairement d'après les résultats obtenus sur l'essai de la boîte en L que la grande valeur enregistrée est au niveau de la composition de BAP témoin et elle diminue avec l'incorporation des fibres.

Tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, excepté le BAPM3 qui donne une valeur de 0.78, alors qu'elle doit être supérieure ou égale à 0.8 [8]. L'augmentation du dosage des fibres a rendu difficile l'écoulement et a entraîné un blocage du béton surtout pour les BAPF3, BAPD3, BAPM3. On peut noter aussi pour les BAP fibré à des dosages optimums de 0.5%. Mais au-delà de cette teneur, on relève une diminution des taux de remplissage.

La masse volumique :

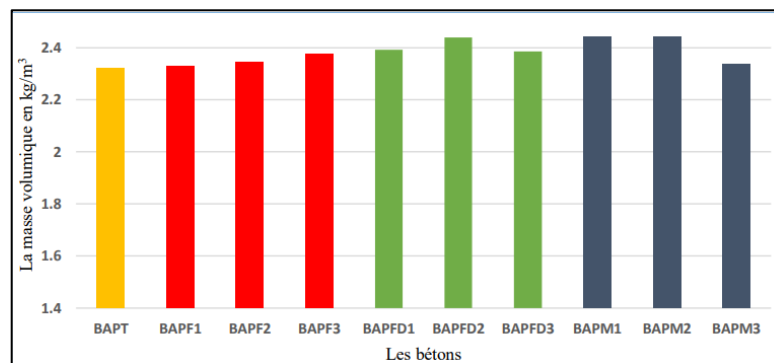


Figure 1.30 : La masse volumique en fonction du type de béton (BAP). [76]

Comme la montre la Figure 1.31, la masse volumique des BAP fibrés est supérieure à celle du béton témoin, ceci est dû à la présence des fibres dans le béton et à leurs masses volumiques qui sont plus importantes que celle des autres composants du béton.

Résistance à la compression :

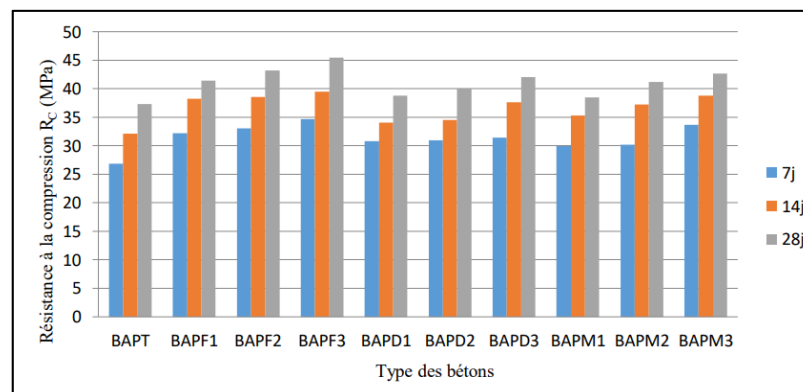


Figure 1.31 : Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation. [76]

Nous remarquons que les BAP avec fibres à crochet longues sont nettement plus résistants que celles des BAP de fibres métalliques pour toutes les échéances et cette différence est attribuée aux propriétés mécaniques des fibres. Les fibres métalliques assurent un retardement de l'apparition de la première fissure et une efficacité dans la restriction et ceci grâce à leur bonne adhérence mais leur module d'élasticité qui n'est pas élevé les rend moins rentables. Les fibres à crochet avec un module d'élasticité élevé procurent une réserve de sécurité importante pour les BAP.

L'association des fibres à crochet et des fibres métalliques (BAPD) qui sont à bas prix et disponibles sur le marché algérien entraîne une amélioration des résistances mécaniques par rapport au BAPD pour tous les dosages et pour toutes les échéances. Alors pour l'hybridation des fibres, les essais en compression ont montré que l'association des fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation résistance.

Résistance à la traction :

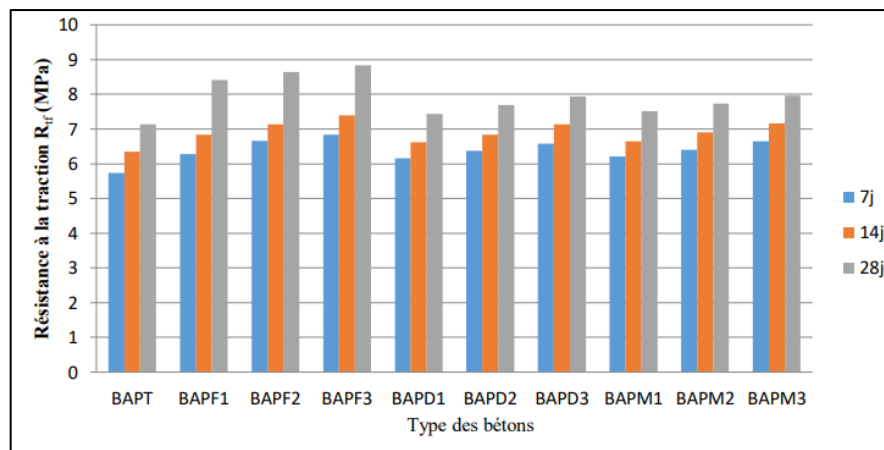


Figure 1.32 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation. [76]

D'après les résultats, l'utilisation des fibres métalliques et grâce à leurs bonnes adhérences améliore la résistance à la flexion des BAPD (de 11.06% à 28 jours pour le dosage de 0.5%).

Le mélange des fibres améliore la résistance à la flexion des BAPM (de 11.48 % à 28 jours pour le dosage de 0.5%).

On remarque que la résistance à la traction par flexion du BAPF est supérieure à celle du BAPD et BAPM. Ceci est dû essentiellement à l'élanement et la nature des fibres utilisées.

➤ L'étude de FETNI Fatima Zahra et GOUBI Hanane :

L'effet des fibres polypropylène sur mortier :

Tableau 1.10 : Notations des fibres de polypropylène selon leurs longueurs. [58]

Notation	Pourcentage (%)	Longueur (cm)
L2- 0.125%	0.125%	2cm
L2-0.25 %	0.25%	2cm
L2-0.5%	0.5%	2cm
L4-0.125%	0.125%	4cm
L4-0.25 %	0.25%	4cm
L4- 0.5%	0.5%	4cm

Maniabilité :

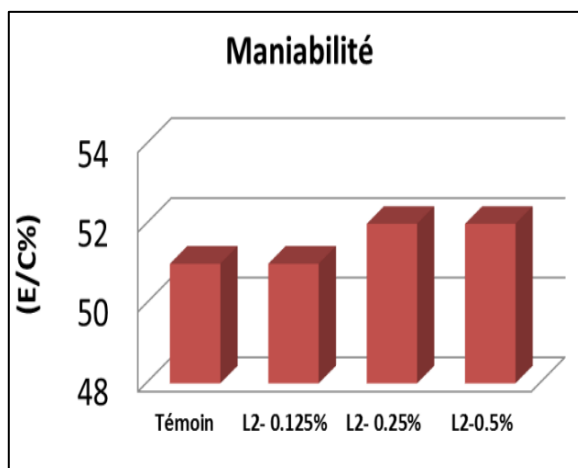


Figure 1.33 : Maniabilité du mortier avec longueur 2cm de Fpp. [58]

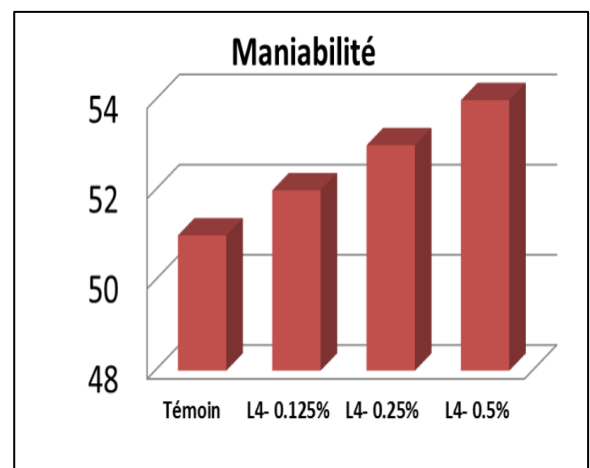


Figure 1.34 : Maniabilité du mortier avec longueur 4cm de Fpp. [58]

Pour la figure 1.33, le pourcentage d'eau dans le mortier qui contient 0.25% et 0.5 % de fibre polypropylène était grand par rapport au mortier témoin.

Pour la figure 1.34, le pourcentage d'eau dans le mortier contenant différentes proportions de fibre polypropylène était plus grand par rapport au mortier témoin. On peut conclure que l'ajout de la fibre de polypropylène augmente le pourcentage d'eau dans les formulations du mortier.

L'absorption d'eau :

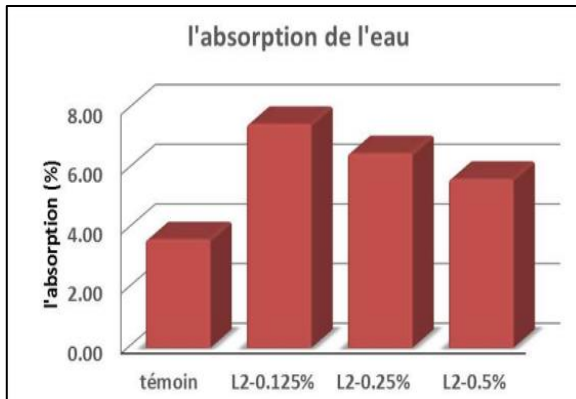


Figure 1.35 : La variation de l'absorption d'eau du mortier (L2-0.125%,L2-0.25%,L2-0.5%). [58]

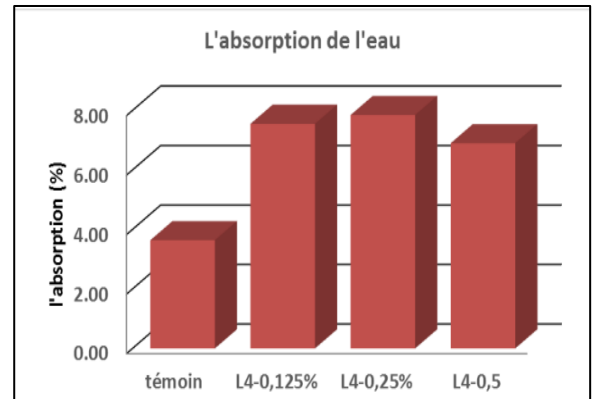


Figure 1.36 : La variation de l'absorption d'eau du mortier (L4-0.125%,L4-0.25%,L4-0.5%). [58]

Selon la figure 1.35, à l'exception du mortier contenant 0.5% de fibre polypropylène, l'absorption est élevée dans les autres composantes par rapport au mortier témoin.

Pour la figure 1.36, l'absorption est importante par rapport au mortier témoin sauf pour les cas où le mortier contient 0.125% et 0.5% de fibre polypropylène. Donc l'ajout de la fibre de polypropylène augmente l'absorption de l'eau ; et la composition contenant à 0.25% de fibre donne la grande quantité d'absorption.

Résistance à la flexion :

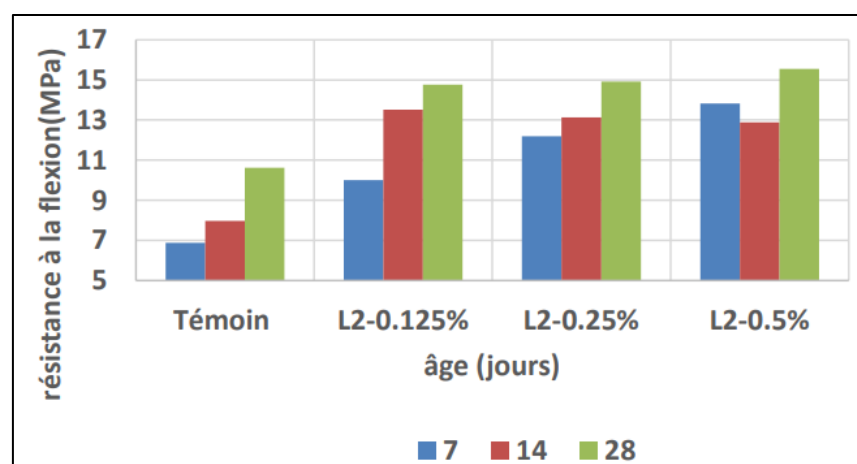


Figure 1.37 : La variation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types de mortier (L2-0.125%, L2-0.25%, L2-0.5%). [58]

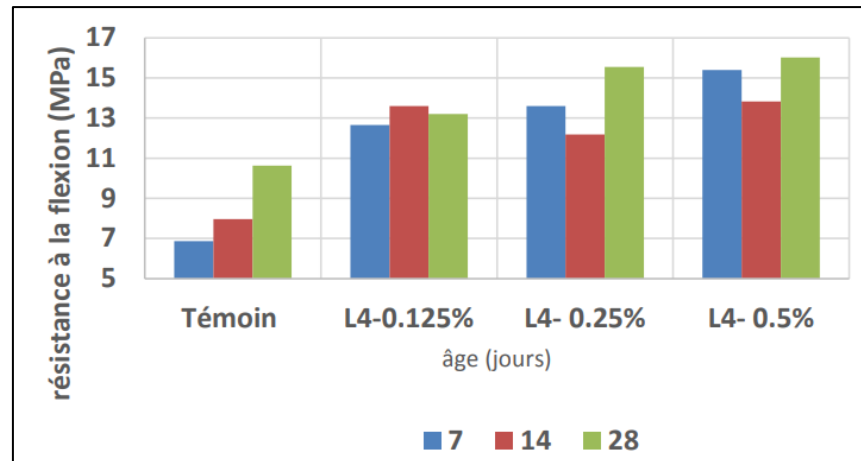


Figure 1.38 : La variation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types de mortier (L4-0.125%,L4-0.25%,L4-0.5%). [58]

D'après l'histogramme de la figure 1.37 :

Pour une durée de 7 jours, la résistance à la flexion pour les éprouvettes de mortier avec fibre polypropylène est élevée par rapport à celle du témoin. Les taux d'augmentation sont estimés à 45.45%, 77.27% et 100% pour les compositions L2-0.125%, L2-0.25% et L2-0.5%.

Pour l'effet de fibre polypropylène sur la flexion du mortier avec fibre après 14 jours, nous remarquons que la résistance à la flexion est élevée pour tous les mortiers est fort par rapport à celle du témoin. Les taux d'augmentation sont estimés à 79.62%,64.88% et 61.93% pour les compositions L2-0.125%, L2-0.25% et L2-0.5%.

A 28 jours, la résistance à la flexion pour les éprouvettes de mortier de fibre polypropylène est haute dans les compositions L2-0.125%, L2-0.25% et L2-0.5% par rapport à celle de témoin ; les taux d'augmentation sont respectivement 38.91%,40.42% et 46.25%.

D'après l'histogramme de la figure 1.38 :

Après 7 jours, la présence de fibre polypropylène dans le mortier a augmenté la résistance à la flexion du mortier comparée au témoin. Les taux d'augmentation par rapport au mortier témoin pour les compositions L4-0.125%, L4-0.25% et L4-0.5% sont respectivement 84%, 97.67% et 123.85%.

Pour le cas de 14 jours, la présence de la fibre polypropylène avec différentes proportions dans le mortier a augmenté la résistance à la flexion comparée au témoin.

Les taux d'augmentation pour les compositions L4-0.125%, L4-0.25% et L4-0.5% sont respectivement 70.72%, 53.01% et 73.61%.

Pour le cas de 28 jours, nous remarquons que la résistance à la flexion pour les éprouvettes L4-0.125%, L4-0.25% et L4-0.5% s'est améliorée par rapport au témoin et les taux d'augmentation sont respectivement 24.23%, 46.25% et 50.68%.

Résistance à la compression :

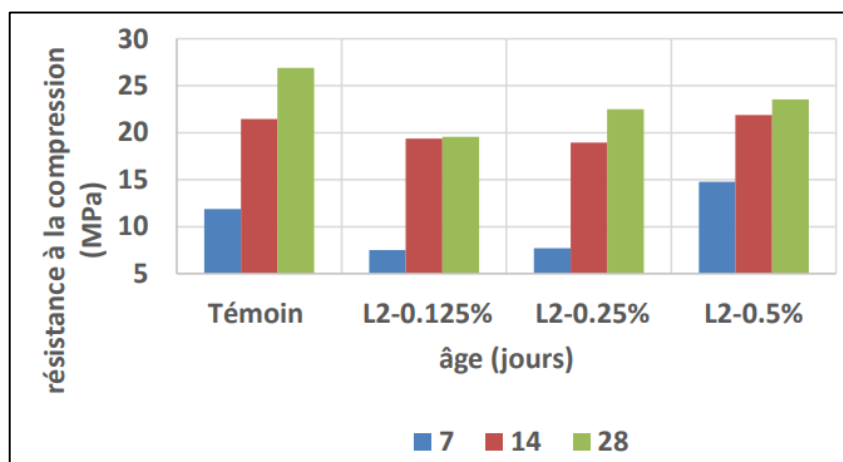


Figure 1.39 : La variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types du mortier (L2-0.125%, L2-0.25%, L2-0.5%). [58]

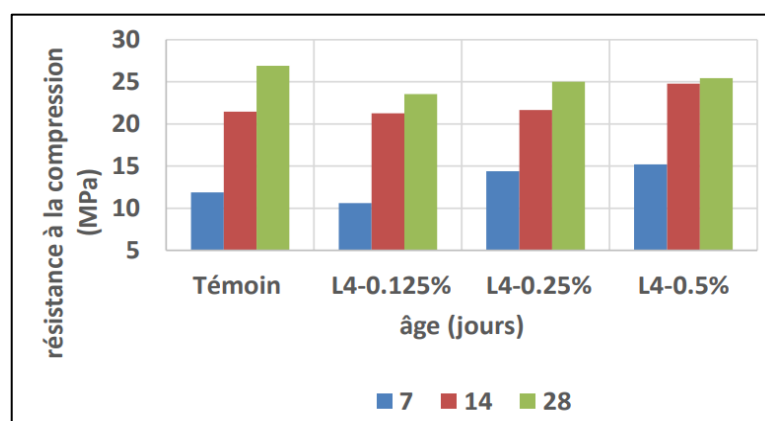


Figure 1.40 : La variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge des éprouvettes pour les différents types du mortier (L4-0.125%, L4-0.25%, L4-0.5%). [58]

La figure 1.39 montre que:

A 7 jours, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du dosage de fibre polypropylène mais reste toujours inférieure à la résistance du mortier témoin, la présence de fibre polypropylène réduit la résistance à la compression pour les compositions L2-0.125% et L2-0.25% avec des taux de 58.33%, et 54.22%, mais pour l'autre composition L2-0.5% le taux augmente avec 24.54%.

Après 14 jours, la présence de fibre polypropylène réduit la résistance à la compression pour les compositions L2-0.125% et L2-0.25% avec des taux de 10.76% et 13.24%, sauf pour la composition L2-0.5% où le taux augmenté avec 1.93%.

Après 28 jours, la présence de fibre polypropylène diminue la résistance à la compression du mortier avec fibre polypropylène pour toutes les compositions L2-0.125%, L2-0.25% et L2-0.5% avec des taux de 37.28%, 19.46% et 14.19% respectivement.

La figure 1.40 montre que :

Après 7 jours, la résistance à la compression du mortier pour les différentes proportions de fibre polypropylène a augmenté dans les deux compositions L4-0.25% et L4-0.5% avec des taux 21.01% et 28% respectivement, mais pour la composition L4-0.125% la résistance diminue avec le taux 11.81%.

Après 14 jours, la résistance à la compression du mortier pour différentes proportions de fibre polypropylène a augmenté pour les deux compositions L4-0.25% et L4-0.5% avec des taux de 0.93% et 15.51%. Pour la composition L4-0.125%, sa résistance est égale à celle de mortier témoin.

Après 28 jours la résistance à la compression du mortier pour différentes proportions de fibre polypropylène diminue pour toutes les compositions L4-0.125%, L4-0.25% et L4-0.5% par rapport au témoin et les taux de diminutions sont respectivement 14.18 %, 7.52% et 5.78%.

1.5. Mortier à base de déchets de marbre :

1.5.1. Historique du marbre :

Le marbre est utilisé depuis l'Antiquité comme matériau pour la sculpture et pour l'architecture. La consistance ferme et dense du marbre lui permet de prendre un beau poli, et sa translucidité associée au haut indice de réfraction des cristaux de calcite, principal composant des vrais marbres, permet à la lumière de pénétrer dans la superficie de la pierre

avant d'être réfléchi, conférant à ce matériau (et surtout aux marbres blancs) une luminosité spéciale. [77]

Le terme « marbre » est dérivé du grec « marmaros », qui signifie « pierre resplendissante ». Dans l'histoire de l'art ce terme peut désigner une très grande variété de roches, de compositions, de duretés et de textures très différentes. Toute pierre de consistance ferme et capable de prendre un beau poli a souvent été appelée « marbre », mais les plus courants restent les vrais marbres au sens géologique. [77]

Dans l'Égypte ancienne, à partir de l'époque prédynastique, différentes variétés de granits, diorites, gneiss, basaltes, schistes, des calcaires divers et notamment l'albâtre égyptien, furent travaillées pour la réalisation de vases rituels. À partir de la IIe dynastie égyptienne commence l'emploi de la syénite, une roche granitique qui fut utilisée pour le revêtement des pyramides de Khephren et de Mykérinos. [77]



Figure 1.41 : Les différents types de marbre.

1.5.2. Déchet de marbre :

1.5.2.1. Définition :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en

moyenne de 2,7. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc, ils existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires. [48]

La production marbrière en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal et la Grande-Bretagne. Les produits marbrières algériennes sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italiennes et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponce.

Le marbre Algérien est exploité actuellement par l'entreprise nationale du marbre "Enamarbre" qui dispose de dix unités de production implantées dans cinq Wilayas. [78]

La production de marbre en blocs (2018), par les filiales de l'entreprise Enamarbre est de 200.000 m².



Figure 1.42 : (a) Carrière de marbre, (b) Déchets de marbre à l'état poudreux. [79]

1.5.2.2. Composition du marbre :

Le marbre contient surtout de la calcite, mais peut contenir plus ou moins de la dolomite. On peut y trouver de la brucite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, du phlogopite en cas de transition vers les calcaires à silicates et la skarn. Les marbres sont facilement rayés par le canif, ce qui sert à distinguer des quartzites blancs qui sont beaucoup plus durs. Le marbre a des cristaux généralement rhomboédriques. [80]

Le marbre blanc est une roche de calcaire très pur « CaCO_3 », aussi c'est une calcite, qu'elle est l'un des minéraux les plus communs avec la dolomite représentant 22% des roches sédimentaires soit 273 millions de kilomètres cubes de roches carbonatées. Pendant très longtemps la calcite n'était connue que sous son nom de spath calcaire ou de chaux carbonatée. Peut-être est-ce Haidinger qui lui a donné le nom de calcite sous lequel elle est maintenant universellement connue. [80]

1.5.2.3. Le recyclage des déchets de marbre :

Les déchets de carrières à blocs sont les blocs, chutes et moellons ayant différentes formes géométriques. Le produit de recyclage de déchets est un sous-produit de marbre «granulats et poudre». Les déchets de l'usine de transformation sont exploités partiellement en revêtement de sol extérieur pour les chutes de carreaux et en construction de carreaux de granito, en peinture pour la poudre de marbre. L'exploitation des moellons de dimension variant de (80- 100 cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir des granulats dont la granulométrie varie de 0-18 mm. Poudre de marbre obtenue après broyage et pulvérisation du marbre de dimension variant de 30 à 02 microns. Les dérivés de marbre sont deux types :

- Dérivés de marbre blanc.
- Dérivés de marbre gris (à l'arrêt). [48]

1.5.2.4. Utilisation des déchets de marbre dans le bâtiment :

L'industrie en pierre de marbre produit des déchets solides et de la boue de pierre. La boue en pierre produite pendant le traitement correspond environ à 20% du produit fini de l'industrie en pierre. Par conséquent la communauté scientifique et industrielle doit commettre vers des pratiques plus viables. Il y a plusieurs réutilisations et réutilisant des solutions pour ce sous-produit industriel, à une phase expérimentale et dans des applications pratiques. [81]

1.5.2.5. Les avantages de la poudre de marbre :

- La poudre de marbre peut être employée comme remplissage dans le béton et les aires de pavage.
- La poudre de marbre peut être employée dans le béton pour augmenter la résistance.

- Nous pouvons réduire la pollution environnementale en utilisant la poudre de marbre pour fabriquer d'autres produits.
- La poudre de marbre est également employée pour faire la couche de fond pour des peintures de toile, et comme remplisseur de peinture.
- Elle est utilisée comme composant pour la fabrication du ciment blanc.
- Il a été prouvé que la poudre de marbre agissait comme charge, des résultats expérimentaux indiquaient que le pourcentage optimal de déchets de poudres en tant qu'additifs minéraux dans le BAP représente 50% en poids de la teneur en ciment dosé à 400 kg/m^3 , indépendamment du type de la poudre de déchets. L'utilisation de ce pourcentage atteint la plus haute résistance à la compression avec une fluidité satisfaisante sans ségrégation, ni saignement. [79]

1.5.2.6. Effet des déchets de marbre sur le mortier et béton à l'état frais :

Beaucoup de chercheurs ont effectué de nombreuses études sur l'effet de marbre en tant que substitution dans la matrice cimentière ou dans le sable à l'état frais et durci. Les avis sont divers. L'effet du marbre dépend du type de substitution (poudre, sable ou agrégat) et du pourcentage.

Selon Rahman et al [82] une augmentation de la teneur en déchets de marbre dans le mortier améliorera légèrement sa maniabilité. Ces résultats sont confirmés par Hebhoub et al [83] qui s'explique par la quantité de poudre fine. Ce résultat existe dans les déchets de marbre, pénètre dans les pores, libérant ainsi l'eau piégée, et a une bonne maniabilité. D'autre part, Alyamaç et Aydin [84] ont constaté que l'utilisation du marbre réduit l'affaissement, réduisant ainsi la maniabilité.

Selon Monica et al [85], la substitution de sable naturel par le sable de déchet de marbre à 50% améliore l'ouvrabilité du béton, de même pour Boukhelkhal et al [86] qui ont substitué le ciment par les déchets de poudre de marbre dans le BAP . Tandis que Binici et al [87], ont montré que la substitution de sable naturel par le sable de déchet de marbre à 15% diminuait l'ouvrabilité des bétons.

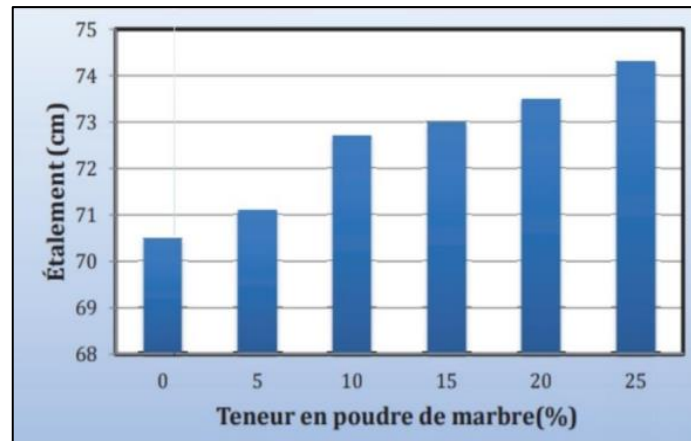


Figure 1.43 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre. [86]

Kore et al [88] ont aussi montré que l'ouvrabilité des bétons augmentait avec la substitution du déchet de marbre en tant que gros agrégat. Ce fait est attribuée à une faible absorption d'eau et la surface plane et lisse d'agrégat de marbre.

Chaid et al [89] ont trouvé que le temps d'écoulement d'un béton par substitution de ciment par les déchets de marbre augmentait de 60%, elle explique ceci par la présence des fillers calcaires qui peuvent avoir une influence sur la fluidité des BAP, en d'autres termes, ces fines des déchets de marbre freinent l'écoulement de béton. Boukhelkhal et al [86] ont aussi trouvé que la substitution du ciment par la poudre de déchet de marbre faisait diminuer le temps d'écoulement.

1.5.2.7. Effet des déchets de marbre sur le mortier et béton à l'état durci :

Hebhouh et al [83] ainsi que Binici et al [87] ont trouvé que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du taux de remplacement, sachant qu'elles sont limitées à des taux de remplacement de 15 % et 20 %. Demirel [90] a remarqué une augmentation de la résistance lorsque le taux de remplacement atteignait 100 %.

Les résultats obtenus par Alyamaç et Aydin [84] sont légèrement différents. La résistance augmente jusqu'à 90 % puis diminue. Ces résultats sont présentés sur la figure I .22.

Selon l'étude de Hebhouh et al [83], un mortier autoplaçant à base de sable de marbre résiduel contient un grand nombre de particules fines, qui favorisent l'accumulation de particules lors du processus de malaxage, augmentant ainsi la résistance. Cependant, la caractéristique du sable de marbre est que les particules sont plus nettes et poreuses, il est donc mieux combiné avec le coulis de ciment du mélange.

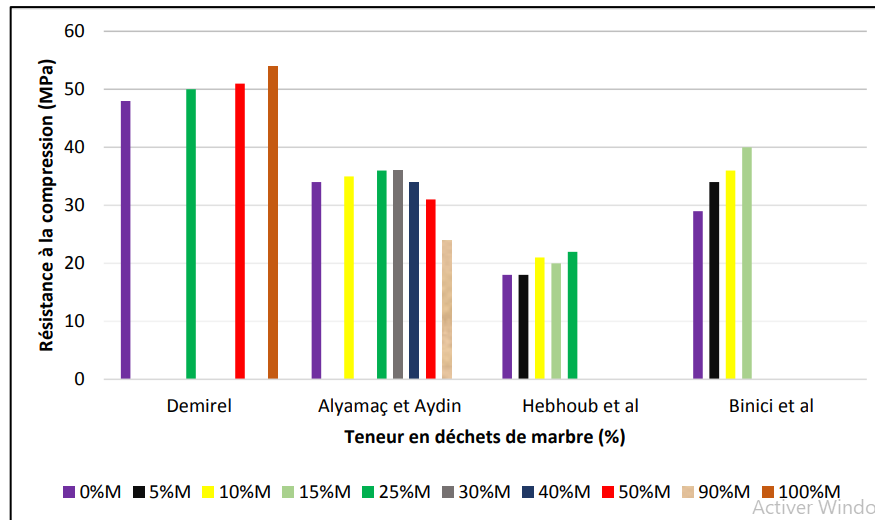


Figure 1.44 : Variation de la résistance à la compression. [90] [84] [83] [87]

Omar et al [91] ont trouvé que la valeur de résistance maximale était obtenue avec un taux de remplacement de 15 %, tandis que Rahman et al [82] ont trouvé que la meilleure valeur de résistance a été enregistrée à un taux de 30 % était inférieur au béton témoin.

Hebhoub et al [83] ont conclu que lorsque le pourcentage de déchets de sable de marbre dans le mortier autoplaçant augmente, la porosité augmente également, ce qui affecte l'absorption d'eau, contrairement à la diminution de porosité enregistrée par Demirel. [90]

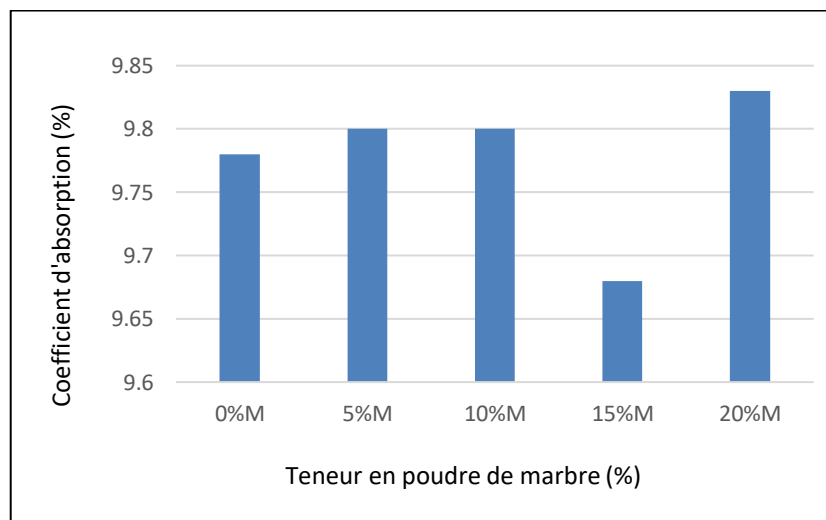


Figure 1.45 : Résultats d'absorption d'eau. [83]

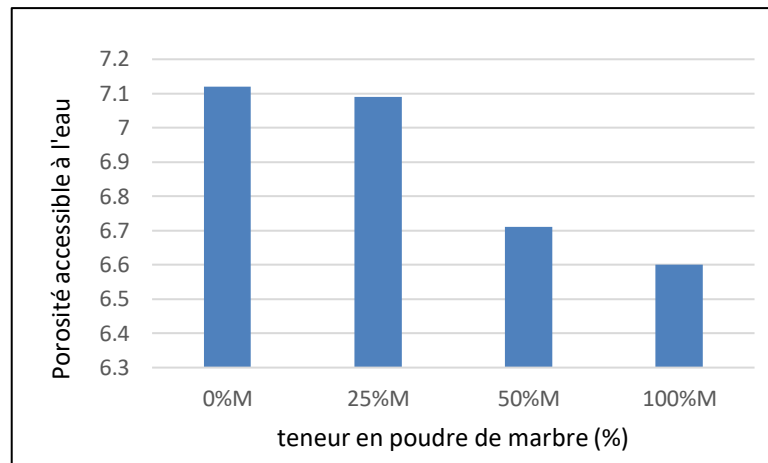


Figure 1.46 : Résultats de la porosité. [90]

Concernant le retrait des mortiers, Hebhoub et al [83] ont constaté que les déchets de sable de marbre ont une influence considérable. Les valeurs enregistrées mélangées au sable de marbre sont supérieures aux valeurs enregistrées du mortier témoin, et ces valeurs de retrait obtenues sont dues à l'évaporation de l'eau libre dans l'éprouvette.

Kore et al [88] ont trouvé que l'absorption d'eau dans les échantillons de béton augmentait avec l'augmentation du pourcentage de remplacement des agrégats grossiers naturels par agrégat de marbre. Boukhelkhal et al [86] ont aussi trouvé que l'absorption d'eau par capillarité dans le béton augmentait avec l'augmentation de substitution de DM.

1.6. Conclusion :

Cette partie de synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives à la formulation des mortiers autoplaçants utilisés dans le domaine du génie civil en particulier, leur origine, leur classification ainsi que les essais nécessaires pour les caractériser.

Dans ce présent chapitre, nous avons exposé également le recyclage dans le domaine de génie civil, les déchets de fibre de verre et les déchets de sable de marbre qui seront les éléments de base de notre étude expérimentale.

D'après la recherche bibliographique, les travaux effectués portaient sur les fibres de verre et non pas sur les déchets de fibres de verre, ce qui rendait cette étude particulièrement ardue à mener.

CHAPITRE 2 :

MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction :

Les matériaux utilisés dans cette étude ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des mortiers à l'état frais et à l'état durci. Donc, il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques des constituants rentrant dans la formulation des mortiers car chacun pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela dans ce chapitre, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du mortier ainsi la méthodologie suivie pour réaliser ce travail.

2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés :

2.2.1 Sable :

Le sable qu'on a utilisé est un mélange de deux sables : le premier sable provenant de Baghlia et le deuxième provenant de Boughezoul.

- **Sable de Baghlia "grosier"** : C'est un sable roulé de forme arrondie, de classe granulaire (0/5) mm, présenté dans la figure 2.1.
- **Sable de Boughezoul "fin"** : C'est un sable fin de classe granulaire (0/2.5) mm, présenté dans la figure 2.2.
- **Sable corrigé** : Mélange des deux types de sable (50% S.Baghlia + 50% S.Boughezoul), présenté dans la figure 2.3.



Figure 2.1 : Sable de Baghlia.



Figure 2.2 : Sable de Boughezoul.



Figure 2.3 : Sable corrigé.

2.2.1.1 Essai de l'équivalent de sable :

Cet essai est défini par la norme NF P 18-598, permettant de mesurer la propreté d'un sable. Il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

$$ESv = \frac{H2}{H1} \times 100 \quad ; \quad ESp = \frac{H'2}{H1} \times 100$$

Avec :

ESv : équivalent de sable visuel ;

ESp : équivalent de sable au piston ;

H1 : hauteur du sable propre et élément fins ;

H2: hauteur du sable propre seulement ;

H'2 : hauteur du sable au piston.

Tableau 2.1 : Equivalent de sable de Baghlia et Boughezoul.

ES SABLE	BAGHLIA	BOUGHEZOUL
ESV %	84	75
ESP %	82	70

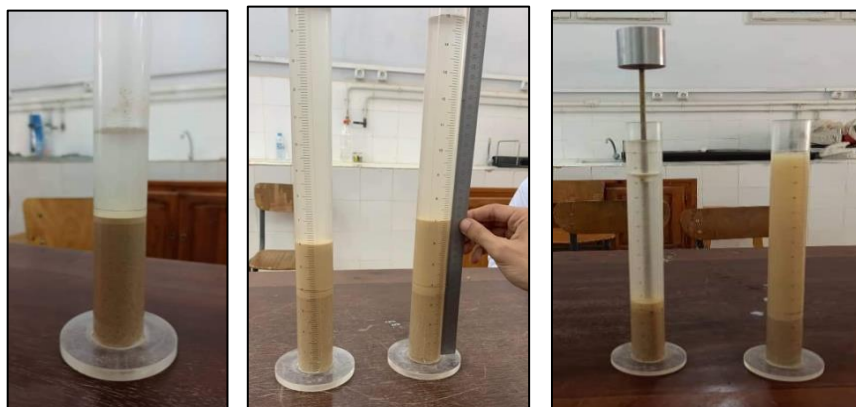


Figure 2.4 : Essai de l'équivalent de sable.



Figure 2.5 : Agitatrice électrique.

2.2.1.2 Essai de l'analyse granulométrique :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Une fois les matériaux lavés, ils sont séchés à l'étuve à température de 105°C. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

Un couvercle est disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appelle tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (Mf).

$$Mf = \sum Rc / 100$$

RC : refus cumulé en (%) sous les tamis.

Lorsque Mf est comprise entre :

- Sable fin : $1,8 < Mf < 2,2$
- Sable Moyen : $2,2 < Mf < 2,8$
- Sable Grossier : $2,8 < Mf < 3,2$

Les courbes granulométriques des deux sables (Baghlia et Boughezoul) ainsi que celle du sable corrigé sont données dans la figure 2.6.

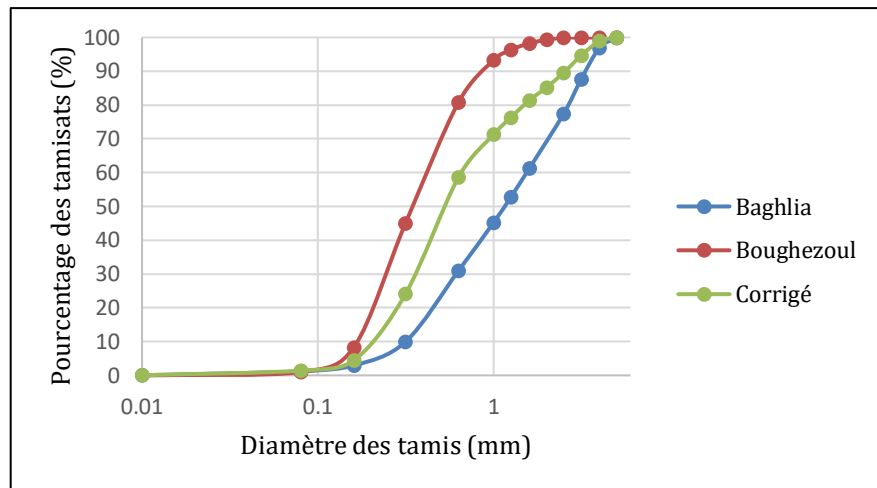


Figure 2.6 : Courbes granulométriques des sables.



Figure 2.7 : Tamiseuse électrique.

Afin d'obtenir un sable avec un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8, nous mélangeons deux sortes de sable (S/Baghlia, S/Boughezoul). Nous pouvons obtenir notre composition (pourcentage) en calculant les fractions comme suit :

Soit :

$Mf1 = 3.26$ Module de finesse du sable grossier de Baghlia.

$Mf2 = 1.69$ Module de finesse du sable fin de Boughezoul.

$Mf = 2,50$ Le module de finesse souhaité.

Nous calculons les fractions à prendre sachant que G1 est la fraction du sable de Baghlia et G2 est la fraction du sable de Boughezoul :

$$G1 = \frac{Mf - Mf2}{Mf1 - Mf2} = \frac{2,5 - 1,69}{3,26 - 1,69} = 0,516 \times 100 \approx 51,6 \%$$

$$G2 = \frac{Mf1 - Mf}{Mf1 - Mf2} = \frac{3,26 - 2,5}{3,26 - 1,69} = 0,478 \times 100 \approx 48,4 \%$$

Nous avons alors pris 50% de chaque sable afin d'obtenir notre mélange « sable corrigé ».

2.2.1.3 Essai de la masse volumique apparente :

Cet essai est réalisé selon la norme NF P18-554, elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M0 - M1}{V}$$

Tableau 2.2 : Masse volumique apparente des sables.

	Sable de Baghlia	Sable de bougezoul	Sable corrigé
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,61	1,55	1,53



Figure 2.8 : Essai de la masse volumique apparente.

2.2.1.4 Essai de la masse volumique absolue :

Cet essai est réalisé selon la norme NF P18-301, elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{v_2 - v_1}$$

Tableau 2.3 : Masse volumique absolue des sables.

	Sable de Baghlia	Sable de bougezoul	Sable corrigé
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,65	2,526	2,55



Figure 2.9 : Essai de la masse volumique absolue.

2.2.2 Ciment :

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment CEM II/B 42,5 de la cimenterie de Msila.

Les caractéristiques physiques et chimiques du ciment sont représentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 2.4 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment.

Composition chimique (%)											
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO libre	Cl ⁻	Ins.	P.F
59,31	17,14	4,8	2,82	2,61	0,48	0,67	1,65	1,415	0,024	3,1	10,14
Composition minéralogique (%)											
C ₃ S			C ₂ S			C ₃ A			C ₄ AF		
56			18			5			13		



Figure 2.10 : Essai de la masse volumique absolue du ciment.

2.2.3 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est l'eau de robinet fournie au laboratoire de génie civil, pour le façonnage des différents mélanges et des éprouvettes.

2.2.4 Superplastifiant :

Le superplastifiant utilisé dans notre travail pour les différents mélanges de mortier autoplaçant est le MEDAFLOW 30 qui est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération.

Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDA FLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Le MEDA FLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.



Figure 2.11 : Superplastifiant MEDAFLOW 30.

Tableau 2.5 : Caractéristiques du « MEDAFLOW 30 ».

Aspect	Liquide
Couleur	Marron
Extrait sec	30%
Densité	1.81±0.01
Ph	6 à 6.5
Teneur en chlore	≤ 1 g/l
Plage de dosage	De 0.5% à 2% en masse de poudre

Le MEDAFLOW 30 offre plusieurs avantages aux bétons et mortiers à savoir :

- Obtention d'un rapport E/C très faible.
- Amélioration considérable de la fluidité.
- Une très bonne maniabilité.
- Eviter la ségrégation.
- Faciliter la mise en œuvre.

2.2.5 Sable de déchet de marbre :

Afin d'obtenir le sable de marbre illustré à la figure 2.13, les déchets de marbre ont été broyés en petits morceaux avec un marteau, puis passés dans un concasseur de laboratoire. Ensuite, les déchets de sable de marbre obtenus ont été passés à travers un tamis de 5 mm pour obtenir du sable granulaire de qualité 0/5. La courbe granulométrique du déchet de sable de marbre est montrée dans la figure 2.12.

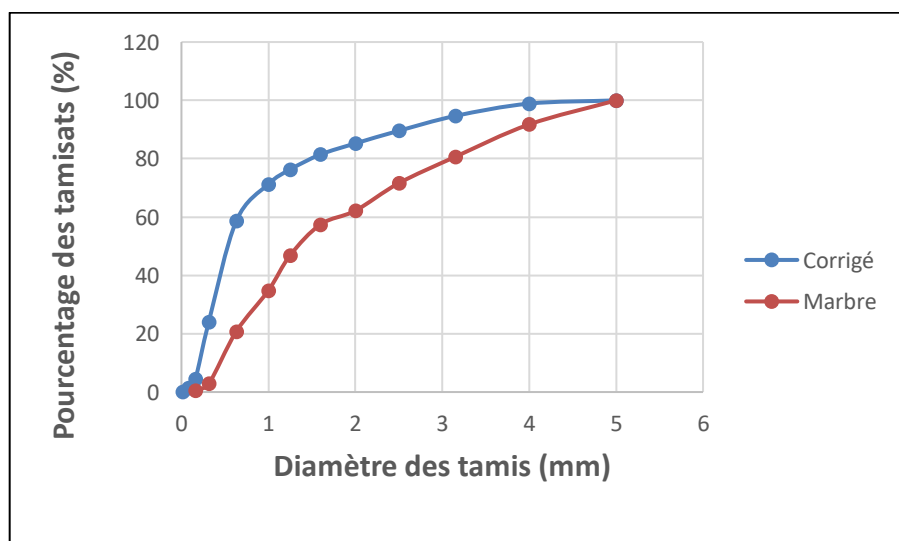


Figure 2.12 : Courbe granulométrique du sable de marbre et du sable corrigé.



Figure 2.13 : Sable de marbre obtenu.

Les caractéristiques physiques et chimiques du sable de marbre sont représentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 2.6 : Caractéristiques physiques du marbre.

Masse volumique absolue (kg/m ³)	2727,273
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1619,118
Coefficient d'absorption (%)	0,5
Module de finesse (M.F)	2,68

Tableau 2.7 : Caractéristiques chimiques du marbre.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	PaF
0,38	0,16	0,12	52,73	1,96	0	0	0	0,0008	42,78

2.2.6 Les fibres de verres :

Afin d'obtenir une variante de résultats et pour connaître l'importance de la méthode de recyclage et savoir son influence sur les différents essais à l'état frais et durcis, on a testé six méthodes de recyclage afin d'adopter par la suite les trois méthodes les plus faciles, les plus fiables et qui ont donné les meilleurs résultats d'après leurs méthodes de recyclage et ce qu'on recherche pour notre projet et avoir une large marche de possibilité.

Les six méthodes de recyclage effectuées lors de notre travail sont le broyeur à billes, concasseur, mixeur, à la main, à l'aide d'un ciseau, moulin à café et on a choisi par la suite les trois méthodes les plus faciles comme la méthode à la main, le moulin à café et le ciseau expliqué en détails dans ce qui suit.

➤ **Méthode 1 : Broyeur à bille**

Le broyage a été effectué à l'aide d'un broyeur au niveau du laboratoire de matériaux au pavillon 22 (génie des procédés), les dimensions de la jarre ($D=17\text{cm}$) avec 64 billes de diamètre ($D=3,5\text{cm}$) et 17 billes de remplissage de diamètre ($D=2,5\text{cm}$) pour une vitesse de roulement qui atteint 100 tours par minute.



Figure 2.14 : Broyeur à billes.

Un broyeur à billes est composé d'un tambour horizontal mis en rotation par un moteur, on le remplit partiellement par des fibres de verres environ la moitié de la quantité pesé auparavant puis on ajoute les éléments de broyage (boulet ou billes métalliques) 32 billes de $D=3,5\text{cm}$ et 8 billes de $D=2,5\text{cm}$, puis on verse le reste de la quantité des fibres et les billes. Une fois la rotation lancée pendant 2 heures avec une marche de 5-20-40-1h-2h respectivement, on a pu avoir absolument aucun résultat (le broyeur injectait les fibres de verres sur les bordures car ils disposent d'une très grande résistance) comme on peut le voir dans la figure 2.16 aucune variation de l'état des fibres de verre n'a été observé après 2h de broyage ce qui nous a conduit à éliminé cette méthode et ne pas travailler avec.

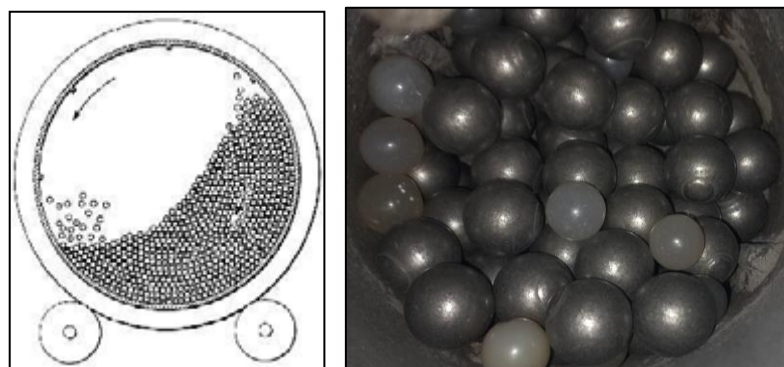


Figure 2.15 : Représentation schématique d'un broyeur à billes ainsi que les billes réelles dans le broyeur.



Figure 2.16 : Résultat après 2h de broyage.

➤ **Méthode 2 : Concasseur**

Un concasseur est constitué par une mâchoire fixe et une mâchoire mobile animée d'un mouvement de va-et-vient autour d'un axe horizontal. Le principe de fonctionnement d'un concasseur repose sur le processus de la réduction par pression. En effet, le mouvement de la partie mobile de la mâchoire entraîne progressivement les fibres vers l'espace cunéiforme de la structure. Ce qui cause par la même occasion le broyage du produit. La taille des roches produites correspond au réglage de l'écartement de la mâchoire.

Les fibres de verres sont introduites à la partie supérieure de l'appareil. Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe, elle écrase les fragments solides. Lorsqu'elle s'écarte, ceux-ci descendent dans une partie plus étroite ou ils sont à nouveau écrasés et ainsi de suite jusqu'à ce qu'ils atteignent l'orifice de sortie.

On a obtenu des fibres concassées après environ 5min, une très petite quantité est sortie par rapport à la quantité mise au début car les fibres de verres collent à la paroi, cette méthode est lente et non pratique.

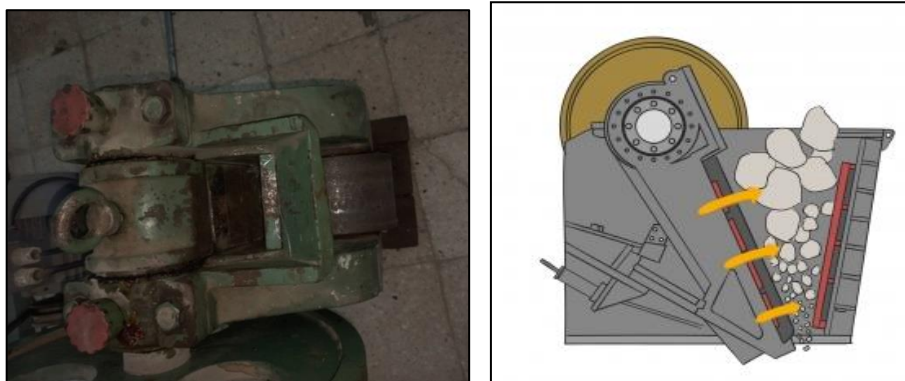


Figure 2.17 : Concasseur.



Figure 2.18 : Fibres de verre obtenues après concassage.

➤ **Méthode 3 : Mixeur**

Cette méthode consiste à poser les fibres de verres dans un mixeur électrique.

Après 20min de mixage, on a obtenu des fibres longues de la même manière qu’avec la méthode à la main, donc on élimine la méthode avec le mixer car elle prend beaucoup de temps.



Figure 2.19 : Fibres de verre obtenues après mixage.

➤ **Méthode 4 : A la main**

Après avoir essayé la méthode du mixeur, on a constaté qu’elle donne les mêmes résultats que les déchiqeter à la main en séparant les fibres de verre car elle est plus facile et plus rapide.

On obtient alors des fibres de verres sous forme de fil (FVF).



Figure 2.20 : Fibres de verre déchiquetées à la main (FVF).

➤ **Méthode 5 : A l'aide d'un ciseau**

Cette méthode consiste à découper les fibres de verres à l'aide d'un ciseau d'une façon aléatoire afin d'obtenir des morceaux très fins et petit comme le montre la figure 2.21.

Les résultats sont des fibres de verres découpées (FVD).



Figure 2.21 : Fibres de verre découpées au ciseau (FVD).

➤ **Méthode 6 : Moulin à café**

Pour cette méthode, on remplit le réservoir du moulin à café de fibres de verre et on lance l'appareil, le résultat est une poudre et quand on la rassemble on obtient des fibres de verres sous forme de coton (FVC).



Figure 2.22 : Moulin à café.



Figure 2.23 : Fibres de verre coton (FVC).

- **La méthode de remplacement des fibres de verre par masse volumique :**

Lors de l'incorporation des fibres de verre, on a opté pour la méthode de remplacement par masse volumique comme suit :

Masse volumique (g/l)	Volume de l'eau (l)	Poids des fibres (g)
0,5	1,5	0,75
1		1,5
1,5		2,25

2.3 Formulation des mortiers :

La méthode que nous avons choisie pour la formulation est la méthode japonaise d'Okamora. L'objectif de la formulation est de définir le mélange optimal des différents constituants afin d'aboutir à un mortier aux propriétés souhaitées.

En fixant les rapports $E/L=0,38$ et $S/M=0,50$, le pourcentage de superplastifiant est variable. Ce dosage sera vérifié en modifiant le pourcentage de superplastifiant sur la base du test de mortier frais par l'essai d'étalement (le diamètre D de la galette doit être compris

entre 270mm et 330mm), et par l'essai de l'entonnoir en V (le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2sec et 10sec).

Dans notre étude, 4 types de mortiers ont été formulés qui sont les suivants :

- Mortier autoplaçant témoin ;
- Mortier autoplaçant à base de déchet de sable de marbre recyclé (DM) ;
- Mortier autoplaçant à base de déchet de fibre de verre recyclée ;
- Mortier autoplaçant à base de (DM) + déchet de fibre de verre recyclée ;

Les proportions des constituants du mortier (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées à l'aide d'une feuille de calcul Excel qui figure dans l'annexe . La méthode de malaxage est expliquée comme suit :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une 1 minute afin d'homogénéiser le mélange.
- Verser la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau),
- Malaxer pendant une minute puis ajouter le restant de l'eau (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

Nb : On divise la quantité d'eau 1 (70%) et d'eau 2 en deux quantités de (50% / 50%) et on l'introduit à 2 reprises (30s de différence).

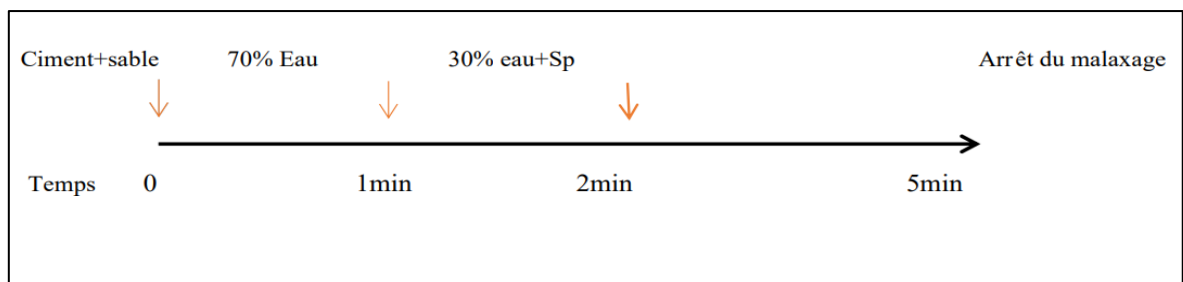


Figure 2.24 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant.

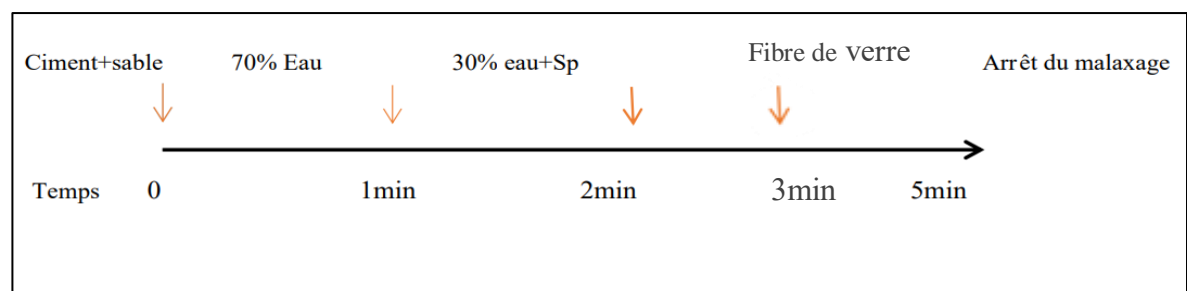


Figure 2.25 : Séquence de malaxage du MAP à base de fibre de verre.

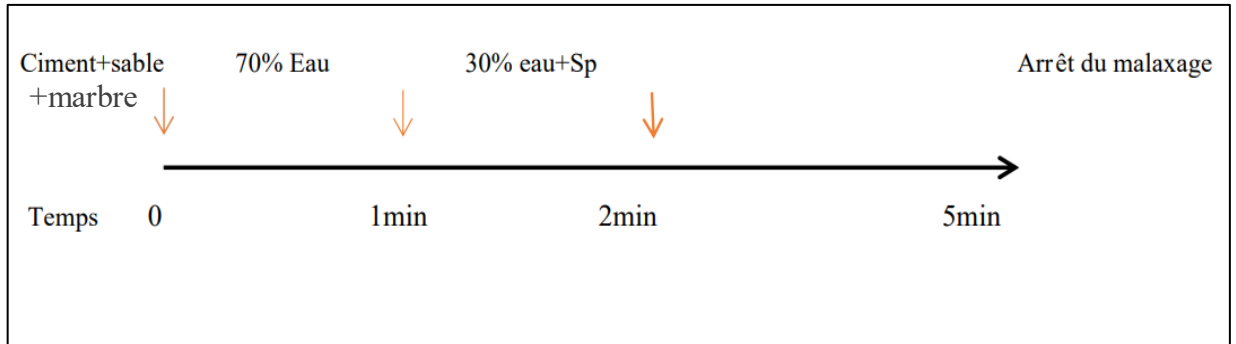


Figure 2.26 : Séquence de malaxage du MAP à base de sable de marbre.

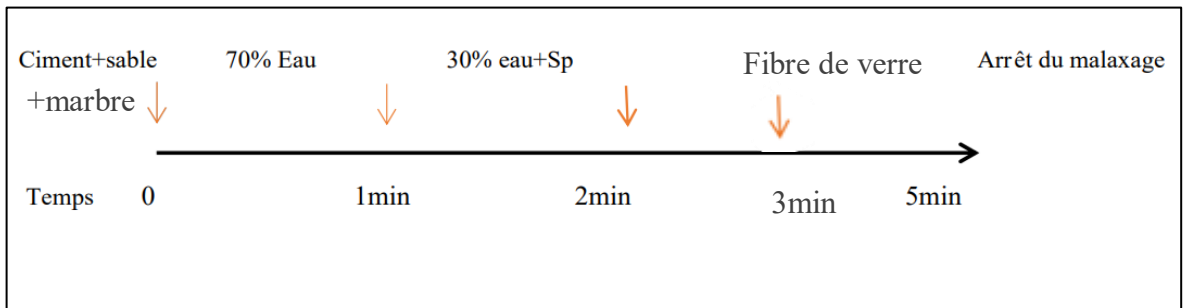


Figure 2.27 : Séquence de malaxage du MAP à base de fibre de verre et déchet de sable de marbre.



Figure 2.28 : Malaxeur.

2.4 Les essais réalisés sur MAP à l'état frais :

2.4.1 Essai d'étalement au Mini-Cône :

L'appareil se compose d'un moule tronconique creuse de 60 mm de hauteur 70mm et du bas 100mm. Le cône est placé au centre d'une plaque et rempli de mortier, le cône est soulevé et le mortier s'écoule sur la table. Le diamètre est mesuré suivant les deux détractions perpendiculaires.

$$D_{Moy} = \frac{d1 + d2}{2}$$



Figure 2.29 : Essai d'étalement au Mini-Cône.

2.4.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel) :

Cet essai permet une évaluation qualitative du MAP, il caractérise la capacité de passage du mortier à travers un orifice.

Le principe de cet essai consiste à remplir l'entonnoir avec du mortier puis mesurer le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de la trappe de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Le temps d'écoulement doit être compris entre 2s et 10s pour un MAP.

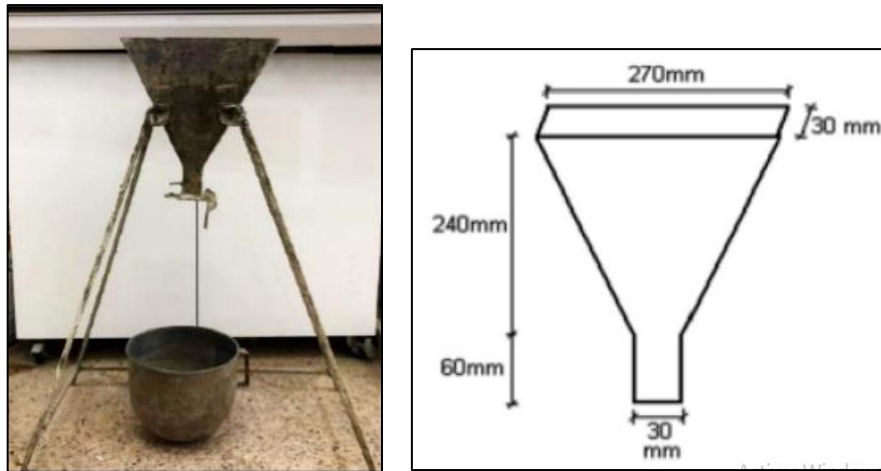


Figure 2.30 : Dispositif de l'essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).

2.4.3 L'essai de l'air occlus :

L'essai consiste à mesurer le pourcentage d'air dans le mortier en suivant ces étapes :

- Remplir le récipient à ras ;
- Positionner et fixer le couvercle, fermer la soupape principale et ouvrir le robinet A et le robinet B ;
- De l'eau est introduite dans le robinet A jusqu'à ce qu'elle ressorte du robinet B, puis une pression est appliquée avec une petite pompe manuelle ;
- Ajuster avec le bouton correcteur et lancer l'analyse avec le bouton de piston. Le pourcentage d'air total est lu directement en %.



Figure 2.31 : Essai de l'air occlus.

2.4.4 Essai de la masse volumique du mortier :

A l'état frais, la masse volumique des mortiers est mesurée sur des éprouvettes compactées à la table à choc afin de minimiser le pourcentage des vides conformément à la norme européenne NF EN 12390 -7.

La méthode consiste à utiliser un récipient de volume V et de masse M1 connus. Après compactage, on pèse une masse M2 et la masse volumique est calculée par l'équation :

$$\rho = \frac{M1 - M2}{V}$$

M1 : poids de mortier avec les moules (kg).

M2 : poids de moules (kg).

V : volume de moules (m³).

2.5 Les essais réalisés sur MAP à l'état durci :

Des éprouvettes de (4x4x16) cm³ de dimension doivent être remplis pour tous les essais sur le MAP à l'état durci. Le coulage doit être dans des moules métalliques à trois alvéoles préalablement huilés. On introduit le MAP sans vibration dans les moules par deux couches pour assurer l'homogénéité des éprouvettes. On enlève l'excédent de mortier par arasage à l'aide d'une petite spatule ou d'une règle. La surface des éprouvettes est lissée et recouverte d'un film plastique pendant 24 heures. Après démoulage (24h) elles sont placées dans un bac plein d'eau saturée en chaux à une température de 20°C±2°C pour assurer une cure normalisée.



Figure 2.32 : Moule prismatique à mortiers.



Figure 2.33 : Des échantillons 4×4×16 cm³.

2.5.1 La résistance à la traction par flexion :

Pour effectuer les essais de traction par flexion, on procède à l'essai sur des échantillons prismatiques de dimensions (4x4x16 cm³) mûris à l'eau. La résistance à la traction obtenue à 28 jours provient de la moyenne des résultats sur trois échantillons. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion.

La résistance à la traction par flexion est calculée suivant la formule suivante :

$$R_f = \frac{1,5 \times F \times l}{b^3}$$

R_f : la résistance en flexion, en N/mm² ou en MPa.

b : le côté de la section carrée du prisme, en mm.

F : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

l : la distance entre les appuis, en millimètres.



Figure 2.34 : Essai de flexion pour MAP.

2.5.2 La résistance à la compression :

La résistance à la compression du mortier est déterminée sur les deux parties résultantes de l'essai de résistance à la flexion ($40 \times 40 \text{ mm}^2$).

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

Les résistances en compression ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers. La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F}{b^2}$$

R_c : la résistance en compression, en N/mm^2 ou en MPa.

F : la charge maximale à la rupture, en N.



Figure 2.35 : Essai de compression pour MAP.

2.5.3 Absorption capillaire :

Les essais d'absorption renseignent globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Ils sont aussi utilisés en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du mortier.

Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette de dimension (4x4x16 cm³) du mortier posé à sa base sur de petits supports de telles manières que seuls les 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvettes soient immergés.

On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps. La variation de la masse est mesurée après 1min, 5min, 10min, 20min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 1jour. A chaque échéance, l'éprouvette est sorti du récipient, pesée (M) et replacée dans le récipient en position verticale.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur deux éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

Le coefficient d'absorption capillaire I est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{Q}{A \times \gamma\omega}$$

I : coefficient d'absorption (cm),

Q : quantité d'eau absorbé en (g),

A : surface en contact avec l'eau (cm²),

$\gamma\omega$: masse volumique d'eau = 1g/cm³.

On trace Q/A en fonction de \sqrt{t} puis on trace la régression linéaire entre Q/A et \sqrt{t} puis on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui donnent le coefficient de sportivité (s) des gros pores et des petits pores.

Le coefficient de sportivité est déterminé par l'équation suivante :

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}}$$

A : surface en contact avec l'eau en cm^2 ,

Q : quantité d'eau absorbé en (g),

t : temps écoulé en (s),

S : coefficient de sportivité ($\text{cm}/\sqrt{\text{s}}$).



Figure 2.36 : Absorption d'eau par succion capillaire.

2.5.4 Porosité accessible à l'eau :

L'essai permet d'évaluer un volume de pores ouverts accessibles à l'eau et nous permet aussi de mesurer la masse volumique apparente des échantillons. La porosité, notée ε (%), correspond au rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent.

L'essai consiste à faire sécher les éprouvettes à une température de 80 ± 2 °C jusqu'à masse constante. On détermine la masse sèche d'échantillon (M_{sec}) à l'aide d'une balance de précision de 0.1g, ensuite on place les éprouvettes dans une enceinte fermée

(dessiccateur) sous une pression constante pendant 4h, 3h sous vides et une heure en introduisant l'eau jusqu'à saturation et recouvrement des éprouvettes d'environ 20mm, puis on déconnecte la pompe et les éprouvettes sont maintenu en saturation pendant 18 ± 2 h. Enfin on fait sortir les éprouvettes et on les pèse dans l'eau (M_{eau}) à l'aide d'une balance hydrostatique et on pèse à nouveau (M_{air}). La porosité accessible à l'eau ε (%) est donnée par la relation suivante :

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

La masse volumique apparente est définie par l'expression :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$



Figure 2.37 : Scie pour préparation des éprouvettes.



Figure 2.38 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.

2.5.5 La conductivité thermique :

Le CT-mètre développé par le CSTB a été utilisé pour déterminer les valeurs du coefficient de conductivité thermique conforme à la norme NF EN 993-15 [152], les éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16 cm³) ont été utilisés. Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de $01 \pm 0^{\circ}\text{C}$. Les échantillons sont ensuite séchés grâce à une étuve à $(50 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante. Puis, on a eu recours à la méthode du fil chaud qui permet d'estimer la conductivité thermique et la chaleur spécifique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif.

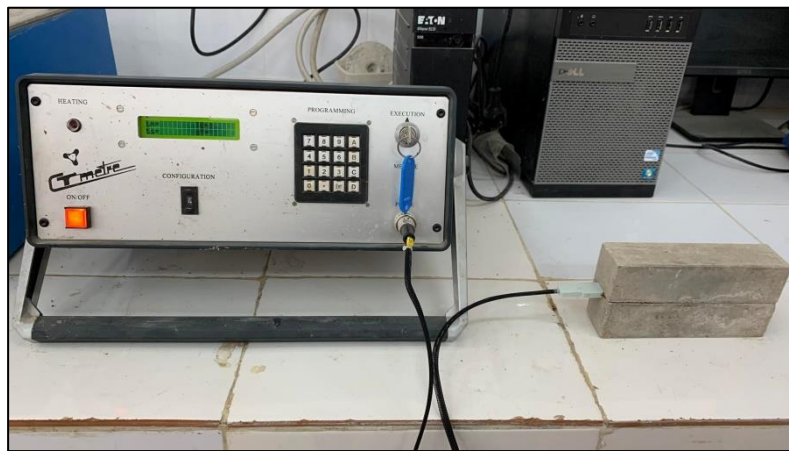


Figure 2.39 : Essai de la mesure de conductivité thermique.

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers autoplçants, la formulation des mortiers et l'aide des méthodes d'élaboration. Les essais réalisés sur les mortiers à l'état frais et durcis ainsi que les essais de durabilité ont été présentés.

On a conclu que les résultats obtenus des matériaux utilisés sont appropriés aux conditions requises pour la formulation d'un mortier autoplçant.

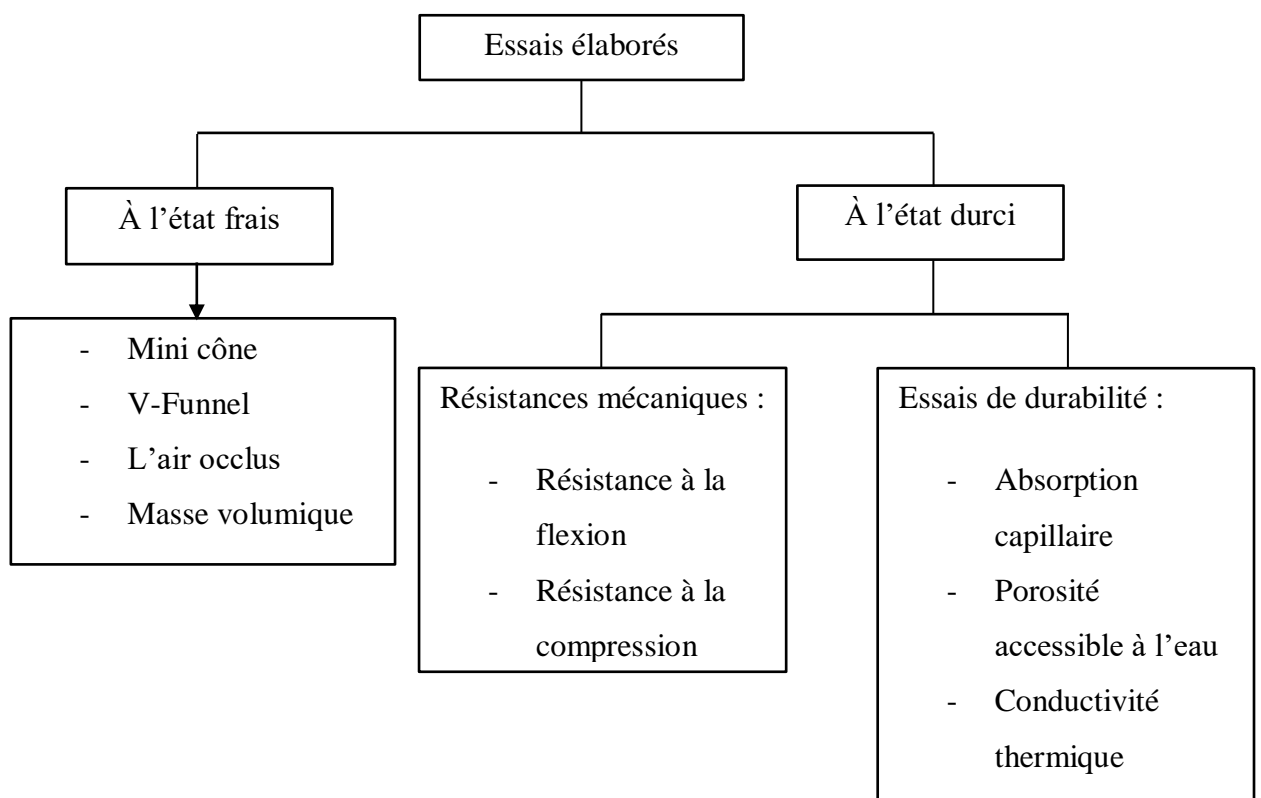


Figure 2.40 : Organigramme des essais réalisés sur mortiers autoplçants.

CHAPITRE 3 :
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons, discutons et interprétons les résultats d'essais sur les mortiers autoplaçants à l'état frais et à l'état durci avec une combinaison de déchets de fibres de verre et déchets de marbre.

Nous commençons par l'optimisation du superplastifiant, ensuite nous passons à la discussion des résultats sur mortier autoplaçant à l'état frais tels que l'étalement au mini cône, le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'air occlus ainsi que la masse volumique apparente, ces essais sont effectués immédiatement à la fin du malaxage, les essais sur le mortier frais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.

A l'état durci, 210 éprouvettes prismatiques ont été confectionnées pour des essais mécaniques (résistances à la compression et à la flexion) ainsi que les essais de durabilité (absorption capillaire et porosité accessible à l'eau) ainsi que la conductivité thermique.

3.2. Optimisation du superplastifiant :

Nous avons commencé par l'optimisation de la quantité de superplastifiant sur le mortier autoplaçant de référence en fixant les rapports $S/M=0.5$, et $E/L=0.38$ et en variant le dosage du superplastifiant (Sp) de 0,8% à 1,3% de la quantité de ciment avec un intervalle de 0,1% afin d'obtenir un MAP optimal.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Variation du dosage en superplastifiant.

Ciment (g)	Sable (g)	Eau (kg)	Sp (%)	Sp (g)
1047	1847	0,417	0,8	8,376
			0,9	9,423
			1	10,47
			1,1	11,517
			1,2	12,564
			1,3	13,611

3.2.1. Essai d'étalement au Mini-Cône :

Le tableau 3.2 représente les résultats de l'essai d'étalement réalisé sur MAP, en modifiant la quantité de superplastifiant jusqu'à l'obtention des résultats optimaux.

Tableau 3.2 : Valeurs d'étalements des MAP en fonction du dosage en superplastifiant.

Dosage en SP (%)	Etalement (mm)
0,8	188,5
0,9	215,0
1	245,5
1,1	260,0
1,2	309,5
1,3	372,5

Ces valeurs sont représentées dans la figure 3.1. Les résultats optimaux pour un MAP doivent être compris entre 270 et 330mm.

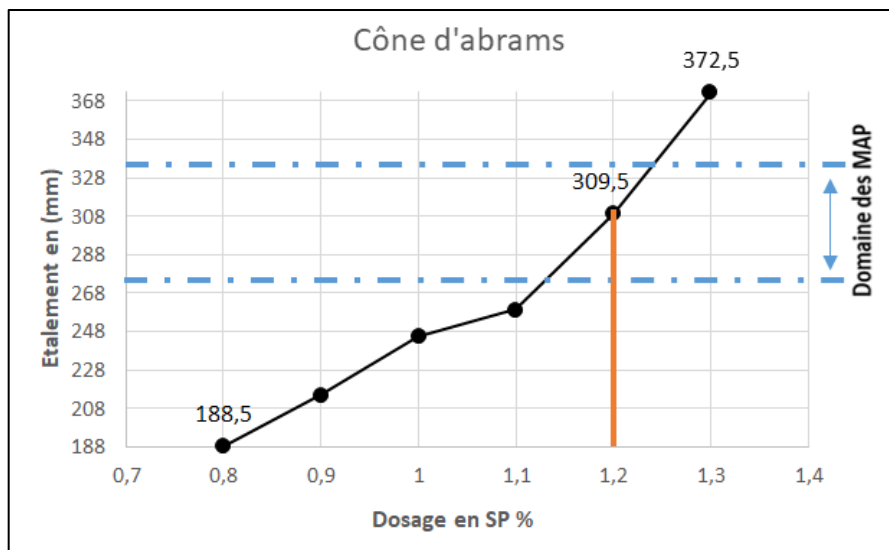


Figure 3.1 : Etalement en fonction du dosage en superplastifiant.

D'après les résultats, nous remarquons qu'avec l'augmentation de la quantité du superplastifiant, l'étalement augmente car le superplastifiant disperse les particules de ciment et améliore la fluidité du mélange. Les résultats obtenus au dosage de 1.2% de la quantité de ciment en SP donnent un bon étalement avec une galette homogène avec

absence de ségrégation et de ressuage et un diamètre de 309.5mm qui est compris entre 270 et 330mm. Par contre, les autres dosages en Sp ne donnent pas de diamètre dans le domaine recommandé par la norme.

3.2.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel)

Le tableau 3.3 et la figure 3.2 représentent les résultats du temps d'écoulement du mortier en fonction de la quantité du superplastifiant.

Tableau 3.3 : Valeurs du temps d'écoulement des MAP en fonction du dosage en superplastifiant.

Dosage en SP (%)	Ecoulement (s)
0,8	12
0,9	8
1	3,41
1,1	2,53
1,2	2,26
1,3	1,48

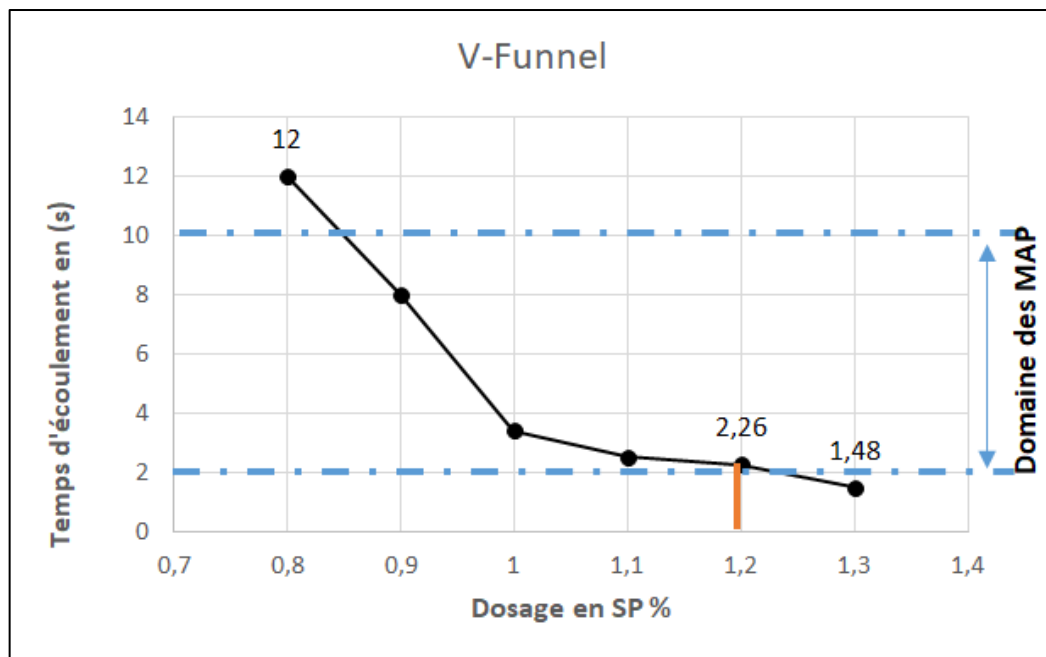


Figure 3.2 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.

Selon les résultats obtenus, on constate que les dosages de 0,8%, 0,9% et 1.3% ne donnent pas un bon temps d'écoulement, tandis que les dosages de 1%, 1,1% et 1,2% sont conformes au temps d'écoulement qui doit être compris entre 2s et 10s, alors nous optons pour le dosage de 1,2% de SP.

3.3. Effet des déchets de fibres de verre recyclées :

3.3.1. L'absorption de l'eau par les fibres de verre :

Après avoir fixé le dosage optimal en superplastifiant qui est de 1,2% et commencé le malaxage au moment de l'ajout des fibres, nous avons remarqué que le mortier est devenu très compact (voir figure 3.4), ce qui fait qu'il n'est plus dans le domaine des MAP. Ce changement de comportement est dû au fait que les fibres absorbent une certaine quantité d'eau du mélange.

Afin de parier à ce problème, nous avons décidé d'observer le comportement d'une quantité de fibres immergée dans l'eau à différents intervalles de temps, nous mesurerons alors l'augmentation de la masse des fibres en fonction du temps.

La variation de la masse est mesurée par 12 pesées (la première à sec et les suivantes immergées dans l'eau puis jetées afin de ne pas avoir des pertes de masse dû à la finesse des fibres qui colle en surface après 1min, 5min, 10min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h. A chaque échéance, les fibres de verre sont sorties du récipient et pesées (M).

Mode opératoire :

- On pèse une masse initiale de fibres de verre $M_1 = 2g$;
- On verse de l'eau dans le récipient afin d'immerger la quantité de fibre de verre ;
- Après un temps t , on enlève les fibres et on applique une légère pression afin d'enlever l'excès ;
- On prend la masse des fibres absorbées M_2 ;

L'absorption des fibres de verre est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

Le tableau 3.4 récapitule les résultats obtenus après 24h.

Tableau 3.4 : Les valeurs du coefficient d'absorption des fibres de verre en fonction du temps.

Temps d'absorption (h)	Masse de l'eau absorbée par les fibres de verre	Coefficient d'absorption	Coefficient d'absorption (%)
0	0,00	0,000	0,000
0,016	1,91	0,955	95,50
0,083	2,00	1,000	100,0
0,166	2,31	1,155	115,5
0,5	2,51	1,255	125,5
1	2,53	1,265	126,5
2	2,57	1,285	128,5
3	2,84	1,420	142,0
4	3,01	1,505	150,5
5	3,05	1,525	152,5
6	3,06	1,530	153,0
24	3,06	1,530	153,0

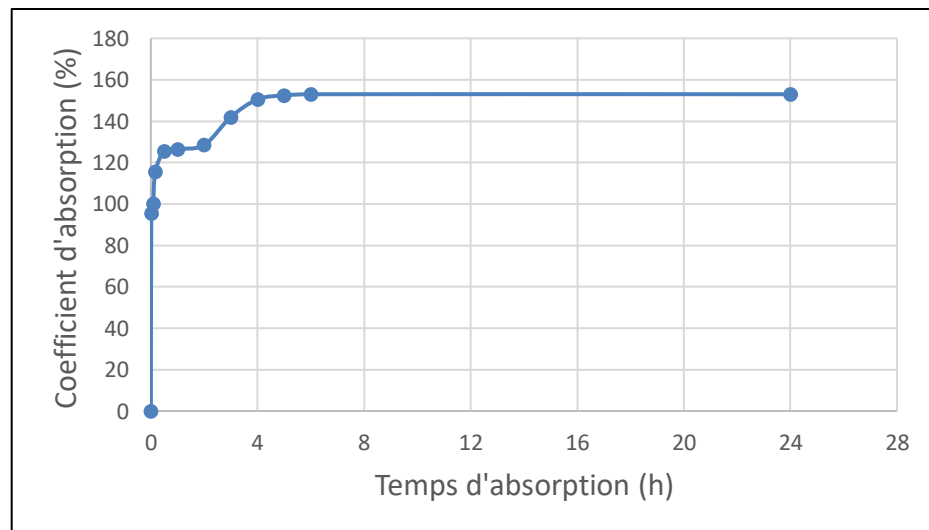


Figure 3.3 : Absorption des fibres de verre en fonction du temps.

La figure 3.3 nous permet de mieux comprendre le comportement des fibres de verre en présence de l'eau, nous remarquons que les fibres peuvent absorber jusqu'à 150% de leurs poids, donc toutes les fibres qui vont être utilisées dans les essais à l'état frais et durci seront immergées dans l'eau pendant 24 heures.



Figure 3.4 : l'état du mortier après l'absorption de leau de gachage par les fibres.

3.3.2. Les essais réalisés à l'état frais :

3.3.2.1. Mini cône :

Nous avons confectionné 10 mélanges différents des mortiers (MAP) avec l'incorporation de trois types de fibres obtenus des 3 méthodes de recyclage. La nomination des fibres est donnée dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Les differents mélanges et leurs désignation.

Désignation	Type de fibre	Dosage en fibre (%)
MAP R	Reference (sans fibre)	0
FVC	Fibre de verre (recyclée sous forme de coton)	0,5
		1,0
		1,5
FVD	Fibre de verre (recyclée sous forme découpée)	0,5
		1,0
		1,5
FVF	Fibre de verre (recyclée sous forme de fil)	0,5
		1,0
		1,5

La figure 3.4 montre l'étalement de différents types de mortiers en fonction du dosage en fibres de verre recyclées.

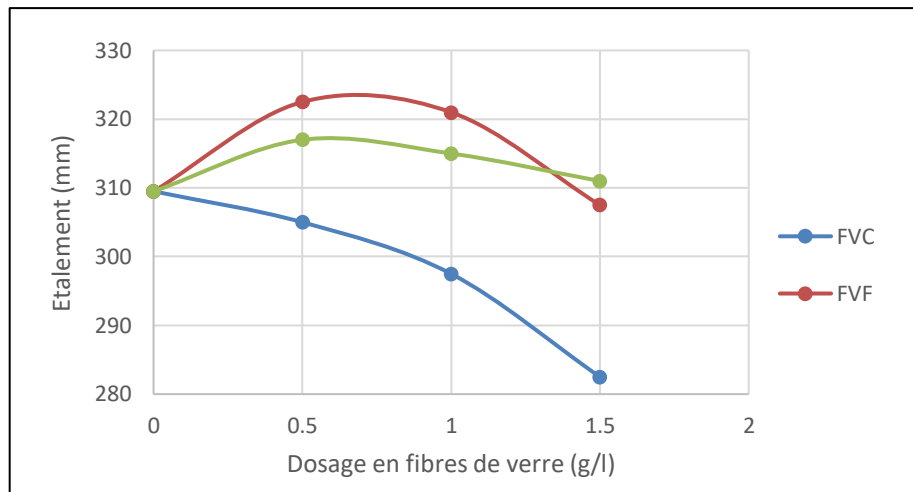


Figure 3.4 : Etalement en fonction du dosage en fibres de verre.

Tableau 3.6 : Valeurs d'étalements des MAP en fonction du dosage en fibres de verre.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Etalement (mm)
MAP	0	309,5
FVC	0,5	305
	1	297,5
	1,5	282,5
	1,5	282,5
FVF	0,5	322,5
	1,0	321
	1,5	307,5
FVD	0,5	317,
	1	315
	1,5	311
	1,5	307,5

Nous remarquons une réduction des valeurs d'étalement des mortiers fibrés selon le dosage par rapport au mortier témoin pour les fibres coton (FVC), concernant les fibres en fil (FVF) et les fibres découpées (FVD), la valeur d'étalement augmente par rapport au MAP témoin. Cependant, en mettant de côté le mortier référence et en comparant les mortiers à différents dosages de fibres, nous remarquons que l'étalement diminue en fonction de l'augmentation du dosage en fibres ceci quel que soit le type de fibres recyclés utilisés. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du mortier, ainsi que leur absorption qui est très élevée ce qui conduit à une diminution de maniabilité. Des résultats similaires ont été observés par Sanjeev et al. [92]

3.3.2.2. V-Funnel :

L'étude de l'écoulement des différents types de mortier et les différents dosages en fibre de verre ont été effectués, La figure 3.5 représente le temps d'écoulement en fonction du dosage en fibres de verre.

Tableau 3.7 : Valeurs du temps d'écoulement des MAP en fonction du dosage en fibres de verre.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Temps d'écoulement (s)
MAP	0	2,26
FVC	0,5	3,08
	1	3,5
	1,5	3,8
FVF	0,5	3,3
	1	3,38
	1,5	3,42
FVD	0,5	3,1
	1	3,2
	1,5	3,4

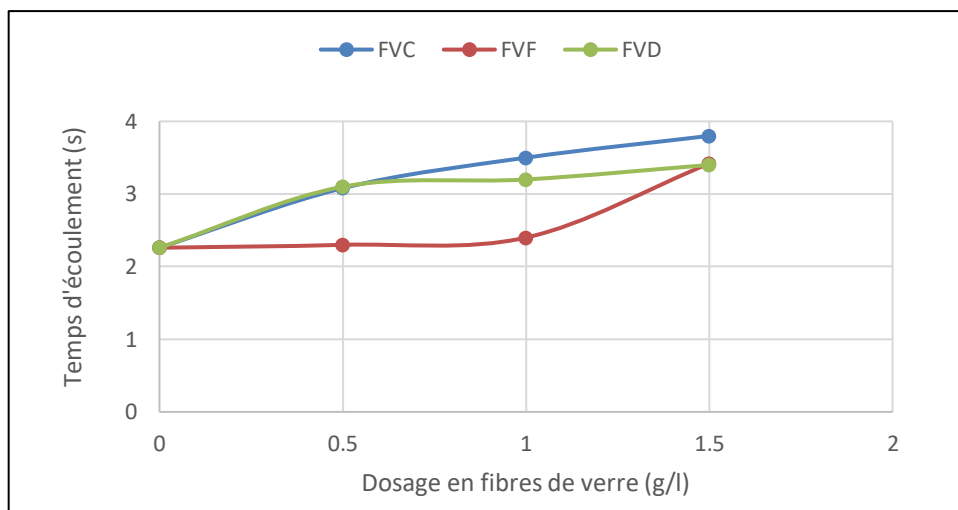


Figure 3.5 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en fibres de verre.

Nous avons remarqué une augmentation des valeurs d'écoulement des mortiers fibrés selon le dosage par rapport au mortier témoin pour tous les types de fibres de verre. Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus par l'essai d'étalement.

3.3.2.3. Air occlus et masse volumique :

L'essai de l'air occlus et de la masse volumique ont été mené seulement sur le mortier à fibres recyclés sous formes de fils, les résultats sont représentés dans les tableaux 3.8et 3.9 ainsi que les figures 3.6.

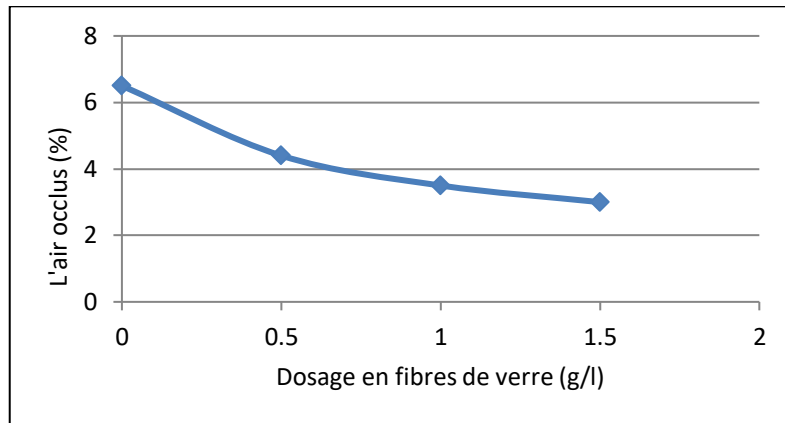


Figure 3.6 : L'air occlus en fonction du dosage en fibres de verre.

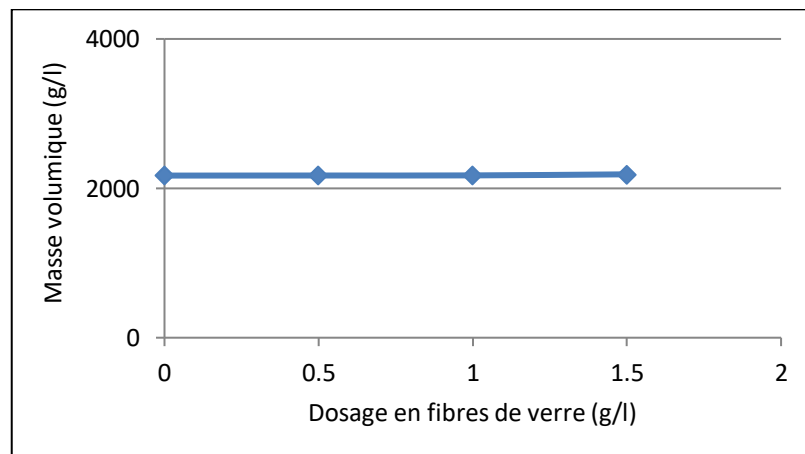


Figure 3.7 : La masse volumique en fonction des fibres de verre.

Nous remarquons que les valeurs de l'air occlus diminuent en fonction de l'augmentation du dosage en FVF, alors que la masse volumique augmente avec l'augmentation du dosage en fibres. Ceci peut être dû à la forme allongée des fibres qui tendent à remplir les vides.

3.3.3. Les essais réalisés à l'état durci :

3.3.3.1. La résistance à la flexion :

La résistance à la flexion selon les types de fibres est représentée dans les figures 3.8, 3.9, et 3.10 ainsi que selon les différents âges d (figures 3.11, 3.12 et 3.13).

Tableau 3.8 : Les valeurs de la résistance à la flexion.

Type de mortier	Dosage en fibre (g/l)	Résistance à la flexion (MPa)					
		07 Jours		14 Jours		28 Jours	
MAP	0	R1=5,06	Rm=5,47	R1=11,96	Rm=11,79	R1=13,38	Rm =13,43
		R2=5,88		R2=11,62		R2=13,47	
FVC	0,5	R1=8,45	Rm=8,14	R1=15,71	Rm =15,71	R1=16,71	Rm =15,95
		R2=7,83		R2=15,71		R2=15,18	
	1	R1=6,67	Rm=6,2	R1=14,50	Rm =14,62	R1=19,23	Rm =19,15
		R2=5,65		R2=14,74		R2=19,07	
	1,5	R1=4,77	Rm=4,98	R1=14,90	Rm =15,21	R1=17,59	Rm =17,95
		R2=5,19		R2=15,52		R2=18,30	
FVD	0,5	R1=5,66	Rm=6,00	R1=15,26	Rm =15,23	R1=16,40	Rm =16,43
		R2=6,34		R2=15,19		R2=16,46	
	1	R1=5,03	Rm=5,515	R1=13,32	Rm =13,57	R1=17,10	Rm =17,11
		R2=6		R2=13,81		R2=17,12	
	1,5	R1=5,21	Rm=5,435	R1=15,85	Rm =15,44	R1=18,04	Rm =17,69
		R2=5,66		R2=15,03		R2=17,34	
FVF	0,5	R1=6,08	Rm=5,705	R1=13,14	Rm =13,34	R1=16,40	Rm =16,23
		R2=5,33		R2=13,57		R2=16,06	
	1	R1=6,57	Rm=6,01	R1=14,09	Rm =14,44	R1=18,06	Rm =17,89
		R2=5,45		R2=14,78		R2=17,71	
	1,5	R1=7,04	Rm=6,825	R1=13,76	Rm =13,81	R1=19,47	Rm =18,83
		R2=6,61		R2=13,86		R2=18,18	

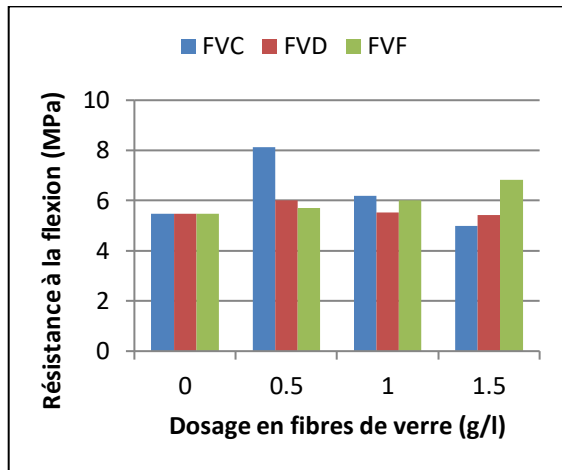


Figure 3.8 : La résistance à la flexion à 7 jours.

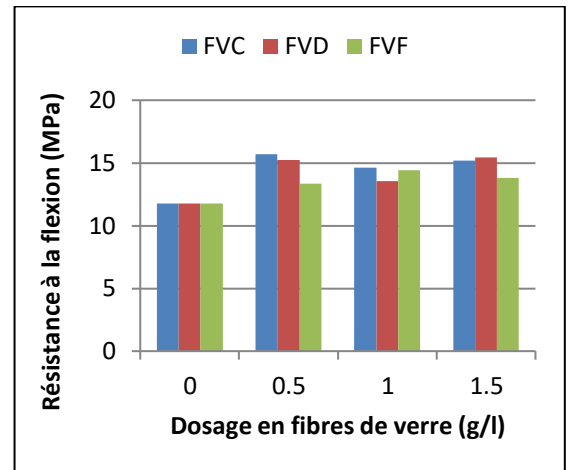


Figure 3.9 : La résistance à la flexion à 14 jours.

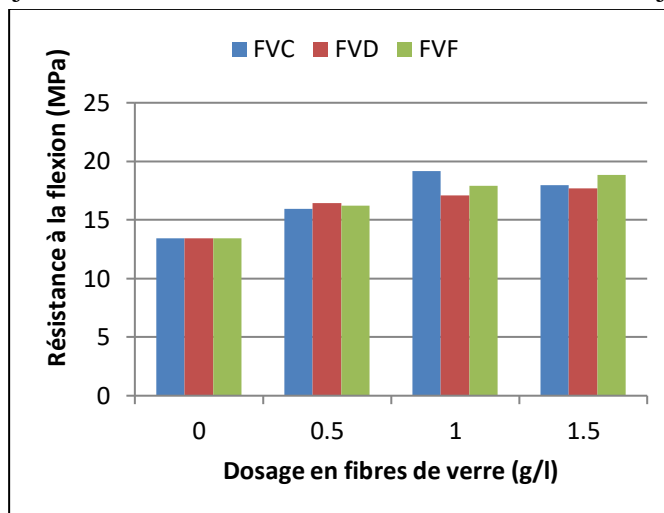


Figure 3.10 : La résistance à la flexion à 28 jours.

A l'issu des résultats les constatations suivantes ont été noté :

- valeurs de la résistance sont assez comparables et restent supérieures au MAP de référence. A 28 jours, la plus grande valeur de résistance est obtenue pour un dosage de 1g/l.
- Concernant les fibres découpées les valeurs sont relativement comparables et supérieures au mortier de référence sauf pour la résistance à la flexion à 7jours pour un dosage de 1.5g/l qui est légèrement inférieure au MAP de référence.
- En ce qui concerne les fibres en fils les résultats augmentent avec l'augmentation du dosage en fibres ceci pour 7 jours et 28 jours. A 14 jours, les valeurs restent comparables.

Aussi il a été judicieux de voir la comparaison par rapport à l'âge de chaque type ce qui a permis de tracer les figures 3.11, 3.12 et 3.13.

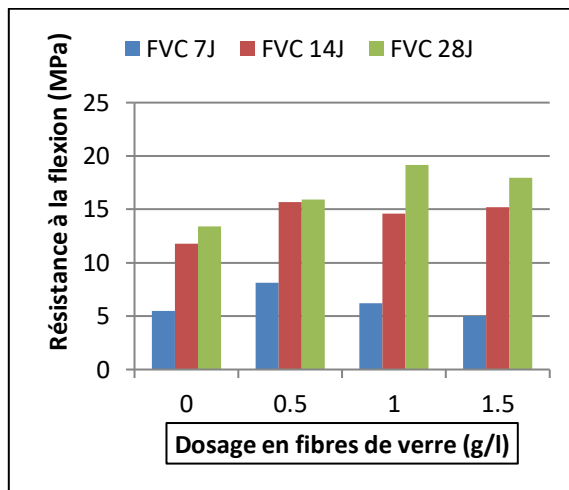


Figure 3.11 : La résistance à la flexion (FVC) à 7/14/28 jours.

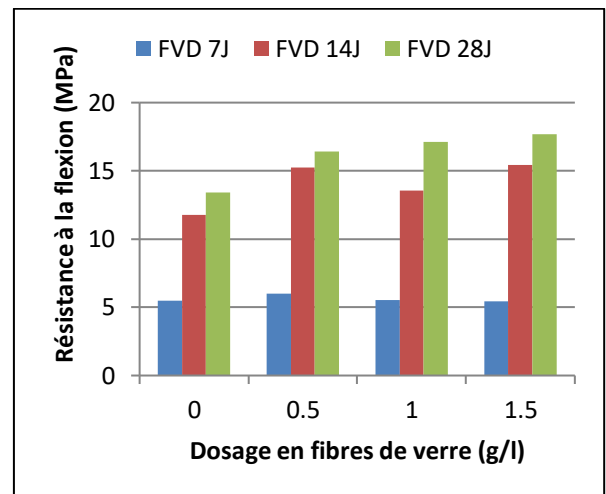


Figure 3.12 : La résistance à la flexion (FVD) à 7/14/28 jours

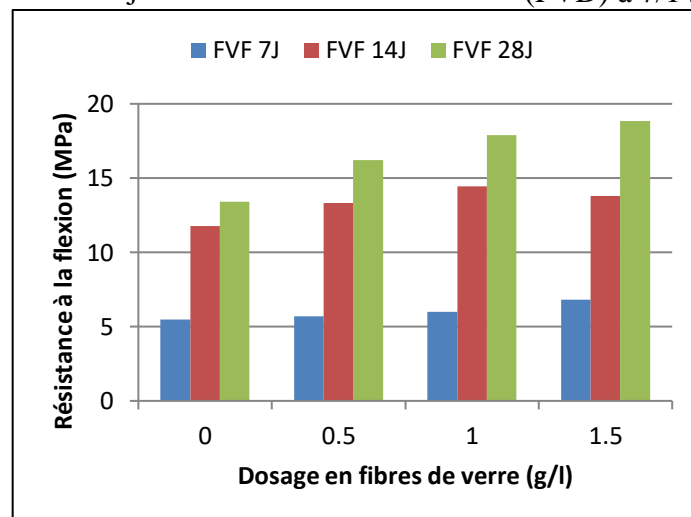


Figure 3.13 : La résistance à la flexion (FVF) à 7/14/28 jours.

Les résultats montre que l'augmentation de la résistance s'explique par le fait que les fibres permettent de limiter les fissurations. D'après Babar et Qureshi [93] la résistance à la flexion est optimale pour un dosage de 0.5g/l.

3.3.3.2. La résistance à la compression :

Les résultats de la résistance à la compression sont donnés dans le tableau 3.11 et ils sont représentés dans les figures 3.14, 3.15, 3.16.

Tableau 3.9 : Valeurs de la résistance à la compression.

Type de mortier	Dosage en fibre (g/l)	Résistance à la compression (Mpa)					
		07 Jours		14 Jours		28 Jours	
MAP	0	R1=42,7	Rm=42,95	R1=48	Rm=49,65	R1=56,4	Rm =55,7
		R2=42		R2=51,3		R2=55	
FVC	0,5	R1=51,3	Rm=50,1	R1=53,5	Rm=53,35	R1=57	Rm =58,65
		R2=48,9		R2=53,2		R2=60,3	
	1	R1=45,2	Rm=46,3	R1=52,1	Rm=51,6	R1=59,7	Rm =60,05
		R2=47,4		R2=51,1		R2=60,4	
	1,5	R1=47,9	Rm=47,45	R1=52,3	Rm=51,25	R1=61,9	Rm =60,8
		R2=47		R2=50,2		R2=59,7	
FVD	0,5	R1=38,3	Rm=39,35	R1=40,7	Rm=41,15	R1=49,7	Rm =50,65
		R2=40,4		R2=41,6		R2=51,6	
	1	R1=48,1	Rm=49,5	R1=45,4	Rm=45,65	R1=51,8	Rm =50,85
		R2=50,9		R2=45,9		R2=49,9	
	1,5	R1=49,8	Rm=47,8	R1=51,2	Rm=50,45	R1=55,6	Rm =54,35
		R2=45,8		R2=49,7		R2=53,1	
FVF	0,5	R1=50,1	Rm=46,8	R1=49,2	Rm=49,7	R1=58,5	Rm =57,85
		R2=43,5		R2=50,2		R2=57,2	
	1	R1=44,5	Rm=44,65	R1=48,8	Rm=47,95	R1=57,4	Rm =57
		R2=44,8		R2=47,1		R2=56,6	
	1,5	R1=50	Rm=50,1	R1=51,4	Rm=50,25	R1=58,4	Rm =59,25
		R2=50,2		R2=49,1		R2=60,1	

L'analysant des résultats obtenus pour les différents types de fibres et à différents âges nous remarquons ce qui suit :

- A 7 jours, les valeurs de la résistance à la compression sont toutes supérieures à la valeur de référence quel que soit le type de fibres et quel que soit le dosage en fibres sauf pour le cas des fibres découpés pour un dosage de 0.5 g/l ou la résistance diminue.
- A 28 jours, nous remarquons une augmentation de la résistance à la compression en fonction du dosage des fibres et ceci quel que soit le type de fibres, ce qui nous permet de dire que les fibres de verre permettent d'augmenter la résistance à la compression. Des résultats similaires ont été observés par Sanjeev et al. [92].

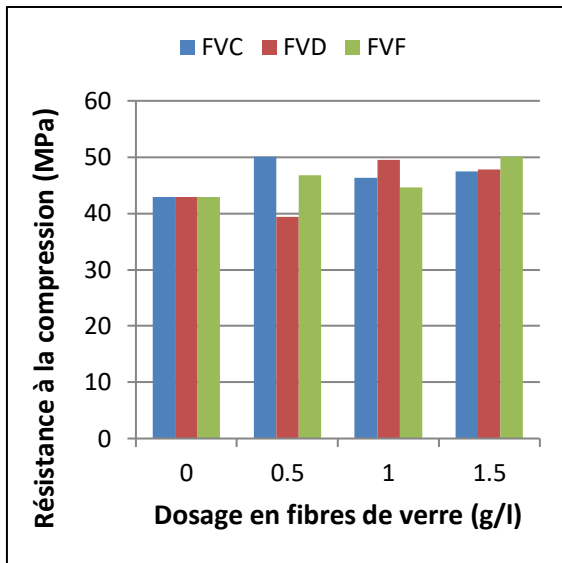


Figure 3.14 : La résistance à la compression à 7 jours.

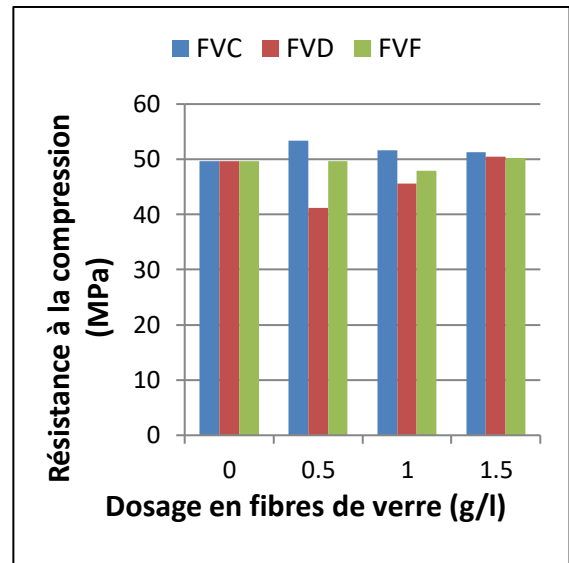


Figure 3.15 : La résistance à la compression à 14 jours.

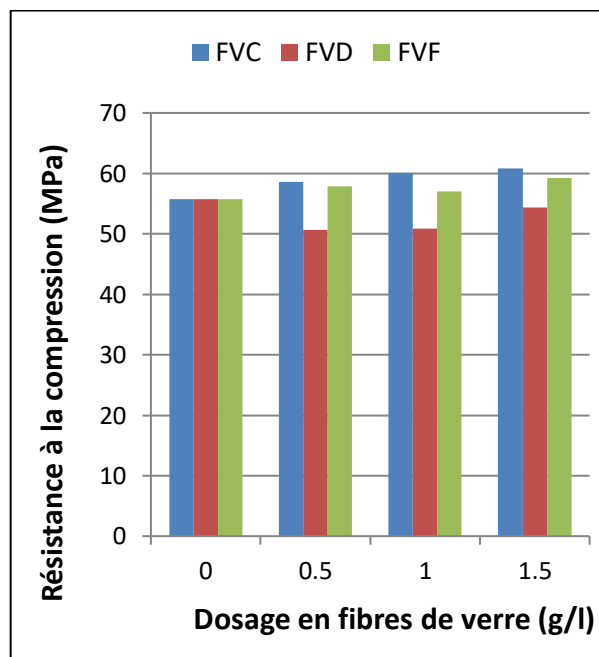


Figure 3.16 : La résistance à la compression à 28 jours.

Aussi il a été judicieux de voir la comparaison par rapport à l'âge de chaque type ce qui a permis de tracer les figures 3.17, 3.18 et 3.19.

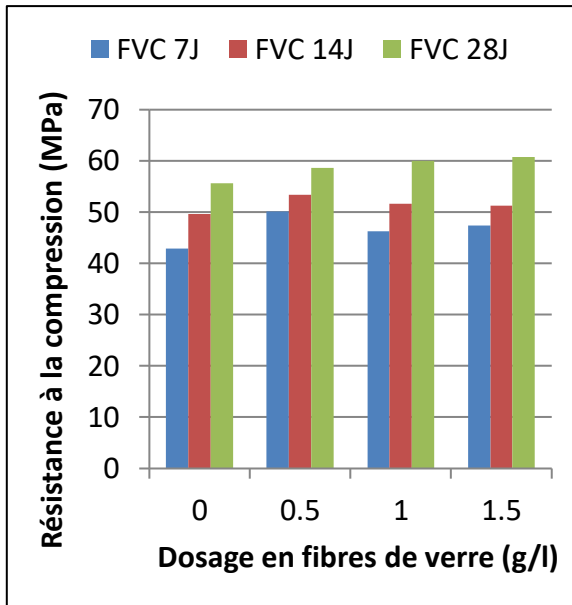


Figure 3.17 : La résistance à la compression (FVC) à 7/14/28 jours.

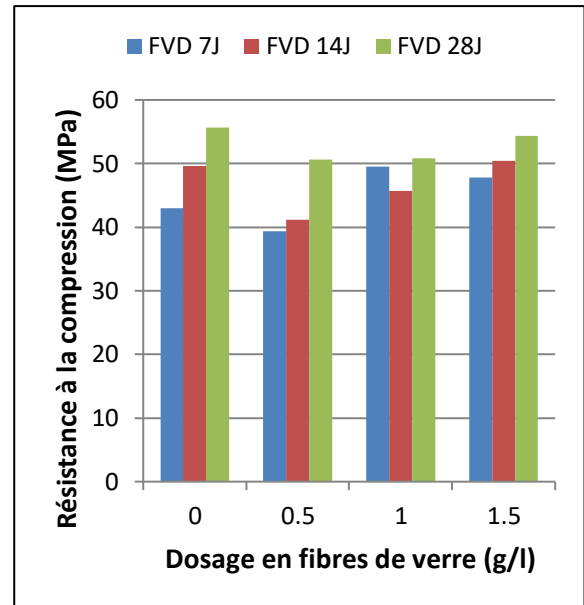


Figure 3.18 : La résistance à la compression (FVD) à 7/14/28 jours.

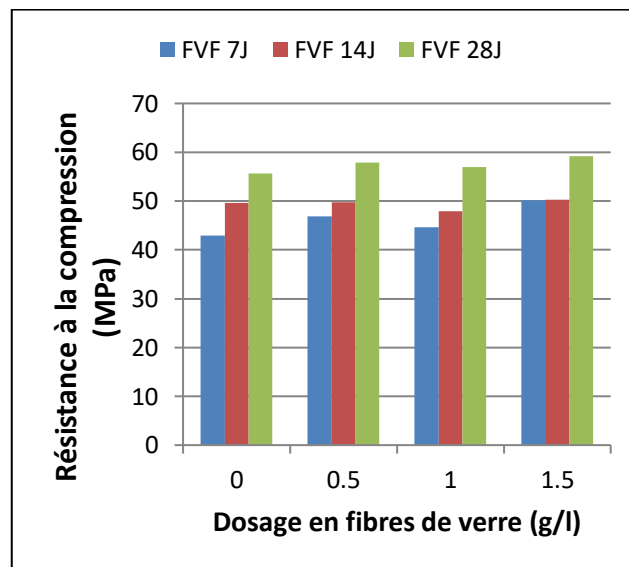


Figure 3.19 : La résistance à la compression (FVF) à 7/14/28 jours.

D'après les résultats on remarque que les meilleures résistances sont obtenues au 28^{ieme} jours et ce pour tous les dosages en fibres de verre.

3.3.3.3. Absorption capillaire :

Les essais de l'absorption capillaires ont été effectués. Les résultats de l'absorption capillaire à 28 jours des gros pores sont représentés dans les figures 3.20, 3.21 et 3.22

Tableau 3.10 : Valeurs de l'absorption capillaire.

Type de mortier	FVC			FVD			FVF		
	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
SEC	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5min	0,112500	0,10625	0,115625	0,075000	0,165625	0,146875	0,075000	0,100000	0,078125
10min	0,162500	0,146875	0,162500	0,118750	0,212500	0,193750	0,118750	0,165625	0,125000
20min	0,190625	0,165625	0,221875	0,153125	0,253125	0,231250	0,153125	0,203125	0,150000
30min	0,256250	0,215625	0,246875	0,196875	0,306250	0,268750	0,196875	0,25625	0,187500
40min	0,296875	0,253125	0,284375	0,240625	0,346875	0,309375	0,240625	0,303125	0,234375
1h	0,337500	0,28125	0,315625	0,296875	0,393750	0,350000	0,296875	0,371875	0,271875
2h	0,443750	0,353125	0,400000	0,393750	0,487500	0,421875	0,393750	0,471875	0,353125
3h	0,518750	0,415625	0,453125	0,453125	0,531250	0,475000	0,453125	0,515625	0,406250
4h	0,562500	0,44375	0,475000	0,503125	0,559375	0,493750	0,503125	0,590625	0,440625
5h	0,603125	0,46875	0,512500	0,521875	0,568750	0,503125	0,521875	0,60625	0,465625
6h	0,625000	0,484375	0,584375	0,546875	0,584375	0,518750	0,546875	0,621875	0,487500

Nous remarquons que quel que soit le type de fibres, l'absorption capillaire a augmenté par rapport au MAP de référence. Ce qui veut dire que les fibres même à l'état durci ont un effet sur l'absorption du mortier autoplaçant.

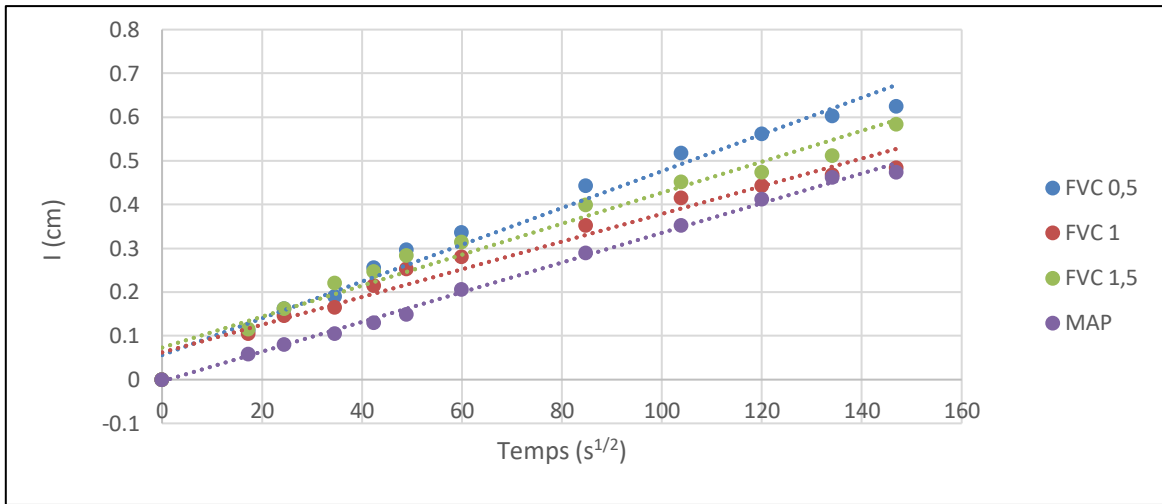


Figure 3.20 : L'absorption capillaire en fonction du dosage des fibres FVC.

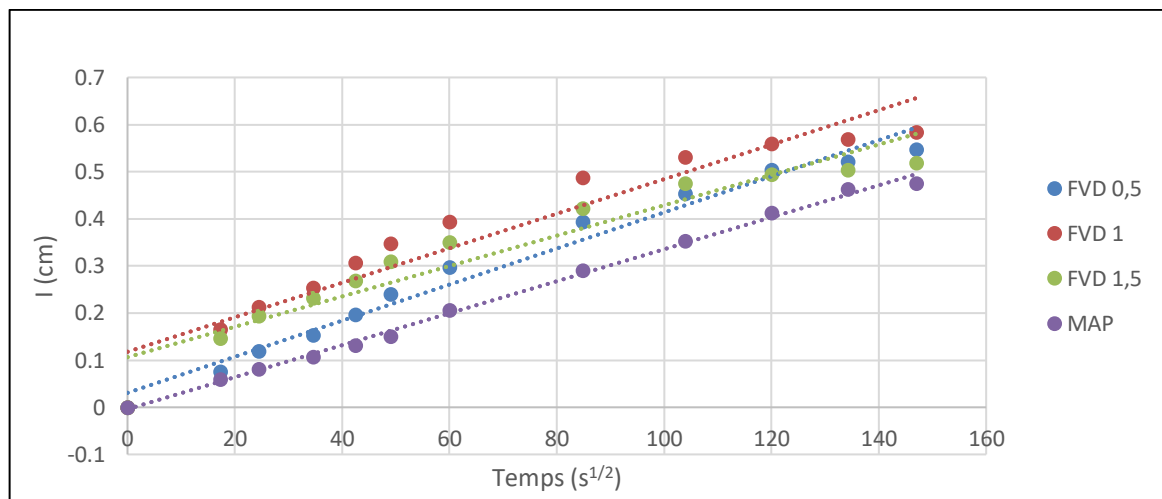


Figure 3.21 : L'absorption capillaire en fonction du dosage des fibres FVD.

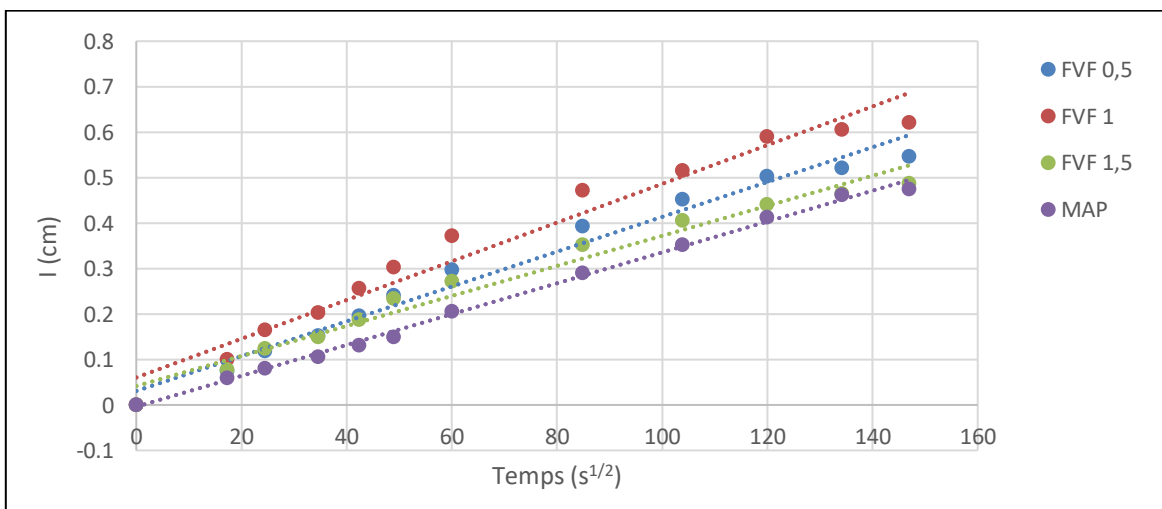


Figure 3.22 : L'absorption capillaire en fonction du dosage des fibres FVF.

Nous pouvons effectivement remarquer dans les figures 3.23, 3.24 et 3.25 que la sorptivité augmente pour les mortiers à fibres généralement par rapport au mortier de référence.

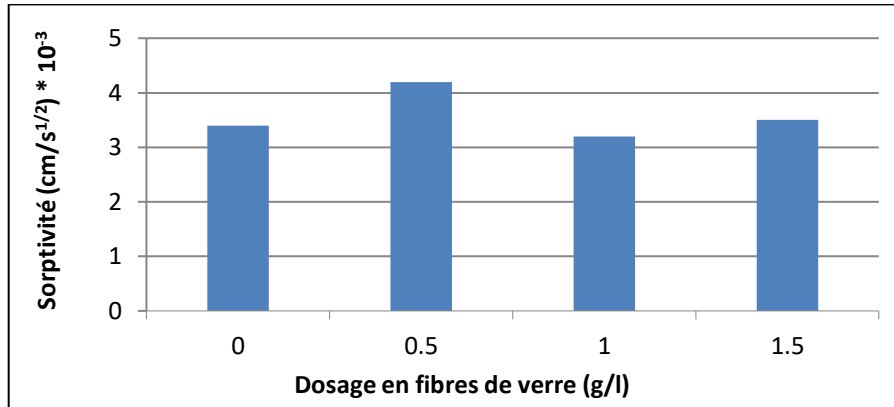


Figure 3.23 : Sorptivité en fonction du dosage en fibres FVC.

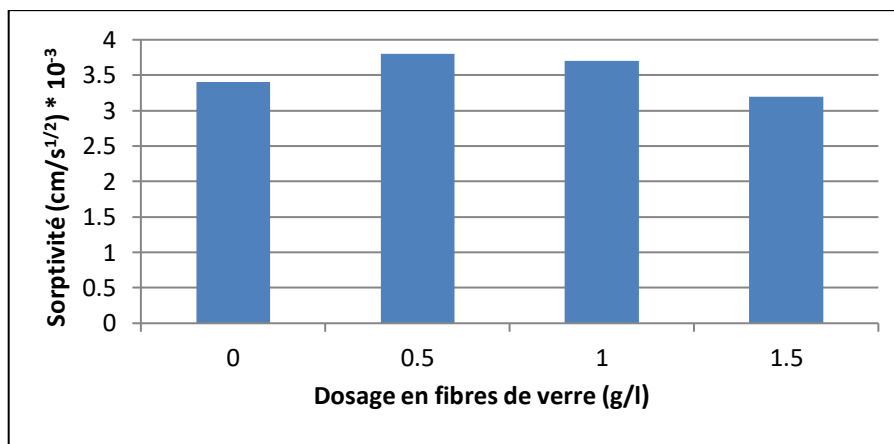


Figure 3.24 : Sorptivité en fonction du dosage en fibres FVD.

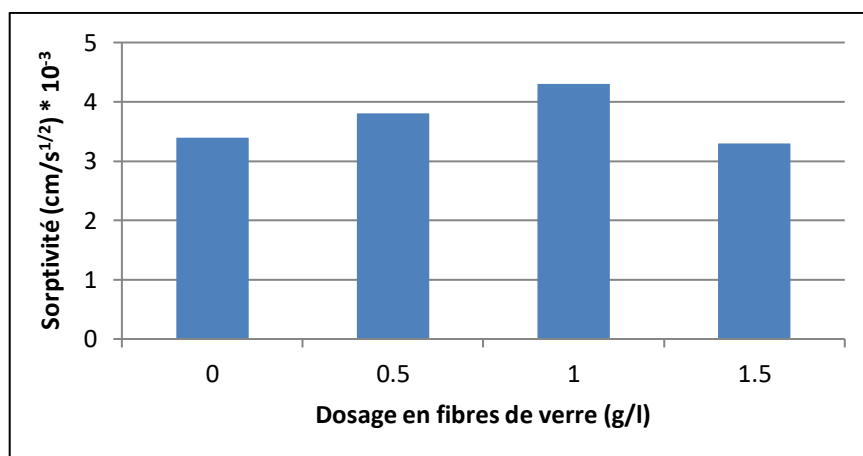


Figure 3.25 : Sorptivité en fonction du dosage en fibres FVF.

3.3.3.4. Porosité accessible à l'eau :

Les résultats de l'accessibilité à l'eau sont reportés dans le tableau 3.13 et exprimés par les graphes 3.26 et 3,27.

Tableau 3.11 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Masse sec	Masse de l'air	Masse dans l'eau	Porosité	Masse volumique
MAP	0	305,41	311,15	173,64	4,17	2,22
FVC	0,5	284,39	292,68	164,42	6,46	2,22
	1	266,76	273,71	150,2	5,63	2,16
	1,5	307,29	315,06	177,5	5,65	2,23
FVF	0,5	293,7	300,45	166,54	5,04	2,19
	1	302,42	308,8	171,2	4,63	2,20
	1,5	291,88	299,44	166,17	5,67	2,19
FVD	0,5	282,76	290,08	159,27	5,60	2,16
	1	287,35	297,28	163,7	7,43	2,15
	1,5	274,84	282,38	154,75	5,91	2,15

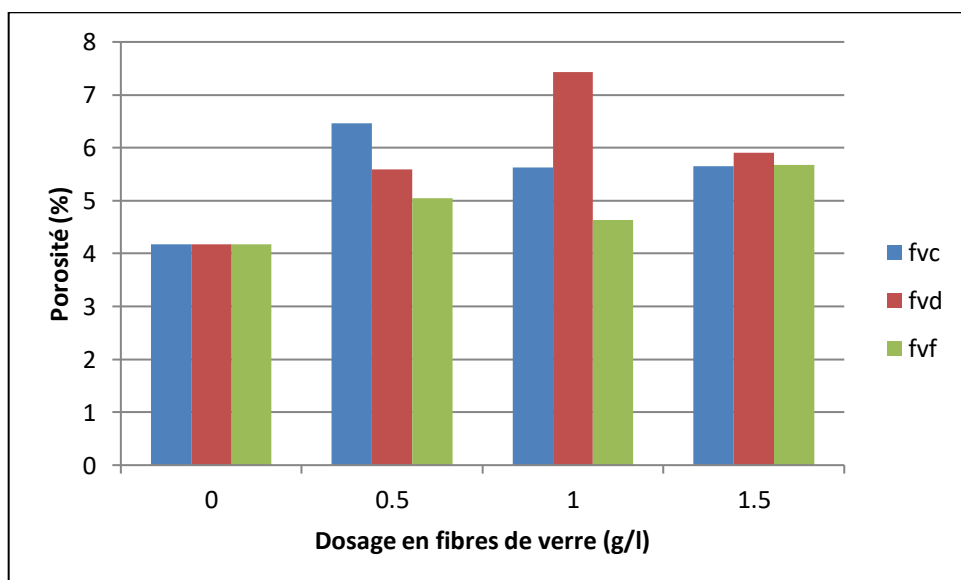


Figure 3.26 : La porosité accessible à l'eau en fonction du dosage des fibres de verre.

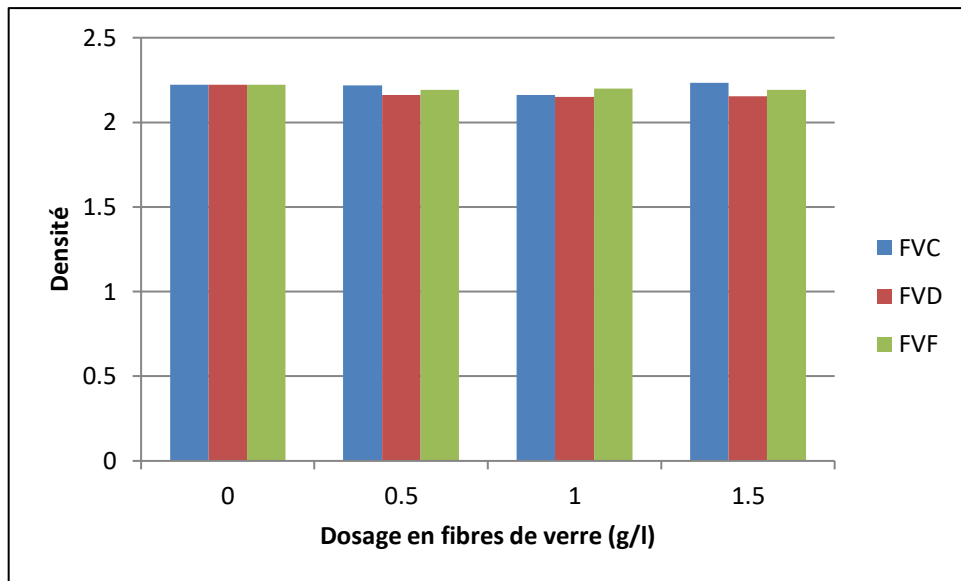


Figure 3.27 : La densité en fonction du dosage des fibres de verre.

On remarque que lorsque la porosité présente une augmentation la densité diminue, les meilleurs résultats en termes de porosité sont observés pour le mortier FVF.

Les figures 3.28 et 3.29 représentent la corrélation entre la compression et la porosité et la corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement pour les fibres FVC.

Les figures 3.30 et 3.31 représentent la corrélation entre la compression et la porosité et la corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement pour les fibres FVD.

Les figures 3.32 et 3.33 représentent la corrélation entre la compression et la porosité et la corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement pour les fibres FVF.

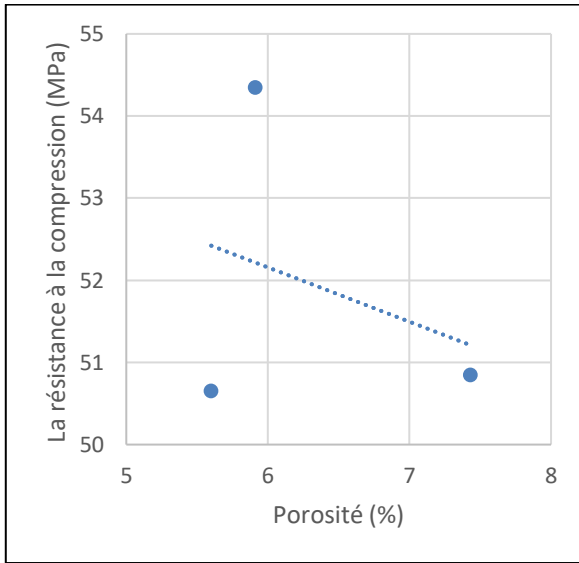


Figure 3.30 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité pour les fibres FVD.

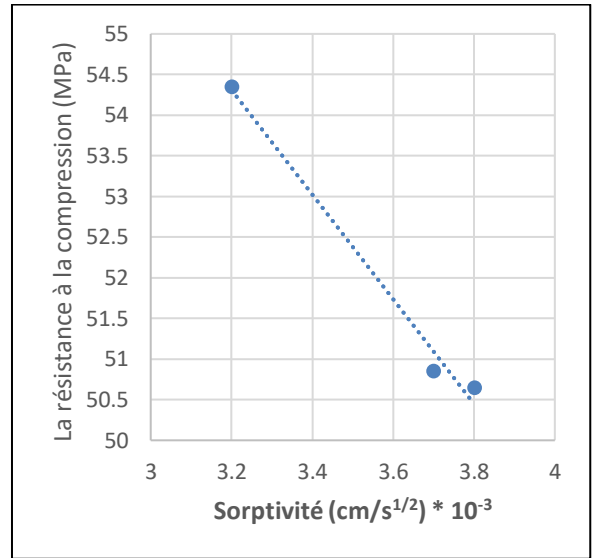


Figure 3.31 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité pour les fibres FVD.

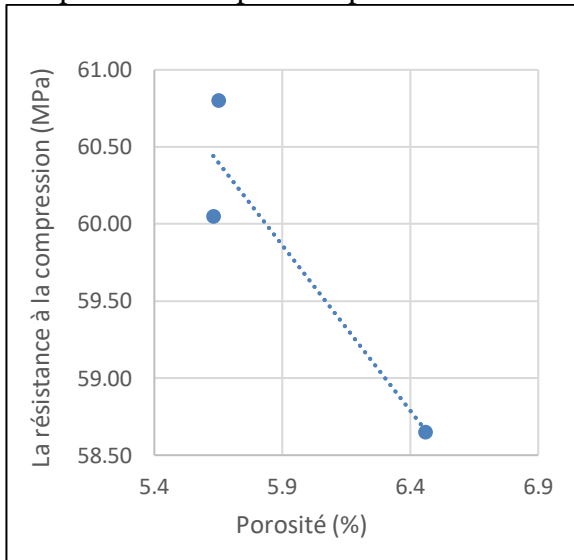


Figure 3.28 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité pour les fibres FVC.

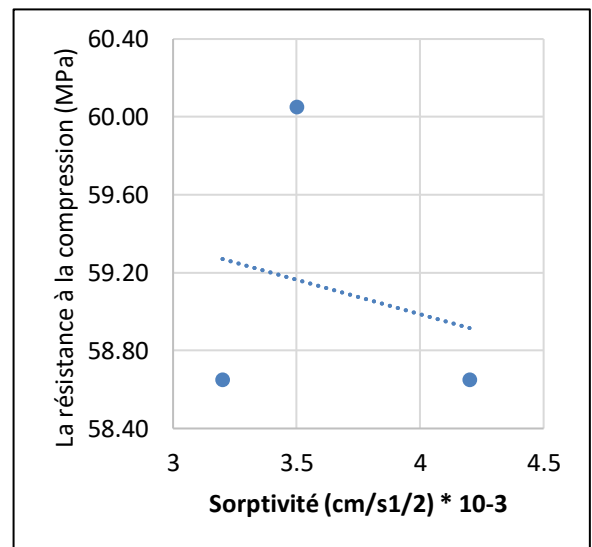


Figure 3.29 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité pour les fibres FVC.

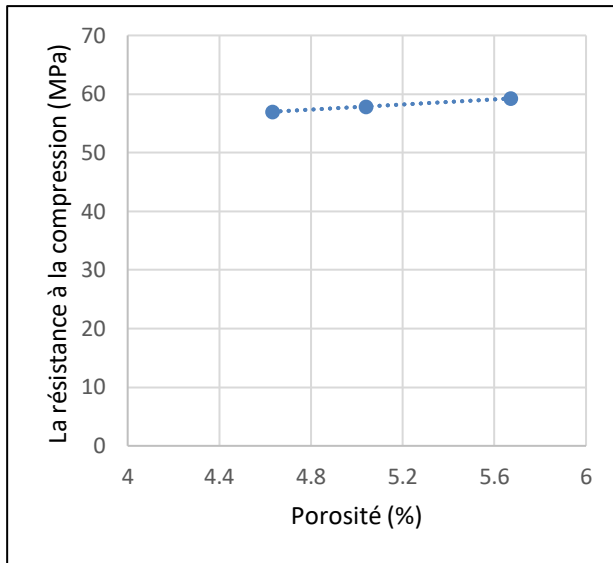


Figure 3.32 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité pour les fibres FVF.

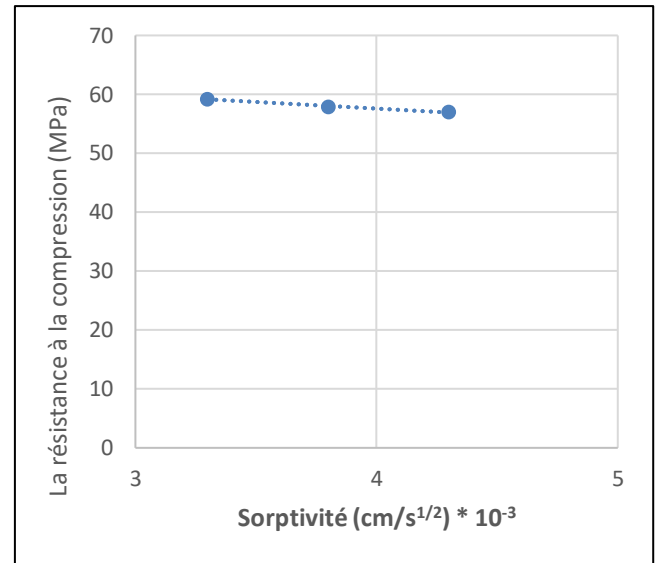


Figure 3.33 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité pour les fibres FVF.

Les équations de corrélation sont données dans le tableau 3.13, nous remarquons que seules les fibres FVF donnent une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la porosité et entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement.

Tableau 3.12 : Les équations de corrélation.

Type de mortier	Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité		Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité	
	Equation	R ²	Equation	R ²
FVC	$y = -2,1469x + 72,529$	R ² = 0,8679	$y = -0,3544x + 60,404$	R ² = 0,0506
FVD	$y = -0,6615x + 56,126$	R ² = 0,0969	$y = -6,4355x + 74,903$	R ² = 0,9884
FVF	$y = 2,1684x + 46,946$	R ² = 0,9997	$y = -2,25x + 66,583$	R ² = 0,9805

3.3.3.5. Conductivité thermique :

Les résultats de l’essai de conductivité thermique sont représentés dans les figures 3.34, 3.35 et 3.36.

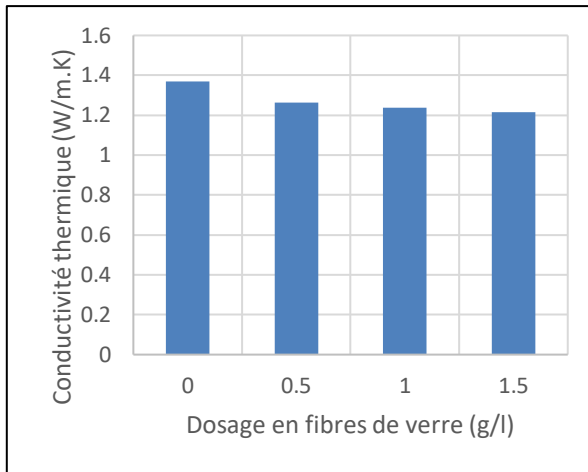


Figure 3.34 : Conductivité thermique en fonction des fibres FVC.

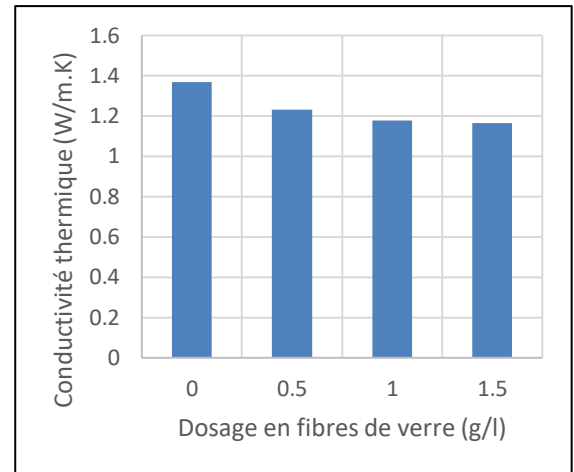


Figure 3.35 : Conductivité thermique en fonction des fibres FVD.

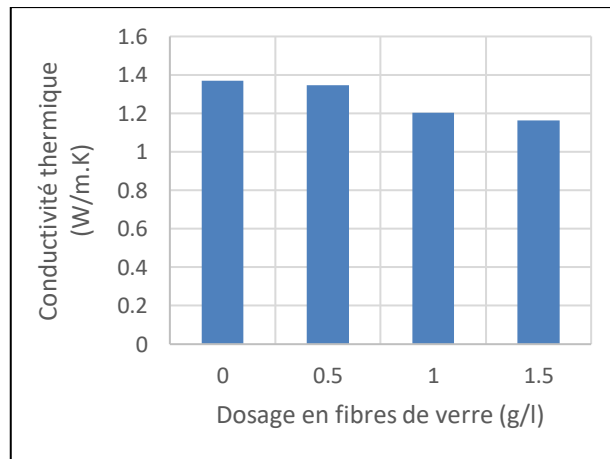


Figure 3.36 : Conductivité thermique en fonction des fibres FVF.

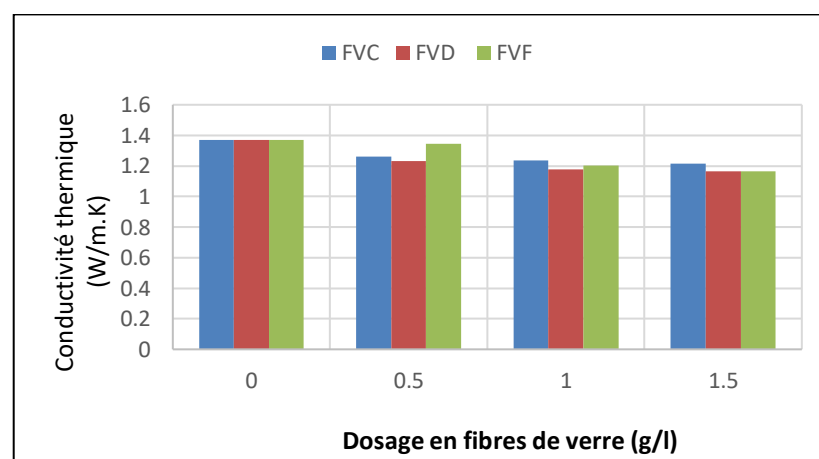


Figure 3.37 : Conductivité thermique en fonction du dosage en fibres de verre.

Nous remarquons que l'incorporation des fibres a un effet sur la conductivité thermique, plus le dosage en fibres augmente plus la conductivité thermique diminue, ceci

quel que soit le type de fibres utilisées. Le dosage qui assure une conductivité minimale est celui du mortier FVC avec un dosage de 1,5 (g/l)

3.4. Effet de la combinaison des fibres de verre et sable de marbre :

3.4.1. Les essais réalisés à l'état frais :

3.4.1.1. Mini cône :

Pour la composition du mortier autoplaçant fibré avec substitution de sable de marbre recyclé, nous avons réalisé la même formulation que celle du mortier autoplaçant témoin (sans fibre) avec substitution de 30% de sable de marbre. Le choix de substitution du sable naturel par 30% du sable de marbre est basé sur des travaux de Ghilaci (ref) et Bennacer et Lounis (ref) qui ont trouvé que les meilleurs résultats étaient obtenus en substituant le sable naturel par 30% de sable de marbre.

Dans ce cas d'étude, nous avons étudié l'incorporation des fibres en différents dosages pour seulement un seul type (fibre de verre recyclée en fil FVF).

Tableau 3.13 : Valeurs d'étalements en fonction du dosage des fibres FVF.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Etalement (mm)
FVF + 30% de marbre	0	328
	0,5	325
	1	322
	1,5	318,5

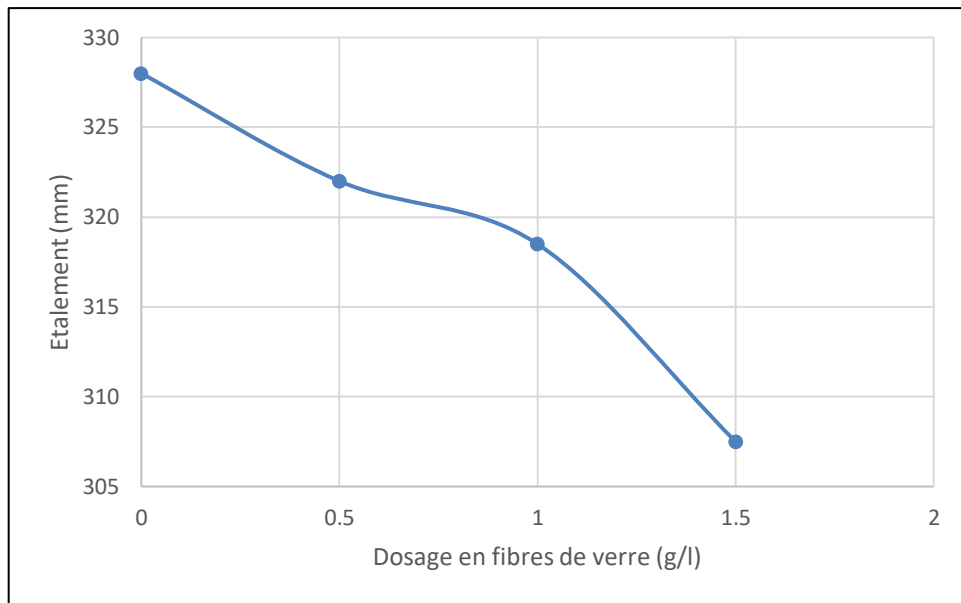


Figure 3.38 : Etalements en fonction du dosage des fibres FVF.

Nous remarquons une réduction des valeurs d'étalement des mortiers fibrés FVF +30% de marbre selon le dosage par rapport au mortier témoin, la valeur d'étalement augmente par rapport au MAP témoin (30% de marbre). Cependant, en mettant de côté le mortier référence et en comparant les mortiers à différents dosages de fibres, nous remarquons que l'étalement diminue en fonction de l'augmentation du dosage en fibres FVF. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du mortier, ainsi que leur absorption qui est très élevée ce qui conduit à une diminution de maniabilité,

3.4.1.2. V-Funnel :

La figure 3.39 représente le temps d'écoulement en fonction du dosage des fibres FVF avec 30% de sable de marbre.

Tableau 3.14 : Valeurs du temps d'écoulement en fonction du dosage des fibres FVF.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g)	Temps d'écoulement (s)
FVF + 30% de marbre	0	2,04
	0,5	2,04
	1	2,46
	1,5	3,3

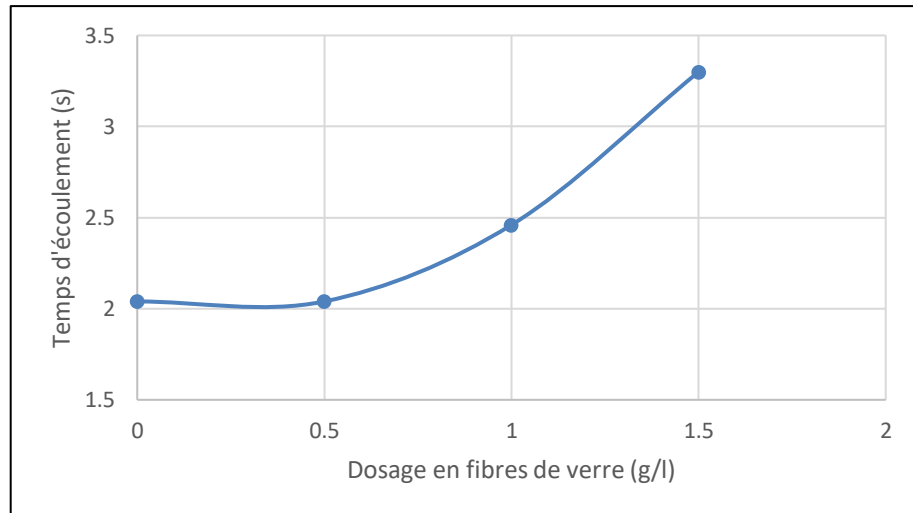


Figure 3.39 : Temps d'écoulement en fonction du dosage des fibres FVF.

Nous avons remarqué une augmentation des valeurs d'écoulement des mortiers fibrés FVF selon le dosage par rapport au mortier témoin (30% marbre). Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus par l'essai d'étalement.

3.4.1.3. Air occlus et masse volumique :

Les figures 3.40 et 3.41 représentent l'air occlus et la masse volumique respectivement en fonction du dosage des fibres FVF avec 30% de sable de marbre.

Tableau 3.15 : Valeurs de l'air occlus en fonction du dosage en fibres FVF.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Air occlus (%)
MAP	0	3,7
FVF + 30% Marbre	0,5	3,2
	1	2,8
	1,5	2,5

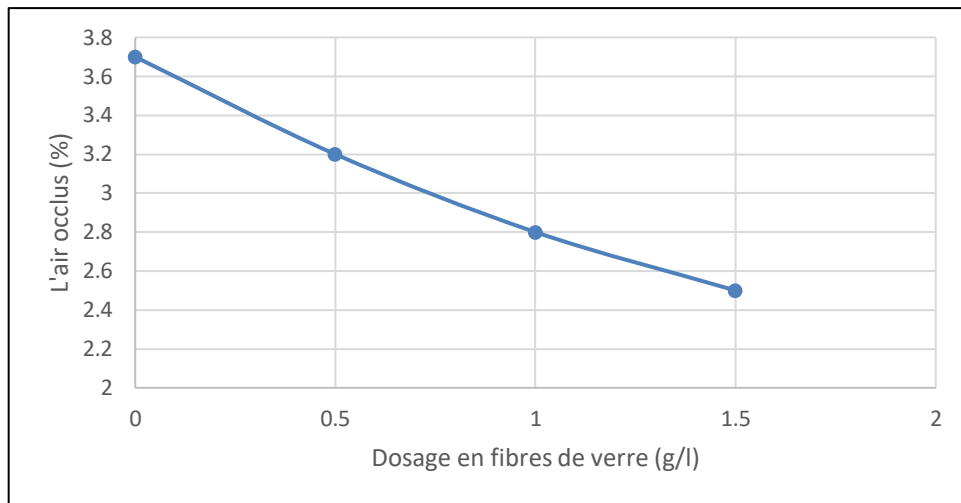


Figure 3.40 : L'air occlus en fonction du dosage en fibres FVF.

Tableau 3.16 : Valeurs de la masse volumique en fonction du dosage en fibres FVF.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Masse volumique
MAP	0	2251,58
FVF + 30% Marbre	0,5	2254,88
	1	2257,64
	1,5	2263,23

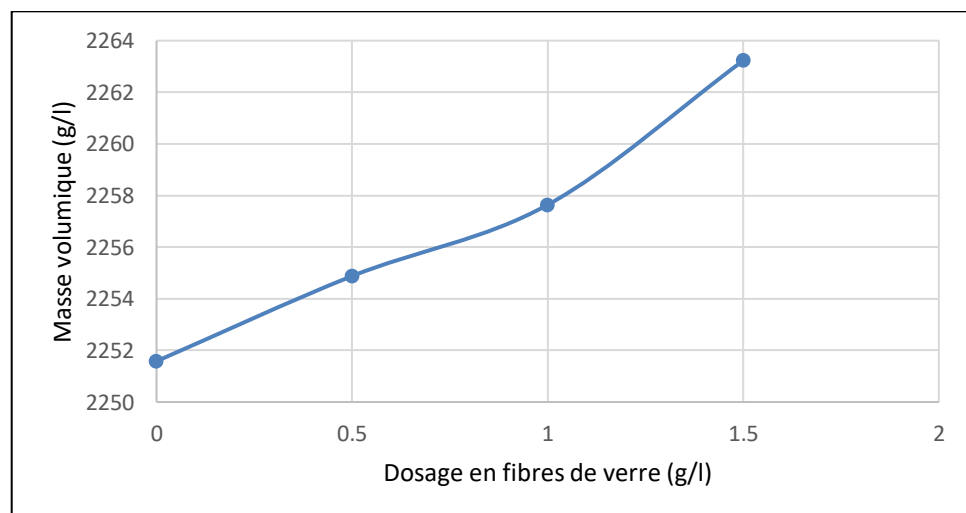


Figure 3.41 : La masse volumique en fonction du dosage en fibres FVF.

L'essai de l'air occlus et de la masse volumique ont été mené seulement sur le mortier à fibres recyclés sous formes de fils, nous remarquons que les valeurs de l'air occlus diminuent en fonction de l'augmentation du dosage en FVF, alors que la masse

volumique augmente avec l'augmentation du dosage en fibres par rapport au mortier témoin (30% marbre). Ceci peut être dû à la forme allongée des fibres qui tendent à remplir les vides ainsi que les fines de sable de marbre.

3.4.2. Les essais réalisés à l'état durci :

3.4.2.1. La résistance à la flexion :

Les résultats de la résistance à la flexion sont donnés dans le tableau 3.19 et ils sont représentés dans les figures 3.42, 3.43 et 3.44.

Tableau 3.17 : Valeurs de la résistance à la flexion.

Type de mortier	Dosage en fibre (g/l)	Résistance à la flexion (Mpa)					
		07 Jours		14 Jours		28 Jours	
FVF+30% marbre	0	R1=9,62	Rm=9,6	R1=12	Rm =12	R1=13,33	Rm =13,33
		R2=9,58		R2=12		R2=13,33	
	0,5	R1=8,58	Rm=8,785	R1=13,80	Rm =13,78	R1=15,22	Rm =15,11
		R2=8,99		R2=13,76		R2=14,99	
	1	R1=10,04	Rm=9,43	R1=13,84	Rm =14,03	R1=15,93	Rm =15,81
		R2=8,82		R2=14,22		R2=15,69	
	1,5	R1=10,04	Rm=10,26	R1=13,65	Rm =13,76	R1=18,27	Rm =17,8
		R2=10,48		R2=13,87		R2=17,33	

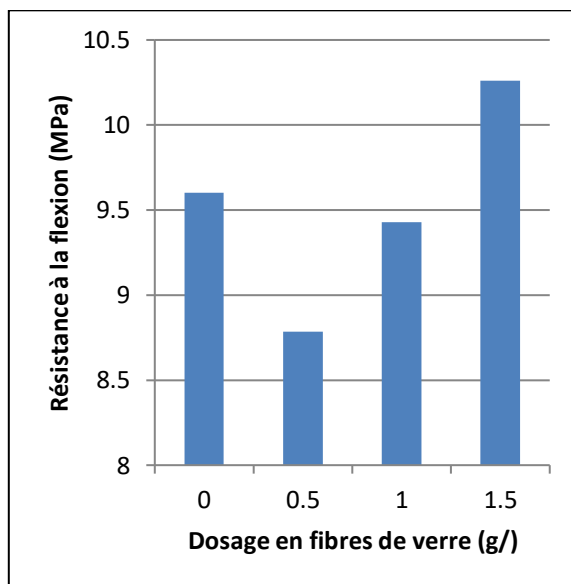


Figure 3.42 : La résistance à la flexion à 7 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

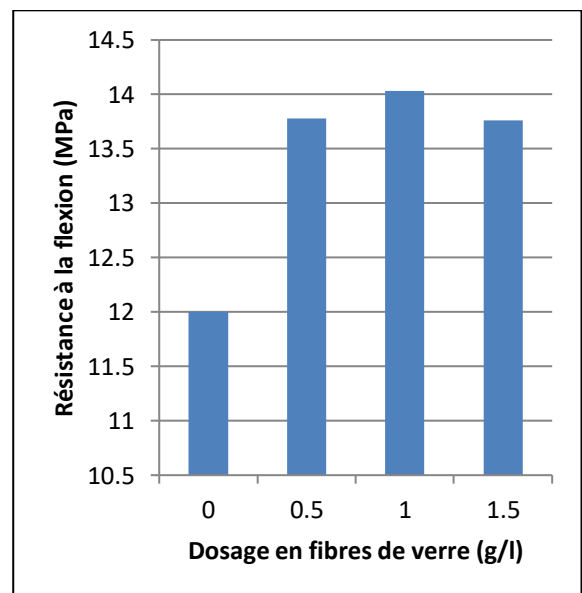


Figure 3.43 : La résistance à la flexion à 14 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

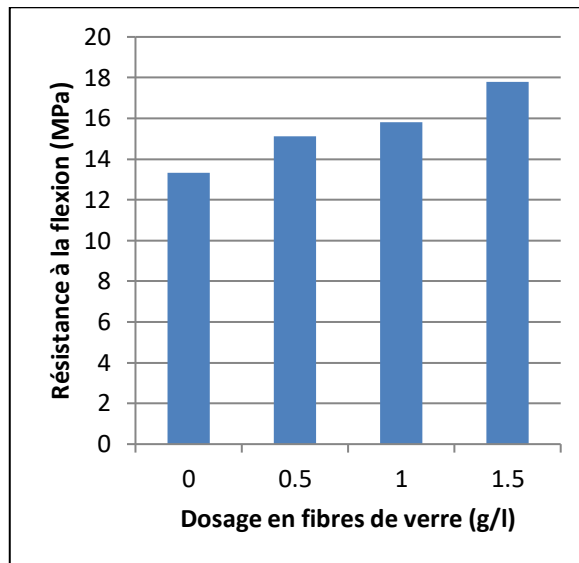


Figure 3.44 : La résistance à la flexion à 28 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

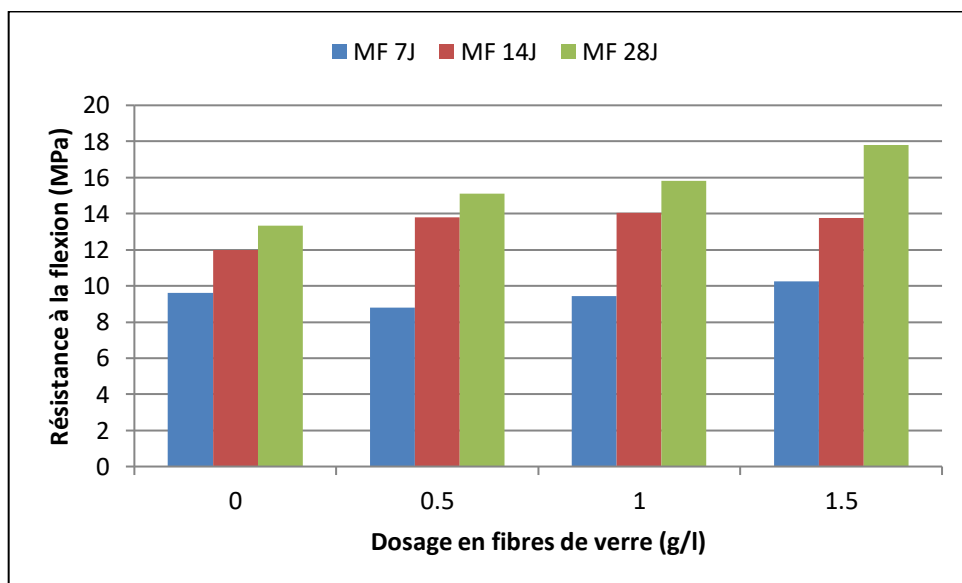


Figure 3.45 : La résistance à la flexion à 7/14/28 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

En analysant les résultats obtenus pour le mélange des fibres FVF avec 30% de marbre et à différents âges nous remarquons ce qui suit :

- En ce qui concerne les fibres FVF, nous remarquons qu'à 7 jours les valeurs de la résistance à la flexion augmentent pour des dosages de 0.5g/l, 1g/l et 1.5g/l cependant pour un dosage de 0.5g/l elle est inférieure au mortier de référence. A 14

jours, les valeurs de la résistance sont assez comparables et restent supérieures au MAP de référence. A 28 jours, la plus grande valeur de résistance est obtenue pour un dosage de 1,5g/l.

- L'augmentation de la résistance s'explique par le fait que les fibres permettent de limiter les fissurations.

3.4.2.2. La résistance à la compression :

Les résultats de la résistance à la compression sont donnés dans le tableau 3.20 et ils sont représentés dans les figures 3.46, 3.47, 3.48, en analysant les résultats obtenus pour le mélange des fibres FVF avec 30% de marbre et à différents âges nous remarquons ce qui suit :

- A 7,14 et 28 jours, nous remarquons des résultats comparable et une augmentation de la résistance à la compression en fonction du dosage des fibres FVF, sauf pour le dosage de 0.5g/l ce qui nous permet de dire que les fibres de verre permettent d'augmenter la résistance à la compression.

Tableau 3.18 : Les valeurs de la résistance à la compression.

Type de mortier	Dosage en fibre (g/l)	Résistance à la compression (Mpa)					
		07 Jours		14 Jours		28 Jours	
FVF+30 % marbre	0	R1=46,5	Rm=46,95	R1=48,8	Rm=48,8	R1=53,8	Rm =53,8
		R2=47,1		R2=48,8		R2=53,8	
	0,5	R1=46,2	Rm=47	R1=46,7	Rm=45,9	R1=50,4	Rm =50,15
		R2=47,8		R2=45,1		R2=49,9	
	1	R1=50,3	Rm=50	R1=48,8	Rm=49,75	R1=52,7	Rm =52,1
		R2=49,7		R2=50,7		R2=51,5	
	1,5	R1=53,7	Rm=52,7	R1=52,3	Rm=51,25	R1=55,9	Rm =55,3
		R2=51,7		R2=50,2		R2=54,7	

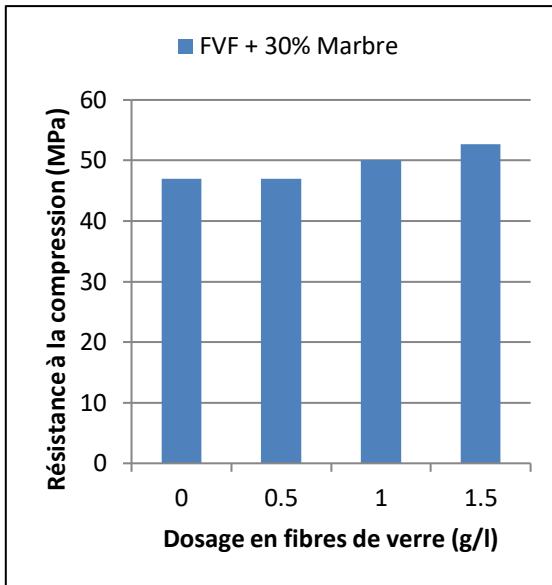


Figure 3.46 : La résistance à la compression à 7 jours.

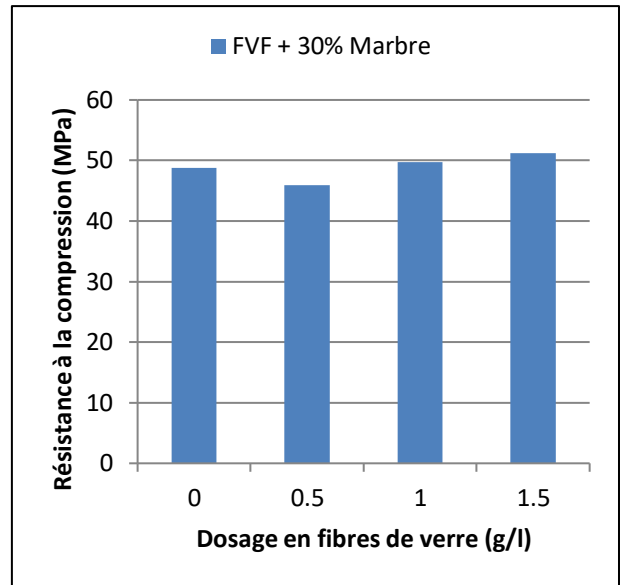


Figure 3.47 : La résistance à la compression à 14 jours.

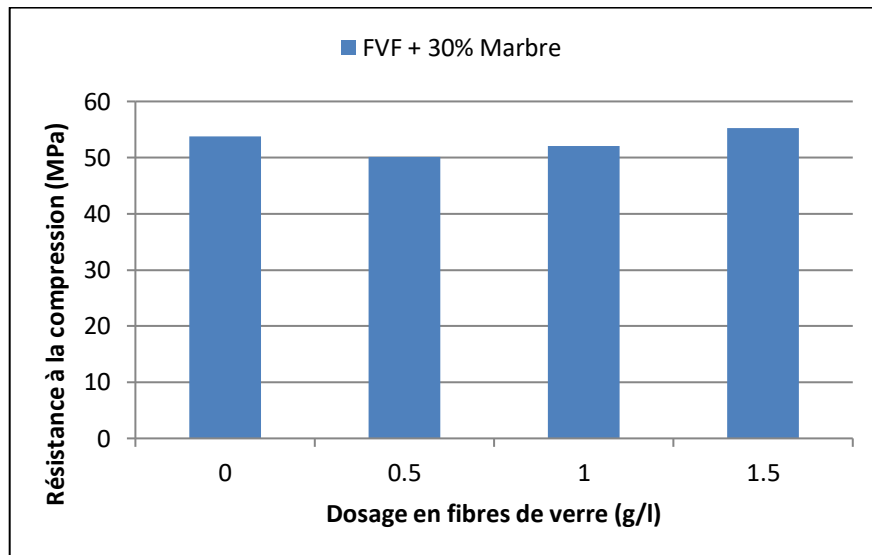


Figure 3.48 : La résistance à la compression à 28 jours.

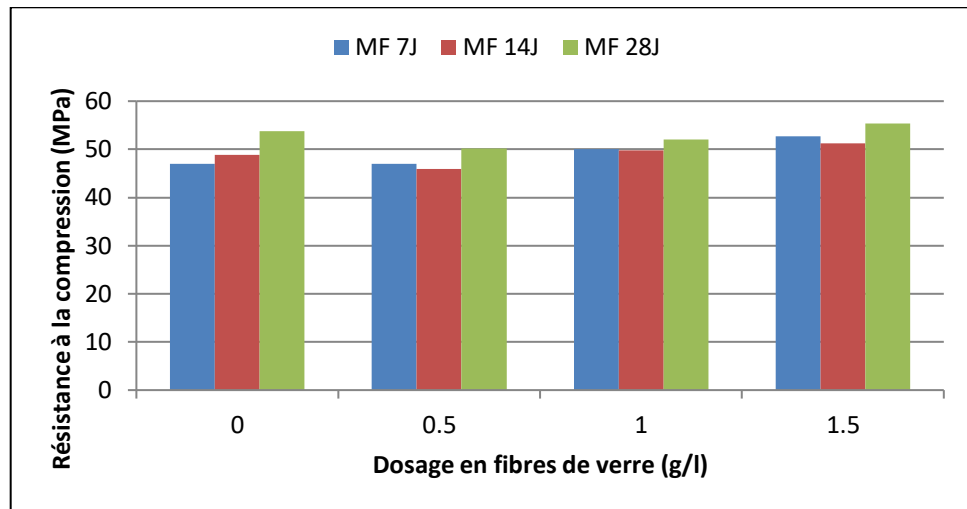


Figure 3.49 : La résistance à la compression à 7/14/28 jours en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

En analysant les résultats obtenus pour le mélange des fibres FVF avec 30% de marbre et à différents âges nous remarquons ce qui suit :

- En ce qui concerne les fibres FVF, nous remarquons qu'à 7 jours les valeurs de la résistance à la compression augmentent pour des dosages de 0.5g/l, 1g/l et 1.5g/l.
- A 14 jours, les valeurs de la résistance sont assez comparables et restent supérieures au MAP de référence et augmente avec l'augmentation du dosage en fibre de verre sauf pour un dosage de 0.5g/l elle est inférieure au mortier de référence.
- A 28 jours, la plus grande valeur de résistance est obtenue pour un dosage de 1,5g/l.
- L'augmentation de la résistance s'explique par le fait que les fibres permettent de limiter les fissurations.

3.4.2.3. Absorption capillaire :

Les résultats de l'absorption capillaire à 28 jours des gros pores sont représentés dans les figures 3.50, 3.51 et 3.52

Nous remarquons que quel que soit le type de fibres, l'absorption capillaire du mortier témoin 30% marbre a une absorption plus importante que celle avec les fibres. Ce qui veut dire que le marbre absorbe une quantité plus importante que avec l'addition fibres de verre et 30% marbre.

Tableau 3.19 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

Type de mortier	FVF + 30% marbre				MAP
	0,5	1	1,5	0	
SEC	302,26	288,6	288,38	302,3	259,185
5min	302,42	288,75	288,66	302,52	259,28
10min	302,52	288,79	288,75	302,66	259,315
20min	302,58	288,81	288,8	302,72	259,355
30min	302,65	288,85	288,85	302,82	259,395
40min	302,72	288,87	288,9	302,91	259,425
1h	302,78	288,95	289,01	303,09	259,515
2h	302,87	289	289,14	303,38	259,65
3h	302,93	289,06	289,21	303,57	259,75
4h	302,95	289,13	289,26	303,75	259,845
5h	302,96	289,15	289,3	303,87	259,925
6h	302,96	289,15	289,39	303,96	259,945

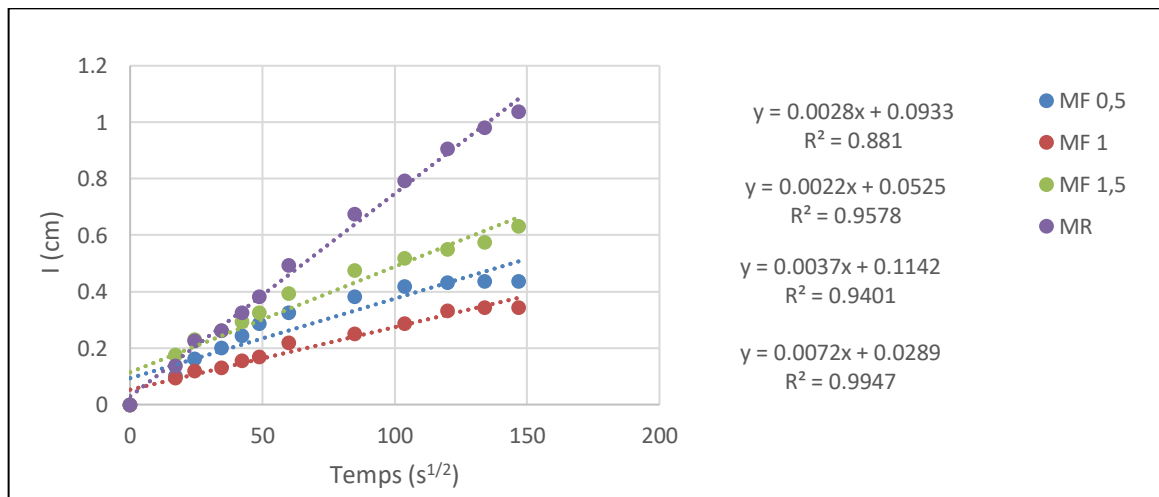


Figure 3.50 : L'absorption capillaire en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

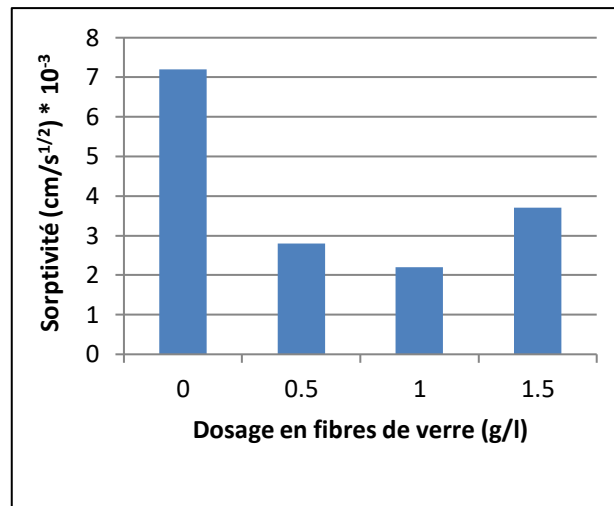


Figure 3.51 : Sorptivité en fonction du dosage en FVF + 30% de marbre.

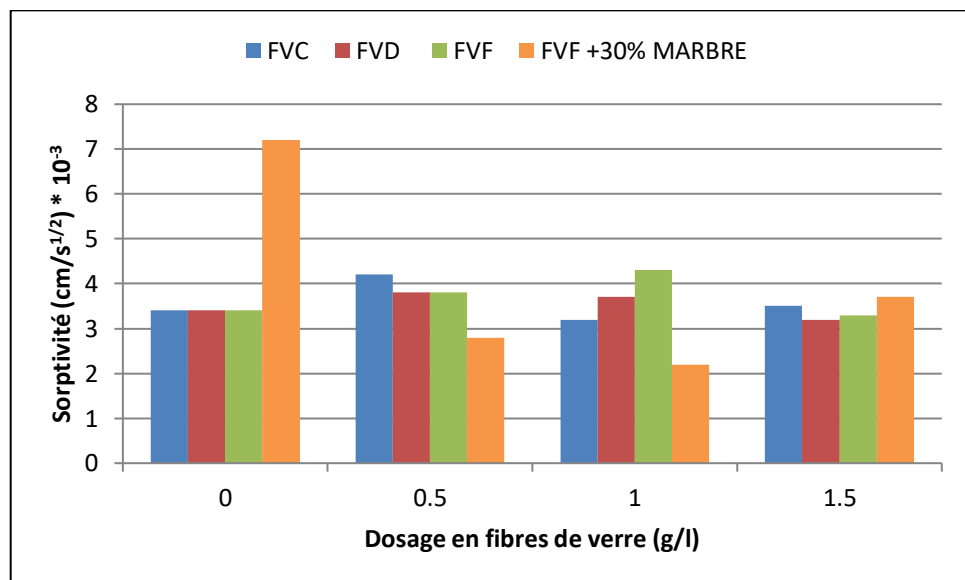


Figure 3.52 : Sorptivité en fonction du dosage fibres de verre.

3.4.2.4. Porosité accessible à l'eau :

Les figures 3.55 et 3.56 représentent la corrélation entre la résistance à la compression et la porosité et la corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement pour les fibres FVF + 30% de sable de marbre.

Les équations de corrélation sont données dans le tableau 3.23, nous remarquons que les fibres FVF donnent une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la porosité et entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement.

Tableau 3.20 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau.

Type de mortier	Dosage en fibres de verre (g/l)	Masse sec	Masse de l'air	Masse dans l'eau	Porosité	Masse volumique
FVF+30% marbre	0	247,61	261,52	143,9	11,83	2,11
	0,5	252,49	267,24	147,77	12,35	2,11
	1	276,16	283,79	158,34	6,08	2,20
	1,5	288,35	294,65	163,59	4,81	2,20

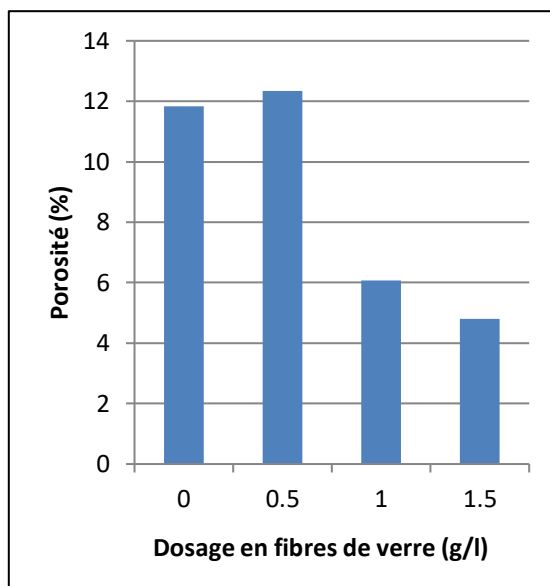


Figure 3.53 : Porosité en fonction du dosage en FVF +30% Marbre.

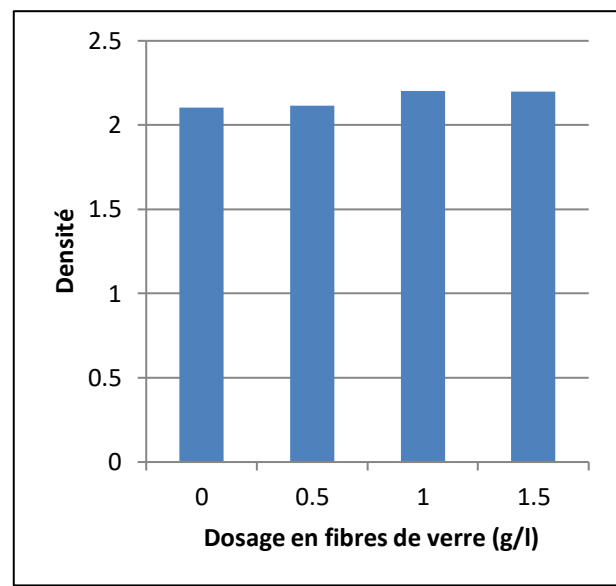


Figure 3.54 : Densité en fonction du dosage en FVF +30% Marbre.

Tableau 3.21 : Les équations de corrélation.

Type de mortier	Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité		Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité	
	Equation	R ²	Equation	R ²
FVF +30% marbre	$y = -0,5637x + 56,884$	R ² = 0,766	$y = 2,4167x + 45,508$	R ² = 0,4924

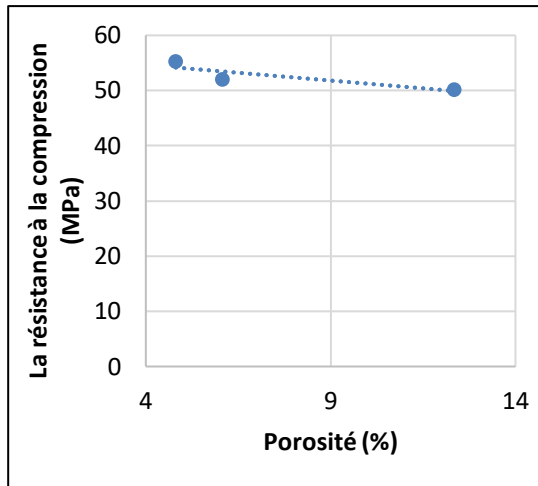


Figure 3.55 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité.

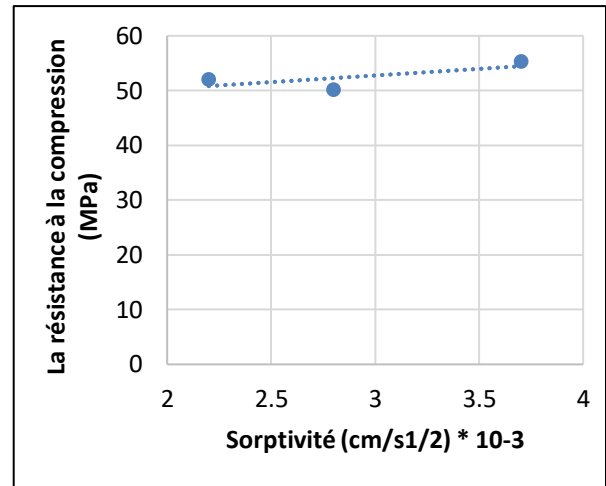


Figure 3.56 : Corrélation entre la résistance à la compression et sorptivité.

3.5. Comparaison entre les fibres FVF et leurs mélange avec 30% de sable de marbre :

La comparaison a été faite à l'état frais et à l'état durci, nous remarquons que les mortiers à base de fibres FVF et les mortiers à base de marbre et fibres FVF ont la même tendance que ce soit pour l'étalement, le temps d'écoulement, air occlus et la masse volumique.

3.5.1. A l'état frais :

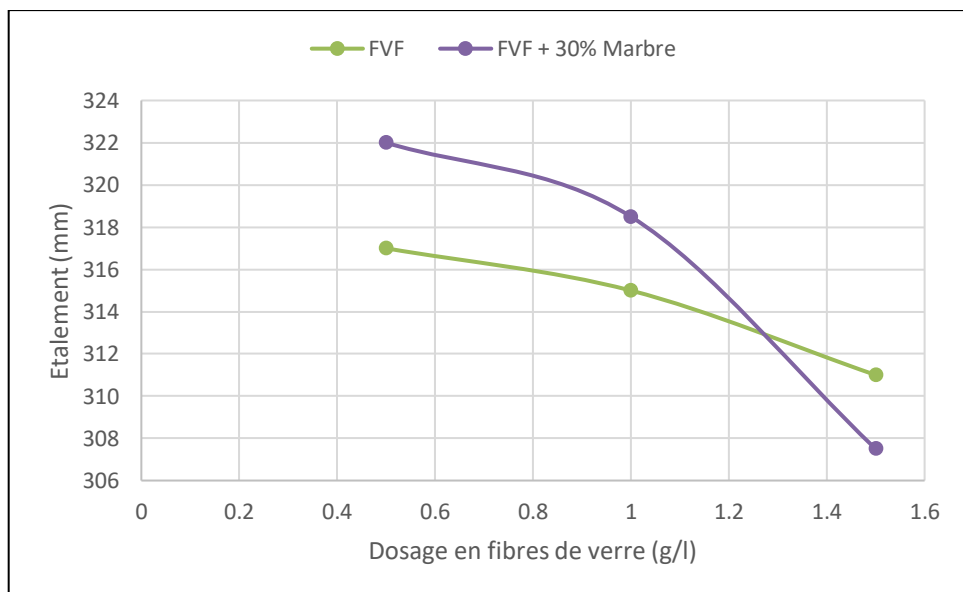


Figure 3.57 : Comparaison entre l'étalement de FVF et FVF+ Marbre.

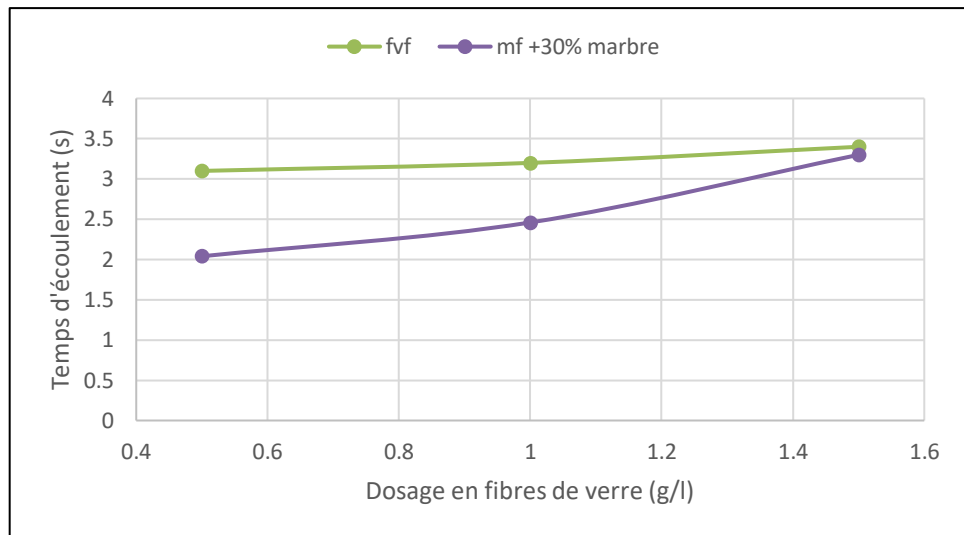


Figure 3.58 : Comparaison entre le temps d'écoulement de FVF et FVF+ Marbre.

Il est à remarquer que les graphes 3.57 et 3,58o que les deux mortiers suivent la même tendance tout de même le mortier FVF 30% marbre présente un étalement plus important que celui du mortier FVF.

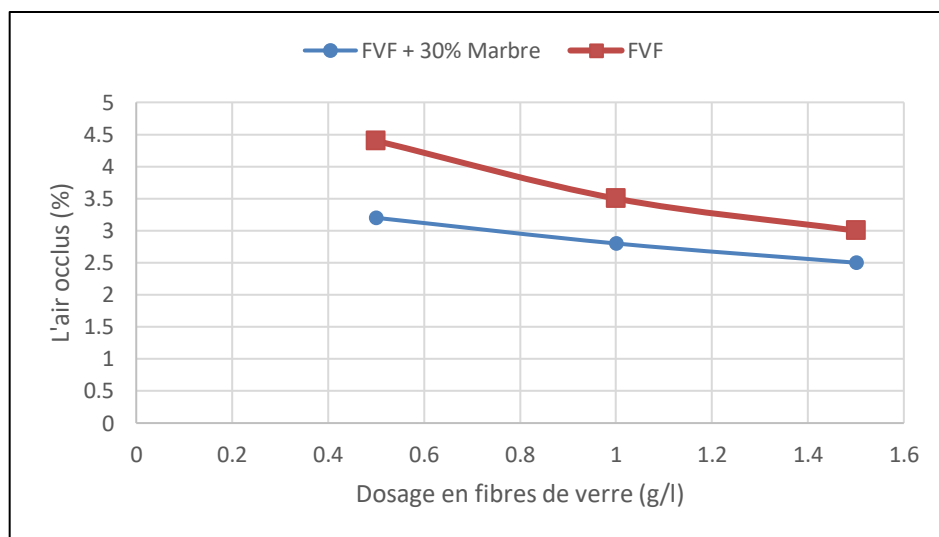


Figure 3.59 : Comparaison entre l'air occlus de FVF et FVF+ Marbre.

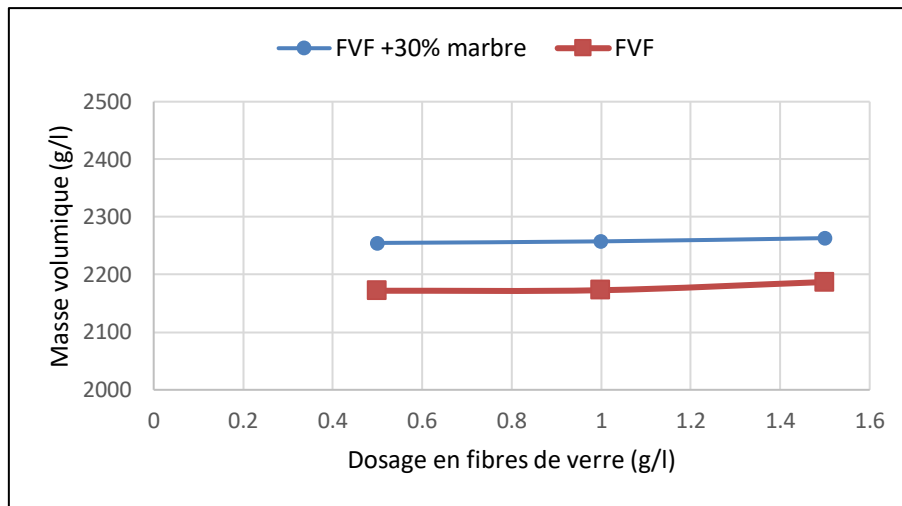


Figure 3.60 : Comparaison entre la masse volumique de FVF et FVF+ Marbre.

Il apparait clairement sur les graphes 3.59 et 3,60 que les deux mortiers suivent la même tendance néanmoins il est à noter que le mortier FVF 30% marbre donne de meilleurs résultats concernant l'air occlus et la masse volumique grâce au fines présent présent dans le marbre.

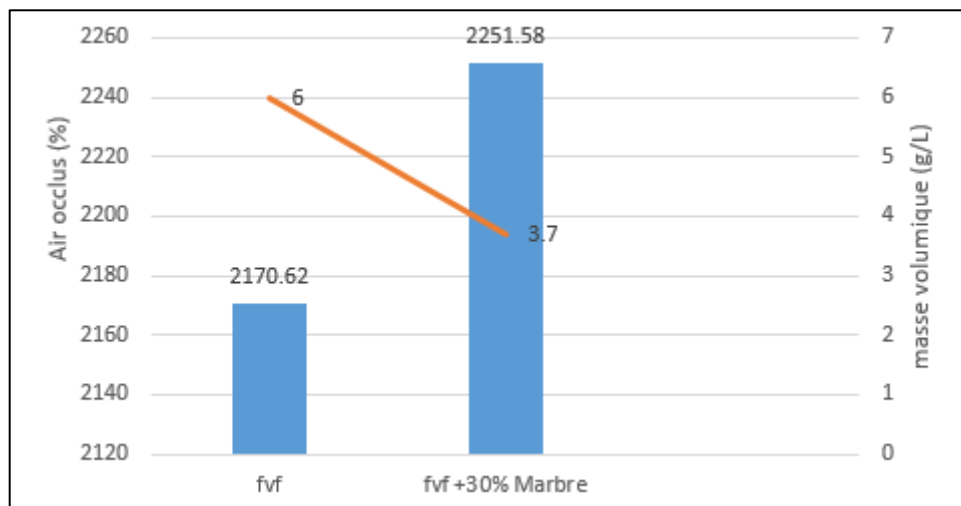


Figure 3.61 : comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de la référence.

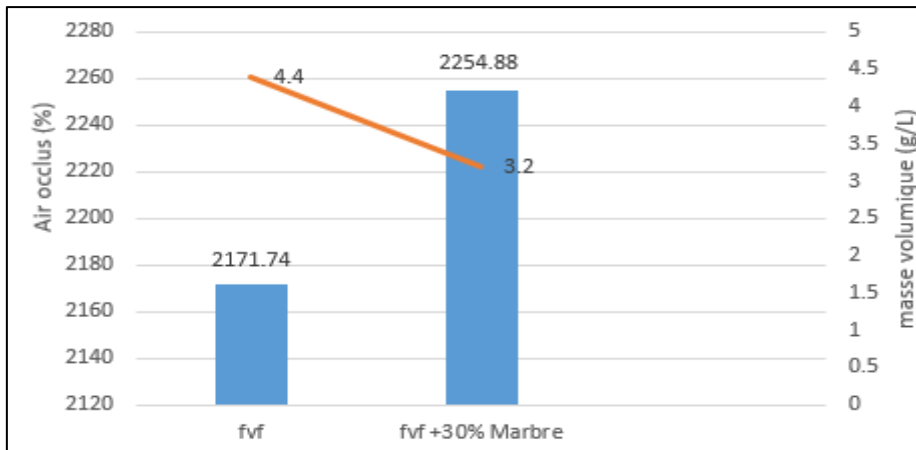


Figure 3.62 : Comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de 0,5 g/l de fibres FVF.

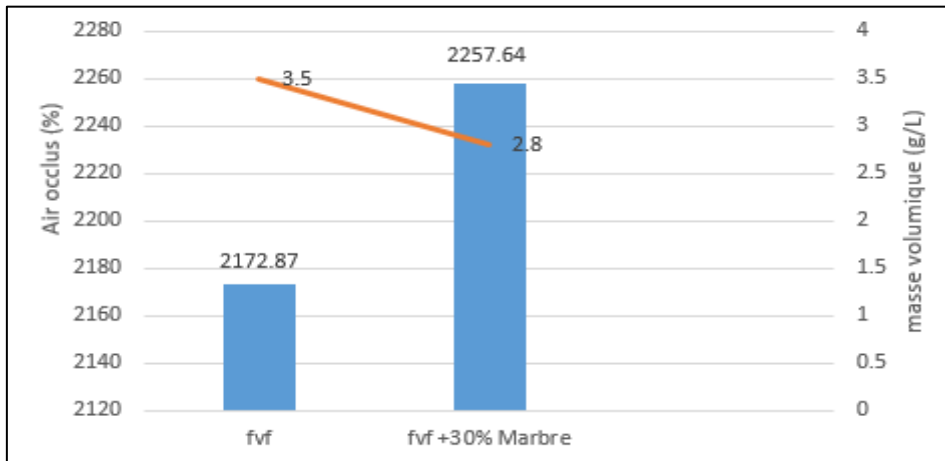


Figure 3.63 : Comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de 1 g/l de fibres FVF

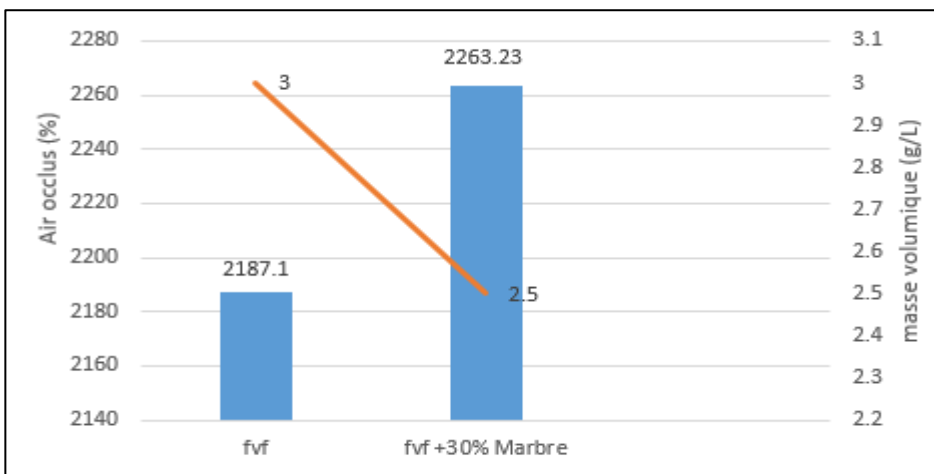


Figure 3.64 : Comparaison entre l'air occlus et la masse volumique en fonction de 1,5 g/l de fibres FVF.

D'après les graphes 3.61, 3.62, 3.63 et 3.64 nous constatant que quel que soit le dosage en fibres de verre l'air occlus et la masse volumique sont en relation inversement proportionnelle sachant que les valeurs les meilleurs valeurs pour l'air occlus on as le plus haut dosage en fibre pour les deux type de mortier

3.5.2. A l'état durci :

L'étude comparative de la résistance à la flexion entre le mortier FVF et le mortier FVF + 30% marbre a fait l'objet de travail les résultats sont présente par les figures 3.65, 3.66, 3.67.

La même étude a été effectué pour la comparative de la résistance a la compression entre le mortier FVF et le mortier FVF + 30% marbre présenter par les figures 3.68, 3.69, 3.70.

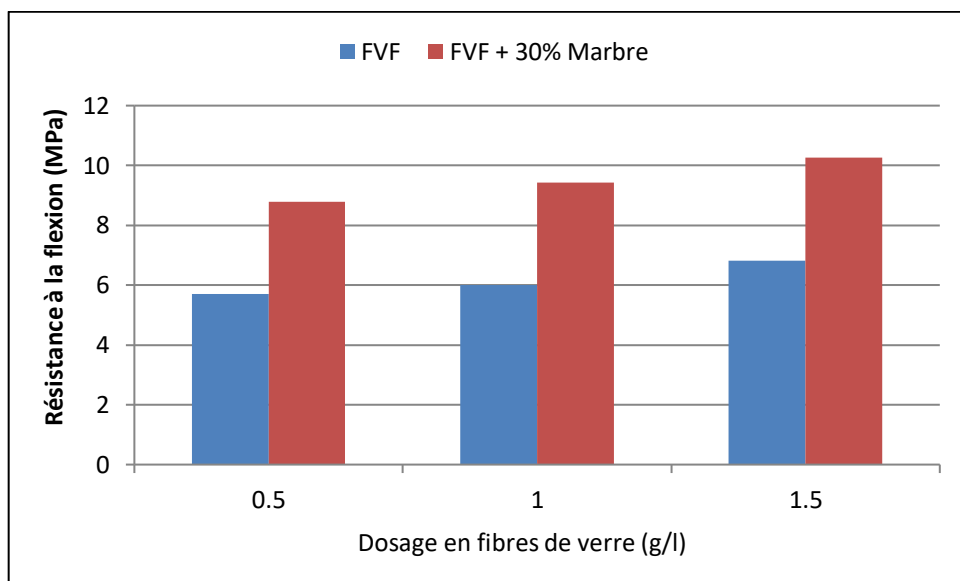


Figure 3.65 : Comparaison entre la résistance à la flexion à 7 jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.

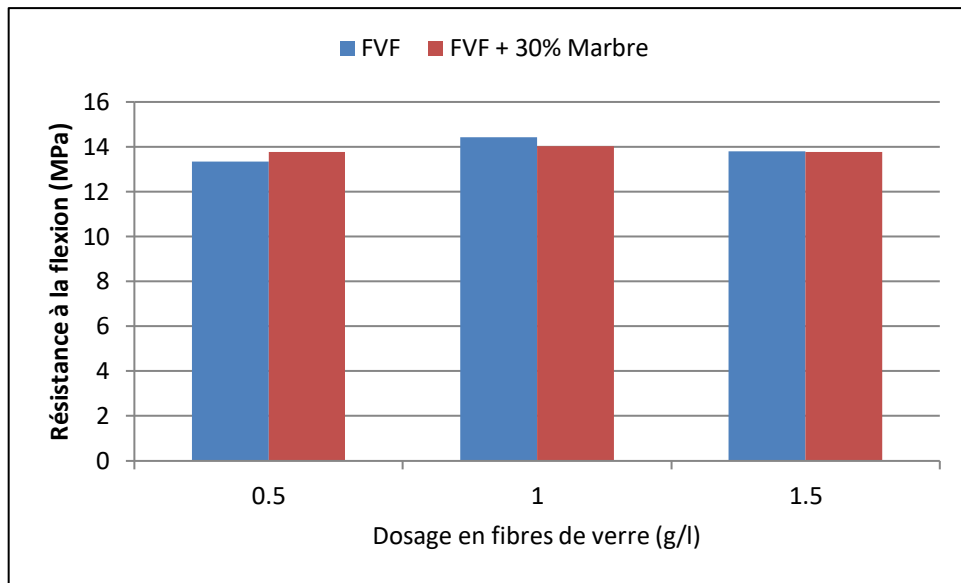


Figure 3.66 : Comparaison entre la résistance à la flexion à 14jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.

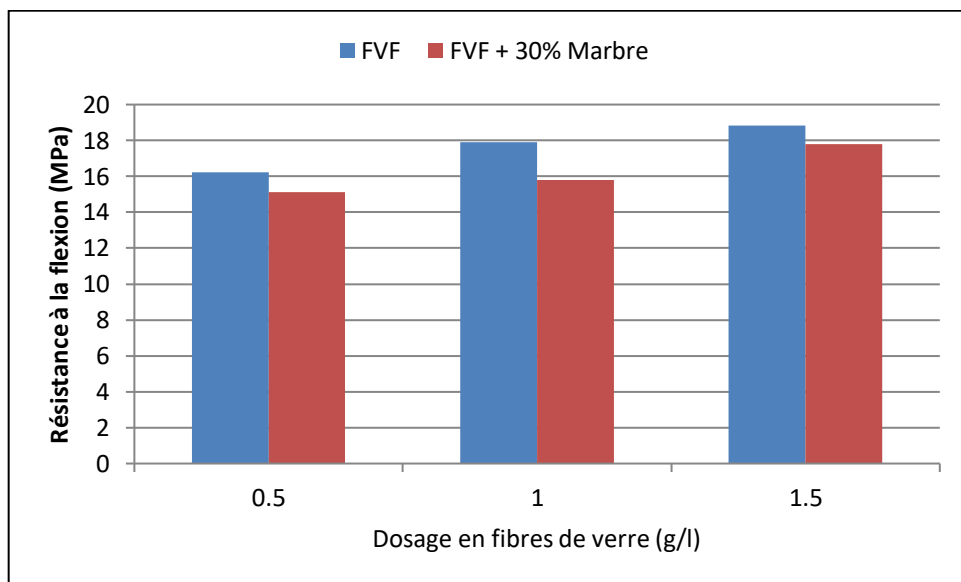


Figure 3.67 : Comparaison entre la résistance à la flexion à 28jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.

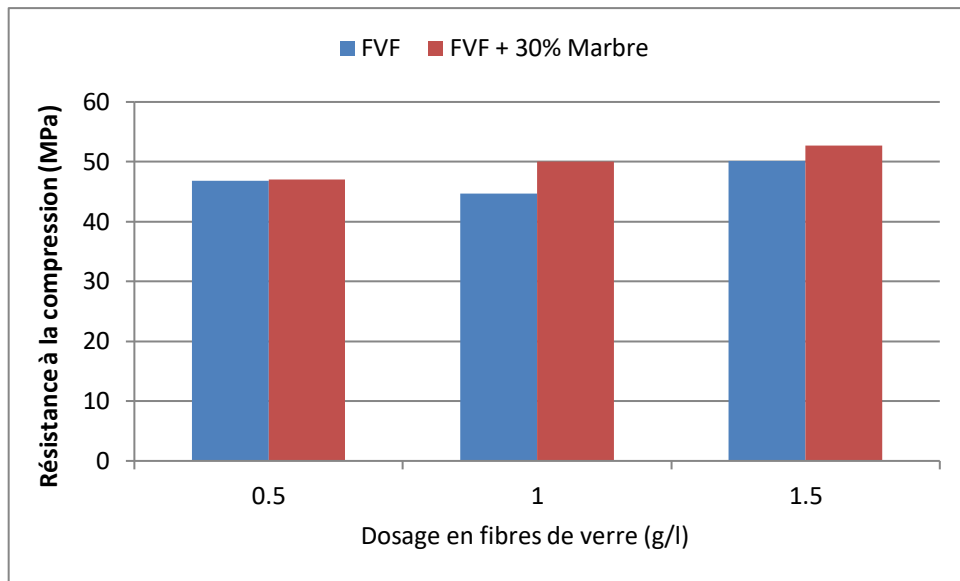


Figure 3.68 : Comparaison entre la résistance à la compression à 7jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.

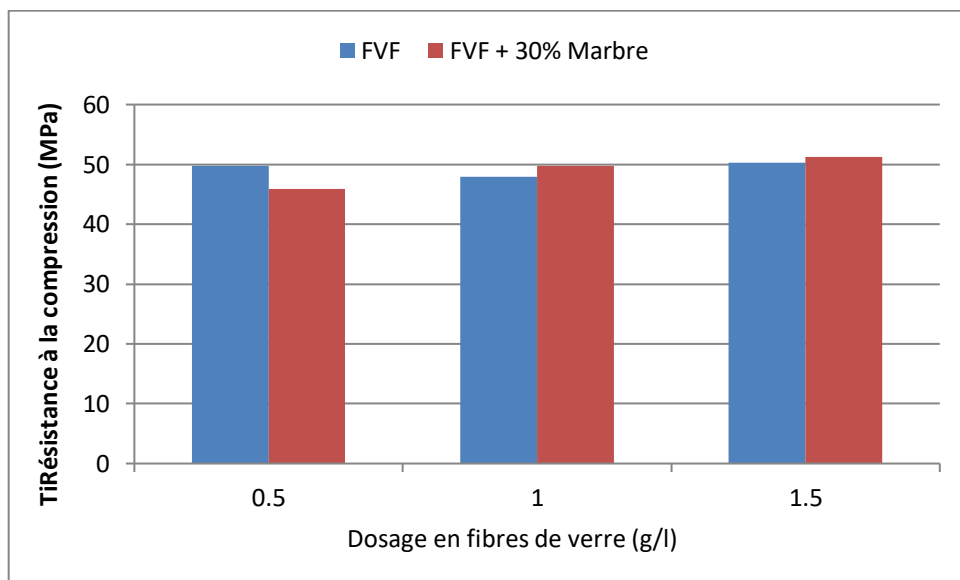


Figure 3.69 : Comparaison entre la résistance à la compression à 14jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.

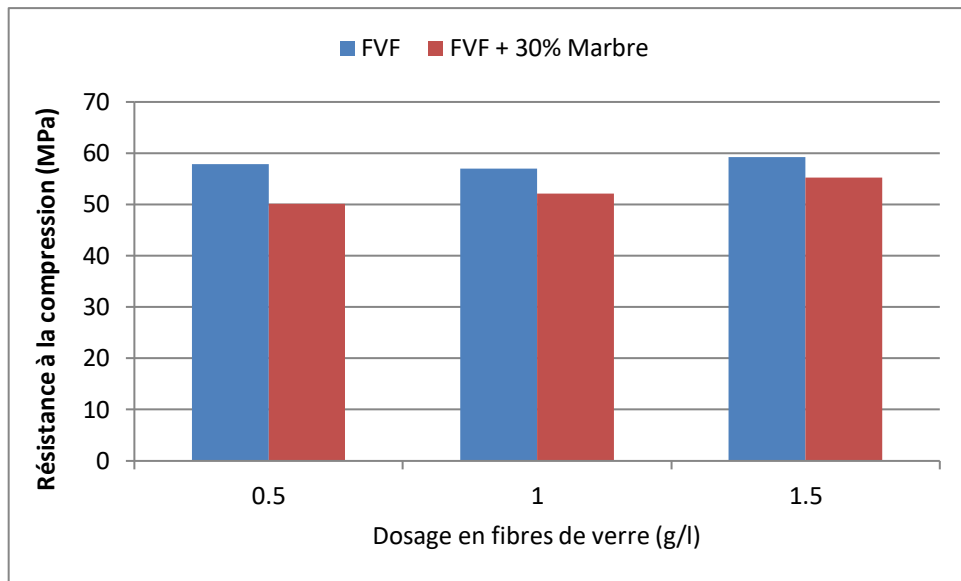


Figure 3.70 : Comparaison entre la résistance à la compression à 28jours des fibres FVF et FVF+ 30% Marbre.

Les graphes 3.65, 3.66 et 3.67 représente l'étude comparatif de la résistance a la comparaison 7, 14 et 28jours entre les deux types de mortiers FVF et FVF 30% marbre aussi les graphes 3.68, 3.69 et 3.70 représente l'étude comparatif de la résistance a la flexion 7, 14 et 28jours entre les deux types de mortiers FVF et FVF 30% marbre montre que les meilleur resultats sont:

- ✓ 7 jours flexion sont au dosage 1,5 pour mortier FVF 30% marbre,
- ✓ 14 jours flexion sont au dosage de 1 pour mortier FVF,
- ✓ 28 jours flexion sont au dosage 1,5 pour mortier FVF,
- ✓ 7 jours compression sont au dosage de 1,5 pour mortier FVF 30% marbre,
- ✓ 14 jours compression sont 1,5 pour mortier FVF 30% marbre,
- ✓ 28 jours compression sont 1,5 pour mortier FVF

3.6. Conclusion Générale :

Afin de répondre à deux problématiques, une d'ordre économique, l'autre d'ordre écologique et dans le but d'améliorer les propriétés des mortiers, des formulations à base de fibre de verre dosé à 0,5, 1 et 1,5 (g/l) et ce en absence et en présence de 30% de sable de marbre recyclé ont été préparés. L'étude du comportement des mortiers à l'état frais et durci ainsi que la caractérisation mécanique des propriétés de ces mortiers montrent que :

- Une réduction des valeurs d'étalement et une augmentation des valeurs d'écoulement pour les différents types de dosage ;
- Les valeurs de l'air occlus diminuent en fonction de l'augmentation du dosage alors que la masse volumique augmente avec l'augmentation du dosage en fibres ;
- Quel que soit le type de fibres, l'absorption capillaire augmente par rapport au MAP de référence. Ce qui veut dire que les fibres même à l'état durci ont un effet sur l'absorption du mortier autoplaçant ;
- Lorsque la porosité présente une augmentation, la densité diminue, les meilleurs résultats en termes de porosité sont observés pour le mortier FVF ;
- Seules les fibres FVF donnent une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la porosité et entre la résistance à la compression et la sorptivité respectivement ;
- Plus le dosage en fibres augmente, plus la conductivité thermique diminue, ceci quel que soit le type de fibres utilisées, le dosage qui assure une conductivité minimale est celui du mortier FVC avec un dosage de 1,5 (g/l) ;
- Une réduction des valeurs d'étalement des mortiers fibrés FVF +30% de marbre selon le dosage par rapport au mortier témoin et augmentation des valeurs de l'écoulement des mortiers fibrés FVF ;
- Selon le dosage par rapport au mortier témoin (30% marbre) les valeurs de l'air occlus diminuent en fonction de l'augmentation du dosage en FVF, alors que la masse volumique augmente ;
- L'absorption capillaire du mortier témoin 30% marbre a une absorption plus importante que celle avec les fibres ;
- Les deux mortiers suivent la même tendance néanmoins il est à noter que le mortier FVF 30% marbre donne de meilleurs résultats concernant l'air occlus et la masse volumique grâce au fines présent dans le marbre ;

- La résistance à la compression et flexion entre le mortier FVF et le mortier FVF avec 30% de marbre qui donne les meilleurs résultats à 28jrs sont au dosage 1,5g/l pour mortier FVF.

Références bibliographiques

- [1] M. Rietjens and P. A. Steenbergen, “Crosslinking Mechanism of Boric Acid with Diols Revisited,” *Eur. J. Inorg. Chem.*, vol. 2005, no. 6, pp. 1162–1174, Mar. 2005, doi: 10.1002/ejic.200400674.
- [2] I. TLEMSANI and S. TOUBAL, “Elaboration et caractérisation des mortiers à base des bio-polymères et des tiges dures (Alfa),” UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA – BOUMERDES, 2016.
- [3] N. DEHBI and C. CHAIBET, “Comportement rhéologique et physico-mécanique des mortiers autoplaçants avec ajouts minéraux,” UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2019.
- [4] GCI - 714, “Durabilité et réparation du béton,” université de Sherbrooke _ canada, 2009.
- [5] A. H. & B. BILAL, “Caractérisation de l’ouvrabilité des mortiers et des bétons,” L’université de Guelma, 2013.
- [6] F. Bektas, K. Wang, and H. Ceylan, “Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1909–1914, May 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006.
- [7] M. I. and G. S. M. Yurugi, N. Sakata, “Mix Proportion for Highly Workable Concrete,” *Proc. Int. Conf. Concr. Dundee*, 1993.
- [8] AFGC, “Recommandations pour l’emploi des bétons auto plaçants,” *Doc. Sci. Tech.*, 2008.
- [9] S. TANGTERMSIRIKUL, J. SAKAMOTO, T. Shindoh, and Y. Matsuoka, “Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent,” 1991.
- [10] F. de LARRARD, F. BOSCH, C. CATHERINE, and F. DEFLORENNE, “La nouvelle méthode des coulis de l’AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances,” *Bull. liaison des Lab. des Ponts Chaussées*, pp. 61–69, 1996.
- [11] T. SEDRAN, “RHEOLOGIE ET RHEOMETRIE DES BETONS. APPLICATION

AUX BETONS AUTONIVELANTS,” Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1999.

- [12] S. Kuroiwa, Y. Matsuoka, M. Hayakawa, and T. Shindoh, “Application of Super Workable Concrete to Construction of a 20-Story Building,” *Am. Concr. Inst.*, vol. 140, 1993, doi: 10.14359/3909.
- [13] T. Shindoh, Y. Matsuoka, S. TANGTERMSIRIKUL, and J. SAKAMOTO, “Effect of variation of material quality on properties of super workable concrete,” 1992.
- [14] M. SALHI, “Effet du climat chaud sur la durabilité des bétons autoplaçants,” l’Université de Hassiba Ben Bouali, 2018.
- [15] F. SADOON and L. DJEBRI, “Etude comparative entre les mortiers renforcés avec la fibre métallique et verre,” UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira, 2019.
- [16] M. Vénuat, *La Pratique des ciments, mortiers et bétons . Tome 2, Pratique du bétonnage, pathologie et applications*, 2e ed. aug. Paris, 1989.
- [17] J. Baron, J. P. Olivier, and J. C. Weiss, *Les bétons : bases et données pour leur formulation*, Eyrolles, T. Paris, 1999.
- [18] G. Dreux, *Nouveau guide du beton et de ses constituants*, 8eme édit. Paris, 1998.
- [19] T. AZRAR, “Influence du PH sur les propriétés physico-mécaniques d’un mortier autoplaçant,” UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE- BOUIRA, 2018.
- [20] N. Hachemi and A. Boussad, “Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton,” Université de M’Hamed Bougara - Boumerdes, 2018.
- [21] Cimbéton, *Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*. Paris, 2006.
- [22] G. Abdallah and L. RAHALI, “Etude Des Caractéristiques Rhéologique Et Mécanique D’un Mortier Auto-Plaçant A Base De Fillers Calcaire,” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA, 2019.
- [23] E. BOUDANA and M. A. BEN FETTACHA, “COMPACITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS AUX DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES,” Université Ziane

- Achour, 2016.
- [24] R. Dupain, R. Lanchon, and J.-C. Saint-Arroman, *Granulat, sols, ciment et béton*, Ed.CASTEIL. Paris, 2004.
- [25] F. Benahmed, “Effet de la nature du ciment sur la rhéologie des mortiers autoplacants,” Université de Blida 1, 2018.
- [26] F. GHOMARI, “Science des matériaux de construction,” Université Aboubekr Belkaid, 2013.
- [27] G. Dreux and J. Festa, *Nouveaux guide du béton*, 7e édition. 1995.
- [28] R. Gaimster and N. Dixon, “Self-compacting concrete,” *Adv. Concr. Technol.*, vol. 3, pp. 1–23, 2003.
- [29] N. Azizi, “Caractérisation des ciments algériens et leurs effets sur les performances du béton,” Médéa, 2011.
- [30] I. Bouteldja, “Rheologie et performances des mortiers autoplacants a base des ciments binaires e ternaires,” Université de Blida, 2019.
- [31] A. M. Neville, *Proprietes des betons*, Ed. Eyroll. France, 2000.
- [32] H. Okamura and M. Ouchi, *Self-compacting concrete. Development, present use and future*. Rilem Publications Cachan Cedex, France, 1999.
- [33] T. Sedran and F. de LARRARD, *Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model*, First Inte., no. January. Stockholm,Suède, 1999.
- [34] F. de Larrard and T. Sedran, *Mixture-proportioning of high-performance concrete*, vol. 32, no. 11. 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00861-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00861-X).
- [35] A. BOUKHELKHAL, “COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE ET DURABILITE EN CLIMAT CHAUD DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS A BASE D’AJOUTS BINAIRE ET TERNAIRE,” UNIVERSITÉ AMMAR TELIDJI DE LAGHOUAT, 2019.
- [36] A. Rmili, M. Ben Ouezdou, and E. Ghorbel, “Incorporation du sable de concassage et du sable de désert dans la composition des bétons autoplacants,” no. February

2017, 2009.

- [37] A. Hallal, K. Ezziane, and K. A. K. E. H, “Fluidité des coulis de ciments composites avec additions minérales locales en fonction des superplastifiants de granitex,” *Innov. Valor. EN GENIE Civ. Mater. Constr.*, no. N° : 10-148, 2011.
- [38] “EN 196-1. Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength,” 2005.
- [39] G. Kenza, “EFFETS DU SABLE DE MARBRE RECYCLE SUR LE COMPORTEMENT DES MORTIERS AUTOPLACANTS,” Université de Blida 1, 2019.
- [40] K. Djouder and L. Hamasse, “Gestion Des Déchets Ménagers En Algérie : Etat Des Lieux Et Perspectives,” Université Abderrahmane Mira - Bejaia, 2018.
- [41] S. BOUBEKRI and F. AFFAR, “Localisation des décharges et dépotoirs sauvages, leur identification et leurs impacts sur l’environnement et la santé publique dans la commune de Bejaia,” Université Abderrahmane MIRA de BEJAIA, 2014.
- [42] S. Chaoui, “La gestion des Résidus Solides Urbains en Algérie: Quelles méthodes de traitement? Cas de la ville d’Annaba,” *Nat. Technol.*, no. 18, pp. 43–53, 2018.
- [43] N. Tahraoui Douma, “Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie.” Limoges, 2013.
- [44] A. Grondin, “Valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton,” p. 81, 2011.
- [45] Livre V : Prévention des pollutions des risques et des nuisances, *Déchets - Chapitre I: Dispositions générales relatives à la prévention et à la gestion des déchets (partie réglementaire)*. 2020.
- [46] O. Mohamed and T. Ibtissem, “MÉMOIRE DE FIN D ’ ÉTUDE MASTER Comportement d ’ un mortier autoplaçant à base de fines de déchet de brique”.
- [47] N. BENZAUCHE, “Etude expérimentale d’un béton à base de déchets de verre non coloré confiné avec des matériaux composites,” UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2020.

- [48] S. Saadani and H. Houari, "Comportement des bétons à base de granulats recyclés," Université Mantouri de Constantine, 2014.
- [49] C. AIT MAAMAR and A. KECHOUT, "Contribution à l'étude d'état de la gestion des déchets ménagers et assimilés dans la commune de Tizi-Ouzou," Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [50] ACI Committee 544, "Report on Fiber Reinforced Concrete," 2002.
- [51] M. Chemrouk, M. Hamrat, S. Amziane, and B. Boulekbache, "Influence of the Rheology of Steel Fibres' Reinforced Concretes on their Mechanical Properties," 2009.
- [52] Association du béton Québec, *Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton*, vol. 59. Québec: Bibliothèque nationale du Québec, 2005.
- [53] G. Camps, "Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton," Université de Toulouse, 2008.
- [54] R. SACI, "Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton," Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2004.
- [55] M. AIT AMEUR, "Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales," Université de Tiaret, 1998.
- [56] A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 221–274, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).
- [57] S. KADID and Z. BOUCETHA, "INFLUENCE DES MILIEUX DE CONSERVATION SUR LA DURABILITE DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS," UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES, 2017.
- [58] F. Z. FETNI and H. GOUBI, "Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des mortiers renforcées par les fibres de polypropylène (issues des déchets industriels)," UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2019.
- [59] G. Chretien, *Materiaux composites a matrice organique*. Paris, 1986.

- [60] G. Oliveux, L. O. Dandy, and G. A. Leeke, "Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 72, pp. 61–99, 2015.
- [61] M. Skrifvars and D. Åkesson, "Recycling of thermoset composites," *Resour. Recover. to Approach Zero Munic. Waste*, pp. 249–260, 2014, doi: 10.1201/b18680-12.
- [62] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, and H. de Wit, "Recycling of composite materials," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 51, pp. 53–68, 2012.
- [63] S. J. Pickering, "Recycling and Disposal of Thermoset Composites," *Work. Life Cycle Assess. Compos. Gatew.*, no. 25th September, 2013.
- [64] N. A. Shuaib and P. T. Mativenga, "Effect of process parameters on mechanical recycling of glass fibre thermoset composites," *CIRP Conf. Life Cycle Eng.*, vol. 48, pp. 134–139, 2016.
- [65] C. E. Bream and P. R. Hornsby, "Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics Part I Characterisation of recyclate feedstocks," *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 12, pp. 2965–2975, 2001.
- [66] R. DeRosa, E. Telfeyan, G. Gaustad, and S. Mayes, "Strength and microscopic investigation of unsaturated polyester BMC reinforced with SMC-recyclate," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 18, no. 4, pp. 333–349, 2005.
- [67] S. J. Pickering, "Recycling technologies for thermoset composite materials—current status," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 8, pp. 1206–1215, 2006.
- [68] V. Goodship, *Management, recycling and reuse of waste composites*, Woodhead p. Floride, États-Unis, 2010.
- [69] L. V Silva, C. C. Angrizani, J. R. Souza, S. C. Amico, and J. T. N. Medeiros, "Use of polyester/glass-fiber residues as fillers for composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 124, no. 1, pp. 302–310, 2011.
- [70] N. A. Shuaib and P. T. Mativenga, "Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 120, pp.

198–206, 2016.

- [71] J. Palmer, O. R. Ghita, L. Savage, and K. E. Evans, “Successful closed-loop recycling of thermoset composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 4, pp. 490–498, 2009.
- [72] K. Larsen, “Recycling wind turbine blades,” *Renew. energy Focus*, vol. 9, no. 7, pp. 70–73, 2009.
- [73] J. Beauson, B. Madsen, C. Toncelli, P. Brøndsted, and J. I. Bech, “Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 90, pp. 390–399, 2016.
- [74] L. HORTH-LEPAGE, S. ELKOUN, and P. COUSIN, “RECYCLAGE MÉCANIQUE DE COMPOSITES POLYESTER ET FIBRES DE VERRE COMME CHARGE DE REMPLACEMENT DANS UNE MATRICE POLYESTER VIERGE,” UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, 2019.
- [75] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, D. Zhu, and G. De Schutter, “Effects of rotational shearing on rheological behavior of fresh mortar with short glass fiber,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 314–321, 2019.
- [76] N. DJEBRI, “Formulation et caractérisation d’un béton autoplaçant fibré à base de matériaux locaux exposé aux hautes températures.,” Université Mohamed Boudiaf - M’sila, 2018.
- [77] M. TAOUNZA and F. KESSAI, “Effet des agents agressifs sur le comportement des mortier autoplaçants à base de marbre recyclés,” UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1, 2020.
- [78] D. M. B. SOUMAH and M. Souleymane, “Etat de l’art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l’Algérie,” Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.
- [79] P. J. Chavhan and S. D. Bhole, “To study the behaviour of marble powder as supplementry cementitious material in concrete,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 377–381, 2014.
- [80] S. MOUNIR and M. EL HASSEN HICHAM, “Corrélation aux moyens des essais non destructifs (END) et essai direct (ED) d’un béton à base de matériaux locaux,”

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.

- [81] B. S. Kalchuri, R. Chandak, and R. K. Yadav, "Study On Concrete Using Marble Powder Waste As Partial Replacement Of Sand," vol. 5, no. 4, pp. 87–89, 2015.
- [82] S. Rahman, R. Kumar, M. Adil Dar, and J. Raju, "Partial substitution of sand and cement with waste marble powder and limestone dust in self compacting concrete," in *International Conference on Sustainable Waste Management through Design*, 2018, pp. 170–177.
- [83] H. Houria, K. Leila, A. Assia, and B. Mouloud, "Introduction of marble waste sand in the composition of mortar," in *Sandy Materials in Civil Engineering-Usage and Management*, IntechOpen, 2020.
- [84] K. E. Alyamaç and A. B. Aydin, "Concrete properties containing fine aggregate marble powder," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 7, pp. 2208–2216, 2015.
- [85] M. C. Dhoka, "Green concrete: using industrial waste of marble powder, quarry dust and paper pulp," *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 2, no. 10, pp. 67–70, 2013.
- [86] A. Boukhelkhal, L. Azzouz, A. S. E. Belaidi, and B. Benabed, "INFLUENCE DE LA POUDRE DE MARBRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À L'ÉTAT FRAIS," no. Laboratoire de recherches de génie civil, 2012.
- [87] H. Binici, H. Kaplan, and S. Yilmaz, "Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete," *Sci. Res. Essays*, vol. 2, no. 9, pp. 372–379, 2007.
- [88] S. D. Kore and A. K. Vyas, "Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 4, pp. 85–92, 2016.
- [89] R. Chaid, R. Jauberthie, and A. Boukhaled, "Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons," 2010.
- [90] D. Bahar, "The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 5, no. 9, pp. 1372–1380, 2010.

- [91] O. M. Omar, G. D. Abd Elhameed, M. A. Sherif, and H. A. Mohamadien, "Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties," *HBRC J.*, vol. 8, no. 3, pp. 193–203, 2012.
- [92] J. Sanjeev and K. J. N. S. Nitesh, "Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened properties of vibrated concrete and self-compacting concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 1559–1568, 2020.
- [93] B. Ali and L. A. Qureshi, "Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates.," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116783, 2019.