

**UNIVERSITÉ DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



## **MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : Matériaux

**DURABILITE DES MORTIERS A BASE DE MARBRE ET FIBRES  
RECYCLES**

Par

**Youcef Riadh LOUNIS**

**Abdennasser BENKHALED**

Devant le jury composé de :

Mme. N. BENTLEMSAN

U. Saad Dahleb-Blida

Promotrice

M. W. YAHIAOUI

U. Saad Dahleb-Blida

Co-promoteur

Blida, octobre 2021

## ملخص

من أجل مواجهة الطلب المتزايد على الموارد المادية ومتطلبات حماية البيئة، أصبحت رؤية التنمية المستدامة مرتبطة بالدراسات المستقبلية وجميع الدراسات الممكنة لإعادة استخدام وإعادة تدوير النفايات والمنتجات الثانوية. الصناعية، ولا سيما في المدنية الهندسة، في صناعة الخرسانة والملاط. الهدف من هذا العمل هو دراسة إمكانية استبدال الرمل الطبيعي بنفايات الرخام ودراسة تأثيره على مقاومة هجوم الكبريتات. تمت دراسة إمكانية تحسين سلوك الملاط الذاتي التماسك عن طريق إضافة نفايات الألياف الزجاجية في الحالة العذبة

في الحالة العذبة، درسنا أولاً سلوك الملاط الذاتي التماسك عن طريق استبدال الرمل الطبيعي برمل الرخام بمعدلات 0%، 15%، 30% و 50%، ثم تأثير دمج الألياف الزجاجية المهذورة في ملاط التماسك الذاتي بمعدلات 0 كجم / م 3 و 0.25 كجم / م 3 و 0.5 كجم/م 3، وأخيراً مزيج من ألياف الرخام والزجاج.

في حالة التصلب درسنا تأثير كبريتات الصوديوم على الملاط الذاتي التماسك، ودرسنا بشكل أساسي قوة الانضغاط والانحناء والمسامية والامتصاص الشعري.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في الحالة العذبة أن الجمع بين نفايات الرخام والألياف أنتج ملاطاً ذاتي التماسك مع انتشار جيد ووقت تدفق جيد. أظهرت النتائج في حالة المتصلبة أن الملاط ذو الأساس الرخامي كان له مقاومة أفضل للكبريتات من الملاط الطبيعي القائم على الرمل.

**الكلمات المفتاحية:** النفايات، إعادة التدوير، الملاط ذاتي التماسك، رخام، ألياف الزجاج، كبريت.

## RESUME

Afin de faire face à la demande croissante de ressources matérielles et les exigences de protection de l'environnement, la vision du développement durable est devenue liée aux études prospectives et à toutes les études possibles de réutilisation et de recyclage des déchets et les sous-produits industriels, notamment en génie civil, dans la confection des bétons et des mortiers. Le but de ce travail est d'examiner la possibilité de remplacer le sable naturel par les déchets du marbre et d'étudier son effet sur la résistance aux attaques sulfatiques. La possibilité d'améliorer le comportement des mortiers autoplaçants par l'ajout des déchets de fibres de verre a été étudié à l'état frais.

À l'état frais nous avons étudié tout d'abord le comportement des mortiers autoplaçants en substituant le sable naturel par le sable de marbre à des taux de 0%, 15%, 30% et 50%, ensuite l'effet de l'incorporation des déchets des fibres de verre dans le mortier autoplaçant à des taux de  $0\text{kg/m}^3$ ,  $0.25\text{kg/m}^3$  et  $0.5\text{kg/m}^3$ , et en dernier lieu la combinaison du marbre et des fibres de verre.

A l'état durci, nous avons étudié l'effet du sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur les mortiers autoplaçants, nous avons étudié principalement la résistance à la compression et à la flexion, la porosité et l'absorption capillaire.

Les résultats obtenus à l'état frais ont montré que la combinaison des déchets de marbre et de fibre donnait un mortier autoplaçant avec un bon étalement et un bon temps d'écoulement. Les résultats à l'état durci ont montré que les mortiers à base de marbre présentaient une meilleure résistance aux sulfates que les mortiers à base de sable naturel.

**Mots clés :** Déchets, recyclage, mortier autoplaçant, marbre, fibres de verre, sulfates.

## ABSTRACT

In order to cope with the increasing demand for material resources and environmental protection requirements, the vision of sustainable development has become linked to prospective studies and to all possible studies of reuse and recycling of waste and industrial by-products, especially in civil engineering, in the manufacture of concrete and mortars. The aim of this work is to examine the possibility of replacing natural sand with marble waste and to study its effect on resistance to sulphate attacks. The possibility of improving the behavior of self- compacting mortars by adding waste glass fibers has been studied in the fresh state.

When fresh, we studied first the behavior of self- compacting mortars by substituting natural sand for marble sand at rates of 0%, 15%, 30% and 50%, then the effect of incorporating the waste of glass fibers into the self- compacting mortar at rates of  $0\text{kg} / \text{m}^3$ ,  $0.25\text{kg} / \text{m}^3$  and  $0.5\text{kg} / \text{m}^3$ , and finally the combination of marble and glass fibers.

In the hardened state, we studied the effect of sodium sulphate  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  on self-compacting mortars, we mainly studied compressive and flexural resistance, porosity and capillary absorption.

The results obtained in the fresh state showed that the combination of the waste marble and fiber produced a self- compacting mortar with good spreading and good flow time. Hardened results showed that marble-based mortars had better resistance to sulfates than natural sand-based mortars.

**Keywords:** Waste, recycling, self-compacting mortar, marble, fiberglass, sulphates.

## **REMERCIEMENTS**

En premier lieu, nous adressons nos sincères remerciements et notre parfaite gratitude au ALLAH le Tout-Puissant de nous avoir donné la volonté, le courage ainsi que la patience afin de réaliser ce modeste travail, et de nous avoir guidé à travers chaque partie de nos études jusqu'à ce moment où nous sommes à la fin de notre carrière d'études.

Nous exprimons notre gratitude et nos remerciements à nos encadreurs ; madame N. BENTLEMSAN maitre-assistant, ainsi qu'à monsieur W. YAHIAOUI maitre de conférences à l'université de Blida1, pour le temps qu'ils ont consacré à nous apporter les outils aussi bien méthodologiques que scientifiques, indispensables à la conduite de cette recherche et qui ont tout autant su nous orienter, nous conseiller, et surtout ils ont été présents malgré les conditions difficiles.

Nous exprimons également nos remerciements à monsieur S. KENAI et monsieur B. MENADI professeurs à l'université de Blida1, ainsi que monsieur H.BENSACI maitre de conférences à l'université de Blida1 pour leurs judicieux conseils, les formations qu'ils nous ont accordé et leur orientation via zoom pendant ces temps de pandémie et 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 toute l'équipe du laboratoire de géo-matériaux et génie civil de l'université de Blida1.

Finalement, nous remercions les camarades, les amis du laboratoire et tous ceux avec qui nous avons partagé ces deux années de master.

## DÉDICACES

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, qui a souffert sans me laisser souffrir, à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Abdelhadi

A la femme, ma précieuse offre du dieu, qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère Ghania.

En espérant qu'ils recevront par ce travail, si modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle reconnaissance

A L'être le plus cher de ma vie, Nadjet.

A mes frères Achraf, Rayan et Adam qui n'ont pas cessé de m'encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A ma chère sœur Baraà qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A mes grands-mères, qu'ALLAH leur accorde les plus hauts degrés du paradis.

A mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant, merci pour leur amour et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme Abdennasser pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

**LOUNIS Youcef Riadh**

# **DÉDICACES**

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents :

Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes études depuis mon enfance

Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes études

Mes deux sœurs Ryma et Meriem

Mon frère Fouad

A mon binôme Riadh et sa famille.

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

Spécialement pour notre section **GENIE DES MATERIAUX**

**BENKHALED Abdennasser**

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1:</b> Les constituants du BAP	21
<b>Figure 1.2 :</b> Le ciment	23
<b>Figure 1.3:</b> Processus de fabrication de ciment	24
<b>Figure 1.4:</b> Essai d'Étalement pour Mortier	28
<b>Figure 1.5:</b> Essai à l'Entonnoir en V pour mortier	28
<b>Figure 1.6 :</b> Cône de Marsh	29
<b>Figure 1.7 :</b> la résistance à la compression (MPa)	30
<b>Figure 1.8 :</b> Essai de compression simple avec les jauges de déformation	31
<b>Figure 1.9:</b> La corrélation entre l'essai de la pénétration des ions chlorures (méthode d'immersion) et l'absorption d'eau sous vide à 28 jours	34
<b>Figure 1.10 :</b> Variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre	39
<b>Figure 1.11 :</b> Valeurs d'étalement	40
<b>Figure 1.12 :</b> Variation de la résistance à la compression	41
<b>Figure 1.13:</b> Résultats d'absorption d'eau	42
<b>Figure 1.14:</b> Résultats de la porosité	42
<b>Figure 1.15:</b> Organigramme des différents types de fibres	44
<b>Figure 1.16:</b> Fibres de verre	46
<b>Figure 1.17:</b> Processus de valorisation des déchets de fibres de verre	47
<b>Figure 2.1 :</b> Sable corrigé, Sable de Baghlia, Sable de Boughezzoul	50
<b>Figure 2.2:</b> Courbe granulométrique des sables	52
<b>Figure 2.3 :</b> Courbe granulométrique de sable de marbre recyclé	53
<b>Figure 2.4:</b> Sable de marbre obtenue	53



<b>Figure 2.5:</b> Les déchets de fibres de verre	54
<b>Figure 2.6:</b> Séquence de malaxage de mortier	56
<b>Figure 2.7:</b> Malaxeur	56
<b>Figure 2.8:</b> Essai d'étalement pour mortier	57
<b>Figure 2.9:</b> Dispositif de l'essai à l'entonnoir en V (V-Funnel)	58
<b>Figure 2.10 :</b> Essai de l'air occlus	59
<b>Figure 2.11:</b> Moule prismatique à mortiers	60
<b>Figure 2.12:</b> Des éprouvettes 4×4×16 cm <sup>3</sup>	60
<b>Figure 2.13:</b> Essai de compression pour MAP	61
<b>Figure 2.14:</b> Schéma du dispositif expérimental	62
<b>Figure 2.15:</b> Essai de flexion pour MAP	63
<b>Figure 2.16:</b> Absorption d'eau par succion capillaire	65
<b>Figure 2.17 :</b> Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes	67
<b>Figure 2.18 :</b> Immersion totale des échantillons de l'eau dosée à 5 % de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	68
<b>Figure 2.19 :</b> Les essais réalisés à l'état frais	69
<b>Figure 3.1:</b> Valeurs d'étalement des MAP en fonction du dosage en superplastifiant	71
<b>Figure 3.2:</b> Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant	72
<b>Figure 3.3 :</b> Etalement en fonction de teneurs en déchet de marbre	73
<b>Figure 3.4:</b> Le temps d'écoulement (V-funnel) en fonction de teneurs en DM	74
<b>Figure 3.5 :</b> Etalement en fonction des déchets de fibre de verres	76
<b>Figure 3.6:</b> Le temps d'écoulement en fonction des fibres de verre	77
<b>Figure 3.7 :</b> Masse volumique en fonction des fibres de verre	78
<b>Figure 3.8 :</b> Air occlus en fonction des fibres de verre	79

<b>Figure 3.9 :</b> Etalement en fonction des déchets fibres et marbre_____	81
<b>Figure 3.10:</b> Temps d'écoulement (s) en fonction des fibres et marbre_____	81
<b>Figure 3.11:</b> Air occlus en fonction des fibres de verres et marbre_____	82
<b>Figure 3.12:</b> La masse volumique en fonction des fibres de verre et déchets de marbre_____	83
<b>Figure 3.13:</b> Comparaison des résultats de variation de temps d'écoulement et l'étalement en fonction de fibres de verre pour chaque pourcentage de DM_____	84
<b>Figure 3.14:</b> Comparaison des résultats de variation de la masse volumique et l'air occlus en fonction de Taux de marbre pour chaque quantité de fibres de verre_____	85
<b>Figure 3.15:</b> Résistance à la flexion _____	87
<b>Figure 3.16:</b> Résistance à la compression_____	88
<b>Figure 3.17:</b> Comparaison des résultats pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates et les éprouvettes immergé dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _____	89
<b>Figure 3.18:</b> Comparaison des résultats pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates ET les éprouvettes immergés dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _____	90
<b>Figure3.19 :</b> Examen visuel sur les échantillons de MAP : après 90 jours d'immersion dans la solution de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _____	91
<b>Figure 3.20 :</b> résultats de l'absorption capillaire par unité de surface des MAP à 30j _____	93
<b>Figure 3.21 :</b> résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des MAP a 30j_____	94
<b>Figure 3.22:</b> Sorptivité à 30 jours d'immersion dans la solution de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _____	94
<b>Figure 3.23 :</b> résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des MAP a 60j_____	96
<b>Figure 3.24 :</b> résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des MAP a 60j_____	96
<b>Figure 3.25:</b> Sorptivité à 60 jours d'immersion dans la solution de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . _____	97
<b>Figure 3.26 :</b> résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des MAP a 90j _____	98

<b>Figure 3.27 :</b> résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des MAP a 90j	98
<b>Figure 3.28 :</b> Sorptivité à 90 jours d'immersion dans la solution de $\text{Na}_2\text{SO}_4$	99
<b>Figure 3.29 :</b> Evolution de la porosité des MAP a 30j, 60j et 90j	100
<b>Figure 3.30 :</b> La perte de masse du MAP par immersion en $\text{Na}_2\text{SO}_4$ en fonction de temps	101
<b>Figure 3.31:</b> Comparaison des résultats de perte de masse pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates et les éprouvettes immergé dans $\text{Na}_2\text{SO}_4$	102

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 2.1</b> : Composition chimique et minéralogique du ciment	49
<b>Tableau 2.2</b> : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	50
<b>Tableau 2.3</b> : Caractéristiques principales des deux sables ainsi que le sable corrigé	51
<b>Tableau 2.4</b> : Caractéristiques physiques du marbre	53
<b>Tableau 2.5</b> : Caractéristiques chimiques du marbre	54
<b>Tableau 2.6</b> : Caractéristiques du « MEDAFLOW 30 »	55
<b>Tableau 3.1</b> : Variation du dosage en superplastifiant	70
<b>Tableau 3.2</b> : Composition des mortiers obtenus en fonction du rapport optimale SP/L	73
<b>Tableau 3.3</b> : Composition des mortiers obtenus en fonction du rapport optimale SP/L	75
<b>Tableau 3.4</b> : Composition des mortiers obtenus en fonction du rapport optimale SP/L	80
<b>Tableau 3.5</b> : La résistance à la flexion à 30,60 et 90 jours	86
<b>Tableau 3.6</b> : La résistance à la compression à 30,60 et 90jours	87
<b>Tableau 3.7</b> : Valeurs moyennes d'absorption d'eau des mortiers à base de sable de marbre à 30j	92
<b>Tableau 3.8</b> : Valeurs moyennes d'absorption d'eau des mortiers à base de sable de marbre à 60j	95
<b>Tableau 3.9</b> : Valeurs moyennes d'absorption d'eau des mortiers à base de sable de marbre à 90j	97
<b>Tableau 3.10</b> : pourcentage de la Porosité en fonction de taux de substitution de déchets de sable de marbre a 30j, 60j et 90j	99

## LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

- $\text{Al}_2\text{O}_3$  : Alumine
- AFGC : Association Française du Génie Civil
- AND : Agence nationale des déchets
- BAP : bétons autoplaçants
- BFM : bétons de fibre métalliques
- BHP : bétons à haute performance
- BO : bétons ordinaire
- BTHP : bétons à très haute performance
- C : Dosage en ciment
- $\text{C}_2\text{S}$  : Silicate bicalcique (belite)
- $\text{C}_3\text{A}$  : Aluminate tricalcique
- $\text{C}_3\text{S}$  : Silicate tricalcique (alite)
- $\text{C}_4\text{AF}$  : Aluminate-ferrite tetracalcique
- $\text{CaCO}_3$  : Carbonate de calcium
- $\text{CaSO}_4$  : Gypse
- CEM II : Ciment Portland avec ajout
- CSH : Silicate de calcium hydraté
- D : Le diamètre moyen de la galette après l'étalement
- dF : Projection de la force de frottement tangentielle

- DIB : Déchets industriels banals
- DIS : Déchets industriels spéciaux
- DM : Déchet de marbre
- DMA : Déchets ménagers et assimilés
- DMS : Déchets ménagers spéciaux
- dS : Surface élémentaire d'une couche cisailée
- E : Module d'élasticité
- E/C : Rapport eau sur ciment
- E/L : Rapport eau sur liant
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Oxyde ferrique
- H<sub>2</sub>O : L'eau
- LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées
- MAP : Mortier autoplaçants
- Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : Le sulfate de sodium
- Rt : Résistance à la traction par flexion
- SiO<sub>2</sub> : Silice
- SP : Superplastifiant
- SPRE : Superplastifiant à haute réduction d'eau
- $\gamma$  : Taux de cisaillement [1/s]
- $\mu$  : Viscosité plastique [Pa.s ]

- $\rho_{\text{abs}}$ : La masse volumique absolue
- $\rho_{\text{app}}$ : La masse volumique apparente
- $\tau$  : Contrainte de cisaillement [Pa]
- $\tau_0$  : Seuil de cisaillement [Pa]

# TABLE DES MATIERES

ملخص.....	1
RESUME.....	2
ABSTRACT.....	3
REMERCIEMENTS.....	4
DÉDICACES.....	5
LISTE DES FIGURES.....	7
LISTE DES TABLEAUX.....	11
LISTE DES SYMBOLESET ABREVIATIONS.....	12
INTRODUCTION GENERALE.....	19
CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	21
1.1. Introduction.....	21
1.2. Généralités sur les bétons autoplçants et les mortiers autoplçants.....	21
1.2.1. Le béton autoplçant (BAP) :.....	21
1.2.2. Le mortier autoplçant :.....	22
1.2.2.1. Les constituents des mortiers :.....	22
1.2.2.2. Formulation des mortiers autoplçants:.....	25
1.3. Caractérisation des MAP à l'état frais.....	27
1.3.1. Essai d'Etallement au Mini-Cône :.....	27
1.3.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) :.....	28
1.3.3. Essai au cône de Marsh :.....	29
1.4. Caractéristiques des MAP à l'état durci.....	29
1.4.1. Résistance à la compression :.....	29
1.4.2. Résistance à la traction :.....	30
1.4.3. Modules d'élasticité statique et dynamique :.....	30
1.4.4. Absorption d'eau par capillarité :.....	31
1.5. Durabilité Des Bétons Autoplçants.....	31
1.5.1. Perméabilité à l'eau :.....	31
1.5.2. Résistance aux attaques sulfatiques :.....	32



1.6.	Mortier à base de déchet de marbre.....	34
1.6.1.	Définition de déchets : .....	34
1.6.2.	Type de déchets : .....	34
1.6.3.	Recyclage des déchets : .....	35
1.6.3.1.	Avantages du recyclage: .....	36
1.6.3.2.	Procédés du recyclage:.....	36
1.6.3.3.	L'intérêt de la valorisation : .....	36
1.7.	Valorisation des déchets de marbre dans le développement durable en construction.....	37
1.7.1.	Définition et Historique du marbre : .....	37
1.7.2.	Composition du marbre : .....	38
1.7.3.	Effet des ajouts de marbre sur le mortier et sur le béton : .....	38
1.7.4.	Substitution du sable par le marbre : .....	39
1.8.	Mortier et Béton autoplaçant à base de fibres de verres.....	43
1.8.1.	Historique des fibres : .....	43
1.8.2.	Caractéristiques et propriétés des fibres : .....	44
1.8.3.	Le rôle des fibres : .....	44
1.8.4.	Les fibres de verre : .....	45
1.8.4.1.	Le traitement et le recyclage des déchets de fibre de verre : .....	46
1.8.4.2.	Valorisation des déchets de fibres de verre : .....	46
1.9.	Conclusion .....	48
<b>CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS .....</b>		<b>49</b>
2.1.	Introduction .....	49
2.2.	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	49
2.2.1.	Ciment :.....	49
2.2.2.	Sable.....	50
2.2.3.	Sable de déchet de marbre .....	52
2.2.4.	Les fibres de verres .....	54
2.2.5.	Eau de gâchage .....	54

2.2.6. Superplastifiant .....	55
2.3. Méthodologie de travail et formulation du MAP .....	55
2.4. Substitution de sable de marbre.....	57
2.5. Essais à l'état frais .....	57
2.5.1. Essai d'étalement au Mini-Cône : .....	57
2.5.2. Essai à l'entonnoir en V : .....	58
2.5.3. L'essai de l'air occlus : .....	59
2.6. Essais à l'état durci : .....	59
2.6.1. La résistance à la compression : .....	61
2.6.2. La résistance à la flexion : .....	62
2.6.3. Absorption capillaire.....	63
2.6.4. Porosité .....	66
2.6.5. Attaques sulfatiques( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).....	67
2.7. Conclusion .....	69
<b>CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>70</b>
3.1. Introduction .....	70
3.2. Optimisation du dosage en superplastifiant.....	70
3.2.1. Essai au mini cône : .....	70
3.2.2. Essai de V – funnel .....	71
3.3. Effet de substitution de déchet de sable de marbre sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais : .....	72
3.3.1. Etalement au mini cône.....	73
3.3.2. Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel.....	74
3.4. Effet de l'ajout des fibres de verre sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais : ..	75
3.4.1. Etalement au mini cône : .....	76
3.4.2. Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel :.....	77
3.4.3. L'effet de l'ajout de fibre sur la masse volumique du MAP : .....	78
3.4.4. L'essai de l'air occlus : .....	79
3.5. L'Effet de combinaison de fibres de verre et déchets de marbre sur MAP : ...	79

3.5.1.	Etalement au mini cône : .....	80
3.5.2.	Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel :.....	81
3.5.3.	Essai de l'air occlus : .....	82
3.5.4.	Mesure de la masse volumique :.....	83
3.6.	La variation du temps d'écoulement et de l'étalement en fonction de fibres de verre pour chaque pourcentage de DM :.....	83
3.7.	La variation de la masse volumique et de l'air occlus en fonction du taux de marbre pour chaque quantité de fibres de verre : .....	85
3.8.	Effet de substitution de déchet de sable de marbre sur le MAP à l'état durci :	86
3.8.1.	La résistance à la compression et la flexion après l'attaque sulfatique de mortier : .....	86
3.8.2.	Examen visuel :.....	90
3.8.3.	L'absorption d'eau par capillarité après l'attaque sulfatique de mortier :.	92
3.8.4.	La porosité après l'attaque sulfatique de mortier : .....	99
3.8.5.	La variation de la masse dans la solution de sulfate pour l'immersion totale : 100	
3.9.	Conclusion .....	103
	CONCLUSION GENERALE.....	104
	REFERENCES.....	105

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans la construction d'ouvrages de génie civil. En raison de son impact environnemental, c'est aussi l'un des matériaux les plus chers. L'industrie mondiale de la construction utilise environ 1,6 milliard de tonnes de ciment et 10 milliards de tonnes de sable, de gravier et de gravier chaque année [1].

Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années ; Les bétons ordinaire (BO), les bétons à haute performance (BHP), les bétons à très haute performance (BTHP), les bétons de fibre métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

L'épuisement des ressources en granulats naturels disponibles, les lois mondiales plus strictes en matière de protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets [2-3].

D'après les recherches bibliographiques, le recyclage des déchets de démolition a dépassé le stade expérimental dans le monde entier et connaît un développement considérable [3-5]. Les granulats issus du recyclage des produits de démolition qui s'inscrivent dans le cadre des matériaux locaux de substitution sont utilisés dans la plupart des pays européens [2,4]

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton a déjà fait l'objet de nombreuses études [2-7]. Cependant, la plupart des études sont principalement basées à étudier l'effet des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons ordinaires, sans approfondir les aspects de durabilité, ni aborder le comportement in-situ des bétons autoplaçants contenant de la poudre des fines recyclées et les agrégats recyclés [6,8].

Parmi les aspects de durabilité, il y a l'attaque externe de béton par l'environnement agressif, c'est un paramètre important et convainquant pour faciliter l'utilisation à grande échelle des matériaux recyclés.

L'objectif de cette étude est de trouver un substitut au granulats naturels à travers l'incorporation de déchets de marbre et déchets de fibres de verre comme granulats recyclés

dans le mortier autoplçant afin d'identifier le mortier recyclé comme un matériau de construction dans le secteur de génie civil.

Cette étude consiste à étudier l'effet de déchet de sable de marbre et le déchet de fibre de verre sur le comportement des MAP l'état frais et a l'état durci.

# CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1.1. Introduction

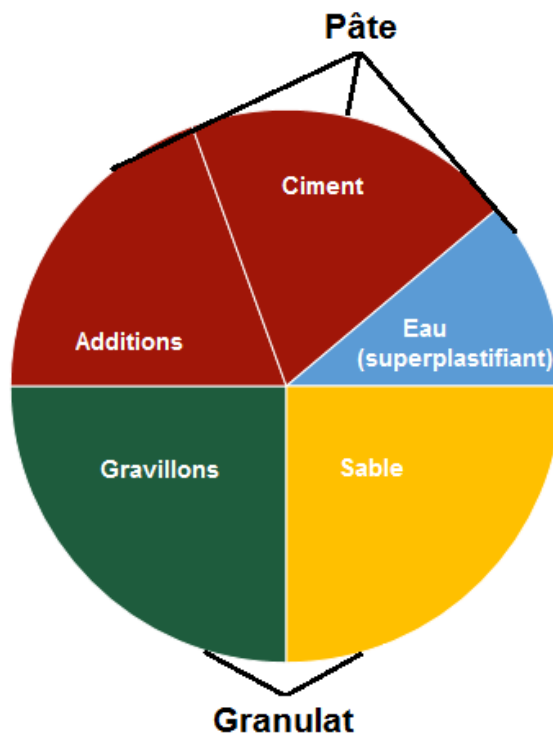
Dans le premier chapitre, nous essaierons de donner une description générale de l'étude bibliographique de tous les principaux concepts à traiter dans notre recherche.

Ce dernier comprend un aperçu du mortier autoplaçant. Les méthodes et techniques de formulation utilisées dans MAP et l'effet du sable de marbre recyclé sur les propriétés des mortiers autoplaçants frais et durcis.

## 1.2. Généralités sur les bétons autoplaçants et les mortiers autoplaçants

### 1.2.1. Le béton autoplaçant (BAP) :

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton super fluide qui peut être coulé facilement et rapidement sans vibration interne ou externe grâce à ses caractéristiques à l'état frais. Ce type de béton est formulé avec une teneur élevée en liant (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>), ce qui représente une excellente opportunité d'exploiter des déchets industriels tels que les déchets de marbre (DM).



**Figure 1.1:** Les constituants du BAP.

### 1.2.2. Le mortier autoplaçant :

Le mortier autoplaçant est un matériau de construction utilisé pour fixer les éléments entre eux, assurer la stabilité de la structure et combler les espaces entre les blocs de construction. D'une manière générale, le mortier est le résultat d'un mélange de sable, de liant (ciment ou chaux) et d'eau dans un rapport donné, qui varie selon les réalisations et d'adjuvant. Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types et caractéristiques principales, telles que la maniabilité la prise, le retrait [9]

#### 1.2.2.1. Les constituents des mortiers :

La grande différence entre le mortier autoplaçant et le mortier ordinaire réside dans le choix des constituants et leurs propriétés. Ces derniers peuvent être classés en trois catégories : les matériaux de base (sable, ciment, eau), les additions minérales ainsi que les adjuvants chimiques.

##### a. Sable

Le sable forme un squelette inerte de mortier durci. Il doit avoir une bonne répartition granulométrique et une bonne propreté, c'est-à-dire qu'il ne contient pas de matières organiques ni de particules d'argile. Si les constructeurs choisissent traditionnellement le sable fin, le sable moyen ( $D_{\max} = 2 \text{ mm}$ ) peut également être utilisé pour réaliser un mortier qui s'ouvre correctement. Ce mortier nécessite moins de liant, mais donnera tout de même de bons résultats en termes de résistance mécanique.

Le choix du sable pour les MAP est très important, sa granulométrie nous permet de minimiser le volume d'air pour améliorer les propriétés des MAP, car la résistance de ces derniers est fortement affectée par le squelette des particules. Plus le squelette est dense, plus la résistance du béton est élevée. La qualité du sable a un impact sur la qualité du béton sous tous ses aspects. Il affecte directement l'aptitude au traitement et la résistance [10]

De manière générale, la granulométrie du sable affecte la quantité d'eau nécessaire à la formulation du béton. En effet, plus la granulométrie du sable est petite, plus il faut d'eau pour la formulation du béton. En d'autres termes, la qualité des particules de sable affecte la maniabilité du béton. [10]

## b. Le Ciment

C'est un liant hydraulique qui durcit rapidement et atteint sa résistance maximale en quelques jours. Après durcissement, cette pâte peut conserver sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Son utilisation la plus courante est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, utilisée pour agréger du sable fin et du gravier, pour produire du mortier et même du béton.



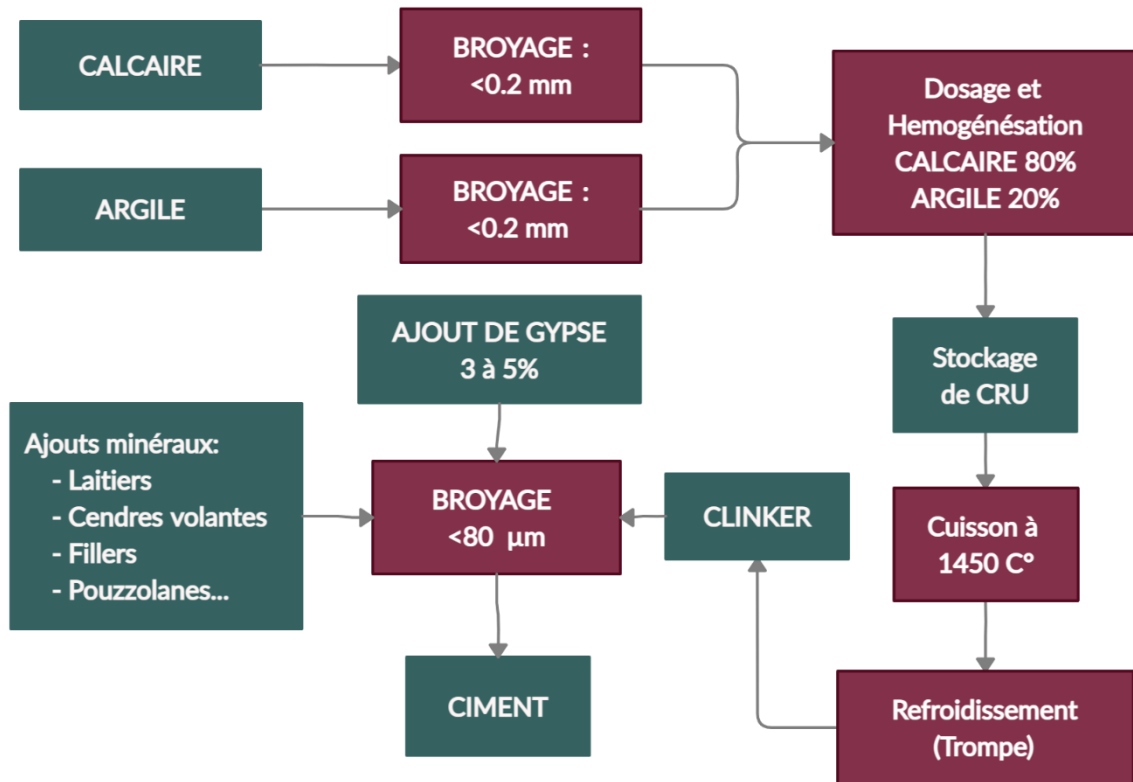
**Figure 1.2** : Le ciment.

Le ciment est un produit broyé du refroidissement du clinker. Le clinker contient un mélange de silicate et d'aluminate de calcium, avec une température de fusion de 1450-1550 °C. Le ciment ordinaire est aussi appelé liant hydraulique car il a les caractéristiques d'hydratation et de durcissement en présence d'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment le silicate et l'aluminate de calcium. [11]

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique :  $C_3S$
- Silicate bicalcique :  $C_2S$
- Aluminate tricalcique- :  $C_3A$
- Alumino ferrite tétracalcique:  $C_4AF$





**Figure 1.3** : Processus de fabrication de ciment.

### c. L'eau De Gâchage

L'eau joue un rôle important, elle permet d'hydrater le ciment, et une bonne mise en œuvre du béton ou du mortier, contribuant ainsi à sa maniabilité. L'eau doit être propre et exempte d'impuretés nocives (matières organiques, alcalis). L'eau potable est toujours appropriée, et le mélange avec de l'eau de mer doit être évité, en particulier le béton armé.

La norme précise les caractéristiques de l'eau nécessaires à la fabrication du mortier et du béton. Le mortier doit contenir la quantité maximale d'eau compatible avec la meilleure ouvrabilité au traitement. [12]

### d. Les Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui sont ajoutés en petites quantités au mortier ou au béton pendant le malaxage pour modifier certaines caractéristiques lorsqu'ils sont frais ou durs. De manière générale, l'adjuvant le plus utilisé dans la fabrication du béton (béton fluide) est le superplastifiant.

Les superplastifiants (ou réducteurs d'eau élevée) sont des polymères à très longues chaînes moléculaires. La norme ASTM C494 définit le SP comme un « adjuvant réducteur d'eau élevée » [13]. Ces additifs permettent de réduire le taux d'humidité de 30% voire 40% dans la nouvelle génération de SP [14].

Les superplastifiants peuvent être ajoutés au béton en petites quantités, en fonction du poids du ciment, sans provoquer de retard ou d'aération excessif. Les principaux avantages de l'utilisation de superplastifiants sont :

- Produire du béton ou du mortier très facile à traiter (haute ouvrabilité) sans réduire la teneur et la résistance du ciment.
- Produire du béton ou du mortier qui contient moins de ciment mais a une résistance et une maniabilité normales.

#### 1.2.2.2. Formulation des mortiers autoplaçants:

En utilisant des matériaux avec des pourcentages appropriés de chaque composant, les formulations de coulis et de mortier autoplaçant offriront les meilleures performances en termes de stabilité et de fluidité. Lorsque le mortier est considéré comme autoplaçant, les caractéristiques requises ont une grande fluidité et une résistance suffisante à la ségrégation statique et dynamique.

Diverses méthodes ont été conçues pour optimiser la formulation de MAP et de BAP. Parmi elles : la méthode japonaise d'Okamora (1990), la méthode française LCPC, la méthode suédoise CBI de Peterson et al. Ceci est basé sur la conception expérimentale et la conception d'OH et al. Ceci est basé sur la théorie de l'excès de pâte [15]

La formule repose donc sur trois critères :

- Fluidisation de la pâte : Elle est obtenue en utilisant un superplastifiant à haute capacité anti-floculation sans ajout d'eau.
- Restreindre le frottement entre les granulats pour favoriser l'écoulement : C'est parce que la taille des granulats est généralement plus petite, et le volume de la pâte et la quantité de poudre fine sont plus importants que ceux du béton ordinaire.

- Stabiliser le mélange pour éviter les risques de ségrégation : il est obtenu grâce à l'utilisation d'agents de viscosité et l'ajout d'additifs (charges, cendres volantes, laitier broyé, fumée de silice).

### **Méthode D'Okamura:**

La formulation des MAP par l'approche développée à l'université de Kochi au Japon [16] se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Cette méthode de formulation est à la fois forfaitaire pour les dosages des granulats et expérimentale pour le dosage en eau et en adjuvant. Pour formuler un BAP par cette méthode baptisée « **méthode japonaise** », on doit passer par les étapes suivantes :

- Choix du dosage en ciment : La quantité du ciment dépend du cahier des charges et des performances désirées (résistance, durabilité...).
  - Désignation du volume d'air : Le volume d'air occlus est pris égal à 2 %.
  - Détermination du dosage du sable : Le volume de sable est posé forfaitairement égal à 40% du volume du mortier.
  - Détermination du dosage minimal en eau : La demande en eau passe par la conception de la composition de la pâte. En effet des essais d'étalement au mini- cône sont réalisés en faisant varier le rapport Eau/Liant avec le dosage choisi en liant.
  - En traçant la courbe d'Eau/Liant en fonction de l'étalement relatif « Rp » (équation.1), on détermine le point d'intersection avec l'axe des ordonnées «  $\beta_P$  » qui permet de déterminer le besoin en eau minimale nécessaire pour cimenter les additions minérales.
- [17] [18]

$$R_p = \frac{d^2 - 100^2}{100^2} = \left( \frac{d}{100} \right)^2 - 1$$

Avec :

«**Rp**» : L'étalement relatif.

« **d** » : le diamètre d'étalement moyen en millimètre de la galette de pâte

### 1.3. Caractérisation des MAP à l'état frais

La déformabilité du mortier est définie comme la capacité du mortier à changer de forme sous son propre poids et faire en sorte que le mortier ait des exigences de déformabilité élevées.

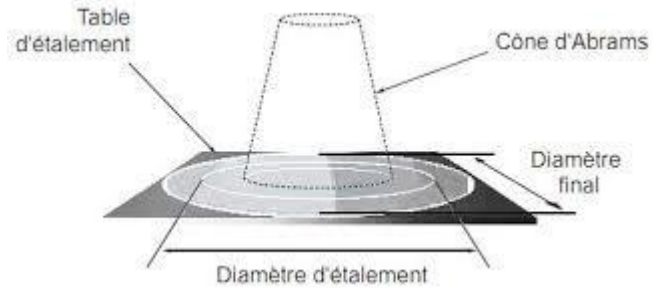
Afin d'obtenir une déformabilité suffisante, il est important de minimiser les frottements entre les sables du mélange. Il est nécessaire de réduire la quantité de sable grossier et d'augmenter le volume de pâte pour atteindre la déformabilité des MAP requise. Une autre façon de réduire le frottement entre les sables consiste à ajouter des additifs minéraux tels que des charges. [19]

Afin d'augmenter la déformabilité de la pâte et de réduire le frottement entre les sables, un superplastifiant à haute réduction d'eau (SPRE) est ajouté au mélange MAP. Ces SPRE peuvent maintenir un rapport eau/liant relativement faible tout en conservant une fluidité élevée. La déformabilité de la pâte est également augmentée en diminuant la viscosité.

D'une manière générale, le but du nouveau test de mortier est de déterminer d'abord les deux rapports S/M et SP/P, puis d'étudier l'effet de la poudre de marbre sur la rhéologie du MAP. Le test d'étalement a pour but de déterminer la déformabilité du mortier en mesurant l'étalement du mortier, et de vérifier la stabilité du mortier en observant la dalle de mortier après l'arrêt de l'écoulement. La viscosité du mortier est évaluée en calculant le temps d'écoulement à travers le test du mini entonnoir en forme de V.

#### 1.3.1. Essai d'Etalement au Mini-Cône :

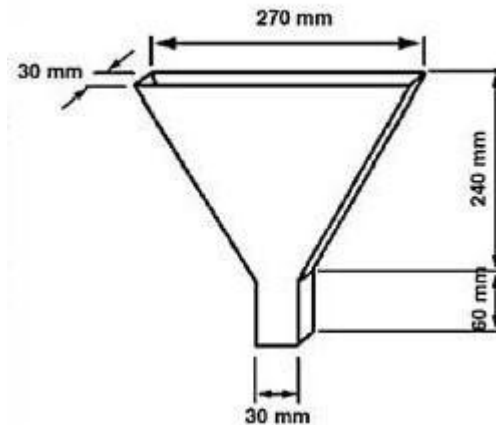
L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, et on prend la moyenne. La figure 1.4 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



**Figure 1.4:** Essai d'étalement pour Mortier.

### 1.3.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) :

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des MAP. Un entonnoir de dimensions définie est rempli de mortier jusqu'aux bords. 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, il caractérise la viscosité du mortier. Si le mortier s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible.



**Figure 1.5:** Essai à l'Entonnoir en V pour mortier.

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 de cône inversée fera bloquer l'écoulement du mortier si, par exemple il y a trop gros granulat. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement inter granulaire élevé. [20]

### 1.3.3. Essai au cône de Marsh :

L'essai du cône de Marsh est utilisé pour déterminer la mobilité relative de MAP. C'est un moyen simple et pratique d'obtenir une mesure de la fluidité de la pâte, qui est inversement proportionnelle au temps d'écoulement. En mesurant le temps nécessaire à 1 litre de pâte pour s'écouler du cône par une petite ouverture de 11 mm.

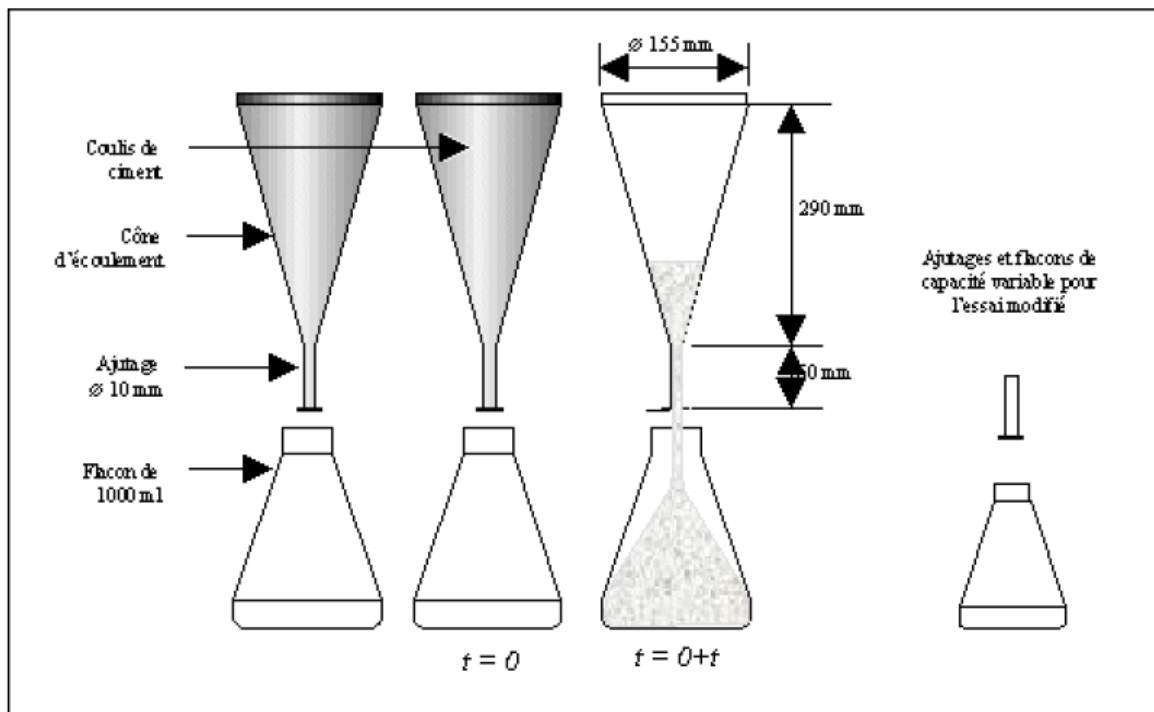
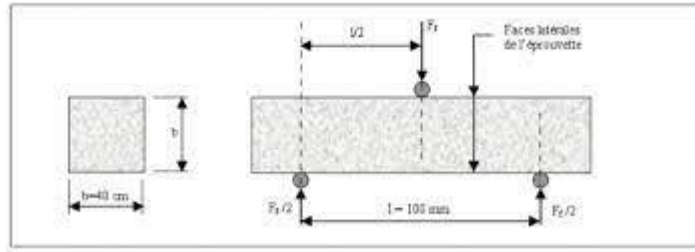


Figure 1.6: Cône de Marsh.

## 1.4. Caractéristiques des MAP à l'état durci

### 1.4.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression d'un béton à un âge fixé, par exemple 28 jours, dépend principalement de la résistance du rapport eau sur ciment et la teneur en ciment. L'augmentation du premier mène à une diminution de la résistance à la compression, pendant que l'augmentation du deuxième conduit à une augmentation de la résistance du béton. Dans le cas d'un BAP le rapport E/C est de l'ordre de 0,45 et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibré [20]



**Figure 1.7 :** la résistance à la compression (MPa).

#### 1.4.2. Résistance à la traction :

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation de la résistance à la traction.

Comme la résistance à la compression des BAP est plus grande que celle des bétons vibrés, la résistance à la traction des BAP est également plus grande [23, 24,25]. Dehwah [26] a trouvé des résistances à la traction qui varient entre 4,9 et 6,5 MPa. Des BAP confectionnés à base de différente teneur en cendres volantes ont développé des résistances qui varient entre 1,55 et 2,4 MPa [27].

#### 1.4.3. Modules d'élasticité statique et dynamique :

Le module d'élasticité statique est le rapport entre la contrainte et la déformation qui la correspond dans le domaine élastique. Le module d'élasticité dynamique est calculé par l'intermédiaire de la vitesse de propagation d'ondes. Ces deux paramètres sont liés à la résistance à la compression du béton. En effet, l'augmentation de résistance à la compression mène vers l'augmentation des modules d'élasticité et vice versa [28,29]. Ils sont affectés par le volume de la pâte, le volume et la qualité des gravillons. L'augmentation du premier facteur engendre une diminution des modules d'élasticité, pendant qu'ils augmentent avec l'augmentation du volume de gravillons et de leur qualité, ce qui peut être expliqué par le fait que la dureté des gravillons est plus grande que celle de la pâte [30].

Selon certains auteurs [31-32], les modules d'élasticité des BAP coïncident avec ceux des bétons traditionnels pour la même classe de résistance. D'autres auteurs [33-34] ont rapporté que du fait du faible volume et de la taille maximale réduite des gravillons et du volume de pâte

élevé, les modules d'élasticité des BAP sont un peu faibles par comparaison à ceux des bétons traditionnels [35,36].

L'effet de l'utilisation des ajouts minéraux dans les BAP sur les modules d'élasticité a été étudié par plusieurs chercheurs [35,31]. Les résultats trouvés montrent que la substitution du ciment par des ajouts minéraux de différents types (inerte et pouzzolanique) conduit vers la diminution des modules d'élasticité.



**Figure 1.8 :** Essai de compression simple avec les jauges de déformation. [37]

#### 1.4.4. Absorption d'eau par capillarité :

L'eau est la principale cause de la dégradation des constructions. En fait, quand le béton est partiellement immergé dans l'eau, celle-ci pénètre à travers les pores en transportant dans certains cas des substances nocives et se gèle à l'intérieur des pores [38]. L'absorption d'eau est généralement liée à la porosité des BAP [39,40]. L'augmentation de la porosité conduit à une augmentation du coefficient d'absorption d'eau et vice versa. De Schutter et al [41] ont rapporté que l'absorption des BAP est très faible. Topçu et al [39] ont testé des BAP à base de différentes teneurs en PM. Ces auteurs ont trouvé que l'augmentation de la teneur en PM jusqu'à 200 kg conduit vers la diminution du coefficient d'absorption d'eau.

### 1.5. Durabilité Des Bétons Autoplaçants

#### 1.5.1. Perméabilité à l'eau :

Uysal et al [42] ont étudié l'effet de l'incorporation des cendres volantes, des laitiers des hauts fourneaux, de la poudre de calcaire, de la poudre de marbre et de la poudre de basalte sur



la perméabilité des BAP. Ces auteurs ont trouvé que la profondeur de pénétration d'eau de différents mélanges est comprise entre 0,02 et 12,58 mm. Les mêmes auteurs [42] ont rapporté que le mélange contenant 20% des laitiers de hauts fourneaux a montré une grande résistance à la pénétration d'eau (profondeur de pénétration d'eau =4,42 mm).

### 1.5.2. Résistance aux attaques sulfatiques :

Le sulfate est l'un des agents agressifs qui a de graves conséquences sur la durabilité du béton. En effet, l'attaque sulfatique du béton conduit à l'expansion, fissuration, voire la détérioration de l'élément en béton tels que les ponts, les fondations et les conduites [43].

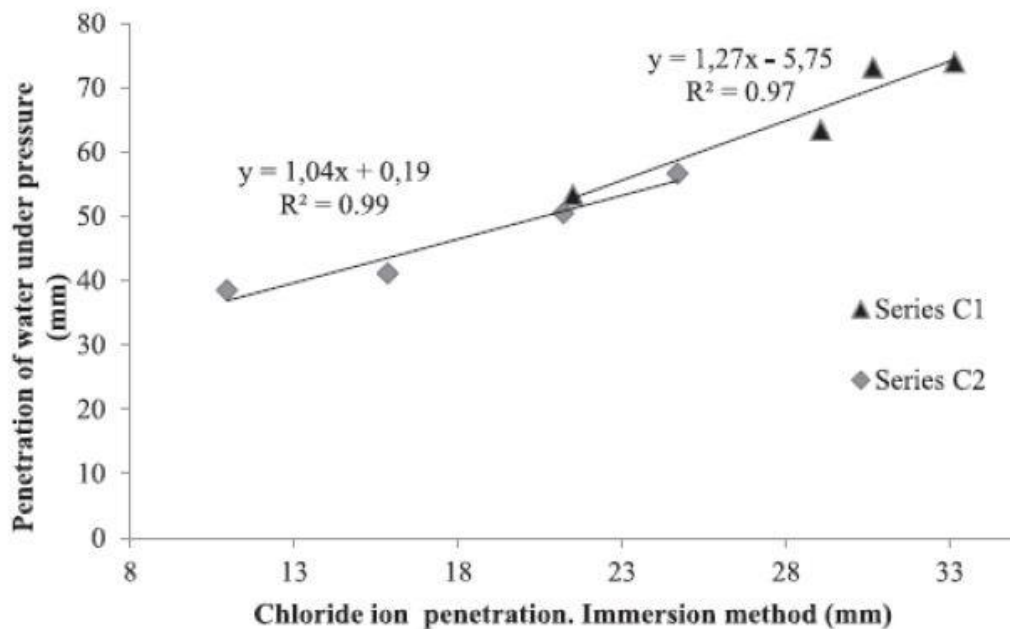
L'attaque sulfatique est généralement attribuée à la réaction des ions de sulfate qui se trouvent dans les sols, les eaux souterraines et les eaux de mer en combinaison avec des ions de magnésium, sodium, calcium et potassium avec la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), les aluminates de calcium hydratés et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), il en résulte du gypse et de l'ettringite [44,45]. Ces deux produits sont plus volumineux que les réactants initiales (leur volume est plus grand de 1,2 à 2,2 fois) [46]. La formation du gypse et de l'ettringite mène à l'expansion, fissuration et la détérioration du béton. En effet, Lorsque le béton est fissuré, sa perméabilité augmente et la pénétration des eaux agressives à son cœur devient plus facile, ce qui accélère la détérioration [47].

L'attaque sulfatique est la pathologie la plus grave conduisant à la dégradation du béton. La structure en béton peut être polluée par deux types d'érosion sulfatique. La première est appelée: l'attaque sulfatique externe, qui est causée par l'environnement extérieur (pluie, neige, gel et gel...Etc.), la seconde est : l'attaque interne des sulfates par l'environnement interne du béton (réaction alcaline granulaire... etc.).

Depuis l'apparition de béton structurel, les chercheurs effectuent plusieurs études expérimentales afin d'améliorer le comportement de béton dans l'environnement agressif [48,49]. Plusieurs recherches ont été effectuées sur la durabilité du béton produit avec granulats naturels afin de résoudre les problèmes de l'attaque sulfatique comme les recherches de Rissel et Leklou [50,51]. Rissel a étudié le comportement de béton autoplaçant vis – à-vis de l'attaque sulfatique externe (Secondary ettringite formation SEF). Les échantillons de BAP ont été

exposés en milieu sulfatique [50]. Leklou a effectué une étude sur une autre pathologie DEF (delayed formation of ettringite). Cette pathologie est causée par la réaction sulfatique interne dans la matrice cimentaire du béton [51] (Figure 1.10). Ainsi, plusieurs recherches ont été réalisées en France dans le cadre du projet RGCU regroupant plus d'une dizaine de laboratoires scientifiques universitaires et industriels, ont permis d'établir une nomenclature vis-à-vis de l'ettringite afin de valider un essai de performance visant à tester la sensibilité des formulations de béton au traitement thermique. Par contre, il y'a peu de connaissance sur la durabilité des bétons recyclés, surtout sur les bétons spéciaux recyclés (autoplaçant, béton à haut performance... etc.), exposé à l'environnement agressif comme les sulfates, acides... etc.). Dans la littérature, des recherches ont été effectuées sur la durabilité de béton recyclé comme Z. Zhihui et al [52] et MG. Beltrán [53]. Les résultats enregistrés par Z. Zhihui sur la résistance de mortier attaqué par les sulfates indiquent que l'incorporation des agrégats recyclés dans le mortier peuvent causer une perte de masse [54], ainsi, Beltrán MG et al [53] ont trouvé que l'intégration des granulats recyclés dans le béton avec l'incorporation des ajouts cimentaires (cendre volante) peuvent améliorer leur durabilité dans l'environnement agressif (Figure 1.10). Mas et al. [55] ont trouvé que la qualité des agrégats recyclés est affectée sur la performance du béton. A ceci, la pénétration des ions de chlorure est supérieure pour un béton produit avec une faible qualité de AR, taux de remplacement égal 20 – 30% de AR et un rapport E/C de 0.45, 0.65, 0.72. D'autres recherches ont prouvé que les ajouts minéraux peuvent améliorer la résistance de béton recyclé exposé à l'attaque par les sulfates externes [56,54, 57].

Shayan et Xu [58] ont enregistré une résistance vis -à- vis de l'attaque de sulfate pour le béton recyclé, comparable au béton conventionnel après 1 an d'attaque dans la solution de sulfate de sodium (5%). Limbachiya et al, [59] ont trouvé l'expansion comparable pour le béton recyclé produit avec 30% de granulats recyclés à celle du béton conventionnel, après 6 mois d'attaque par la solution de sulfate de sodium. D'après des résultats récents, les granulats recyclés peuvent être réutilisés dans le béton structurel [60,61].



**Figure 1.9:** La corrélation entre l'essai de la pénétration des ions chlorures (méthode d'immersion) et l'absorption d'eau sous vide à 28 jours. [58]

## 1.6. Mortier à base de déchet de marbre

### 1.6.1. Définition de déchets :

Un déchet correspond à tout matériau, substance ou produit qui a été jeté ou abandonné car il n'a plus d'utilisation précise.

### 1.6.2. Type de déchets :

- **Déchets ultimes :** le déchet ultime est une sorte de déchet qui n'a plus de possibilité d'être traité dans les conditions techniques et économiques actuelles, notamment en extrayant des pièces recyclables ou en réduisant leur pollution ou leurs caractéristiques dangereuses [62].
- **Déchets inertes :** ce sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique majeure, ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne dégradent pas les autres matériaux en contact avec eux, et peuvent provoquer une pollution de l'environnement ou des moyens qui mettent en danger la santé humaine. Ces déchets peuvent être utilisés dans des installations de stockage, provenant principalement de chantiers de construction et de

travaux publics ou d'industries qui fabriquent des matériaux de construction. Il s'agit notamment des déchets suivants : béton, carreaux de céramique, céramique, briques, déchets de verre, terre et les enrobés bitumeux [63].

- **Déchets assimilés** : les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants).
- **Déchets verts** : ce sont des déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages...).
- **Déchets organiques** : Les termes suivants recouvrent la même notion : bio-déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit des déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs... etc.
- **Déchets industriels banals (DIB)** : Ils regroupent tous les déchets non dangereux générés par les industriels et les entreprises dans les domaines de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, de la peinture, de la chimie et de la pétrochimie. Il s'agit des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie [63].
- **Déchets dangereux** :
  - **Déchets industriels spéciaux (DIS)** : Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc....
  - **Déchets ménagers spéciaux (DMS)** : Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé [63].

### 1.6.3. Recyclage des déchets :

#### **Définition :**

Le recyclage est le processus de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques principales : la réduction du volume de déchets et la conservation des ressources naturelles. Certains processus sont simples et peu coûteux, mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, cher et peu rentable. Dans ce domaine,

Depuis les années 70, le recyclage a été une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage fait partie de la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- Réduire.
- Réutiliser.
- Recycler.

#### 1.6.3.1. Avantages du recyclage:

Beaucoup de gens considèrent le recyclage comme une étape importante vers le développement durable, puisqu'il réduit l'impact sur l'environnement et favorise l'utilisation des produits moins nocifs pour l'environnement. Certains avantages environnementaux du recyclage incluent :

- Une consommation moindre d'énergie ;
- Utiliser les ressources plus efficacement ;
- La réduction du volume de ces déchets ; [62]

#### 1.6.3.2. Procédés du recyclage:

Le recyclage est principalement divisé en trois techniques : chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit « chimique » utilise des réactions chimiques pour traiter les déchets, comme la séparation de certains composants. Le recyclage dit « mécanique » fait référence à l'utilisation de machines, comme le broyage.

Le recyclage dit « organique » comprend, après fermentation, la production d'engrais et de carburants comme le biogaz. [64]

#### 1.6.3.3. L'intérêt de la valorisation :

- Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- Une meilleure gestion de la recherche.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Augmentation de la production.

## 1.7. Valorisation des déchets de marbre dans le développement durable en construction

### 1.7.1. Définition et Historique du marbre :

Le marbre est une roche métamorphique dérivant d'un calcaire ou d'une dolomie sédimentaire ayant été transformée généralement par métamorphisme régional ou plus rarement par métamorphisme de contact. Dans ce processus de transformation de la roche originelle, les structures sédimentaires sont effacées et la roche carbonatée recristallise en un amas de cristaux de calcite et/ou de dolomie engrenés de dimensions millimétriques à centimétriques. Les intercalations argileuses, les minéraux détritiques ou les oxydes minéraux présents dans le carbonate originel donnent alors au marbre diverses colorations et divers polychromes du plus grand effet esthétique [65]

Le marbre est utilisé comme matériau de sculpture et de construction depuis l'Antiquité. La consistance solide et dense du marbre lui confère un beau poli. Sa translucidité est liée à l'indice de réfraction élevé des cristaux de calcite. Les cristaux de calcite sont le composant principal du vrai marbre, permettant à la lumière de pénétrer la surface de la pierre avant la prise. Donnez à ce matériau (surtout le marbre blanc) une luminosité particulière.

Le mot « marbre » est dérivé du mot grec « marmaros », qui signifie « une pierre magnifique ». Dans l'histoire de l'art, ce terme peut désigner une grande variété de roches, de compositions, de dureté et de textures très différentes. Toute pierre solide et bien polie est généralement appelée "marbre", mais la plus courante reste le vrai marbre au sens géologique du terme. [66]

La production des premiers produits en marbre remonte à la période néolithique (âge de la pierre polie) : dans les Cyclades, le marbre (vrai marbre au sens géologique du terme) est particulièrement abondant (notamment à Paros et Naxos). Les exemples les plus célèbres sont les petites idoles et les grandes sculptures, qui remontent à la fin du IV millénaire av. J.-C. et le III millénaire av. J.-C. (3200-2000 av. J.-C.), caractéristiques de la production artistique de la civilisation des Cyclades.

La civilisation minoenne utilisait plusieurs types de marbre de la péninsule du Péloponnèse (tels que "l'ancien porphyre vert").

Dans l'Egypte ancienne, depuis la période prédynastique, différents types de granit, diorite, gneiss, basalte, schiste, divers calcaires, notamment l'albâtre égyptien, étaient utilisés pour fabriquer des ustensiles rituels. Dès la deuxième dynastie égyptienne, on utilisait la syénite, un type de granit utilisé pour couvrir les pyramides de Khéphren et de Menkaourê.

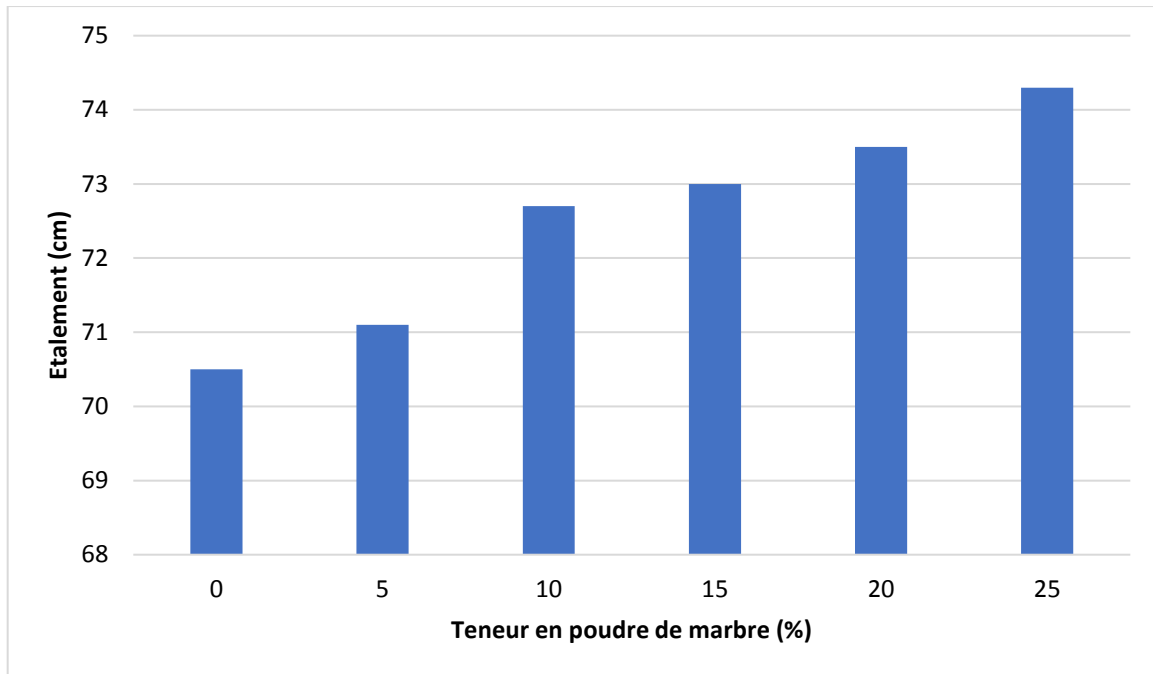
### 1.7.2. Composition du marbre :

Le marbre est une roche métamorphique formée de roches telles que le calcaire, la calcite, la dolomie et la serpentine sous haute pression et haute température. Le marbre est principalement composé de carbonate de calcium (environ 50 % de  $\text{CaCO}_3$ ) et d'une petite quantité d'oxyde acide  $\text{SiO}_2$ . Par conséquent, le marbre appartient à la roche cristalline alcaline. Dans l'industrie de la pierre, le marbre comprend tous les types de carbonate ou de carbonate de magnésium et les roches métamorphiques associées aux propriétés similaires au marbre. [67]

Le marbre contient principalement de la calcite, mais peut contenir plus ou moins de dolomite. Dans la transition vers le calcaire silicaté et le skarn, on y trouve de la brucite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, de la phlogopite. Les marbres se rayent facilement avec un couteau, ce qui permet de les distinguer du quartzite blanc plus dur. Le marbre est généralement constitué de cristaux rhombiques. Le marbre blanc est un calcaire très pur, contenant principalement du  $\text{CaCO}_3$ , communément appelé calcite. Pendant longtemps, la calcite n'était connue que pour son spath calcaire ou sa chaux carbonatée. Cela lui a donné le nom désormais bien connu de calcite.

### 1.7.3. Effet des ajouts de marbre sur le mortier et sur le béton :

De nombreuses recherches ont été menées pour étudier l'effet du marbre comme substitut à la matrice de ciment ou au sable frais et durci. Concernant l'opérabilité du MAP, les avis divergent. L'effet du marbre dépend du type de remplacement (poudre, sable ou granulat) et du pourcentage.



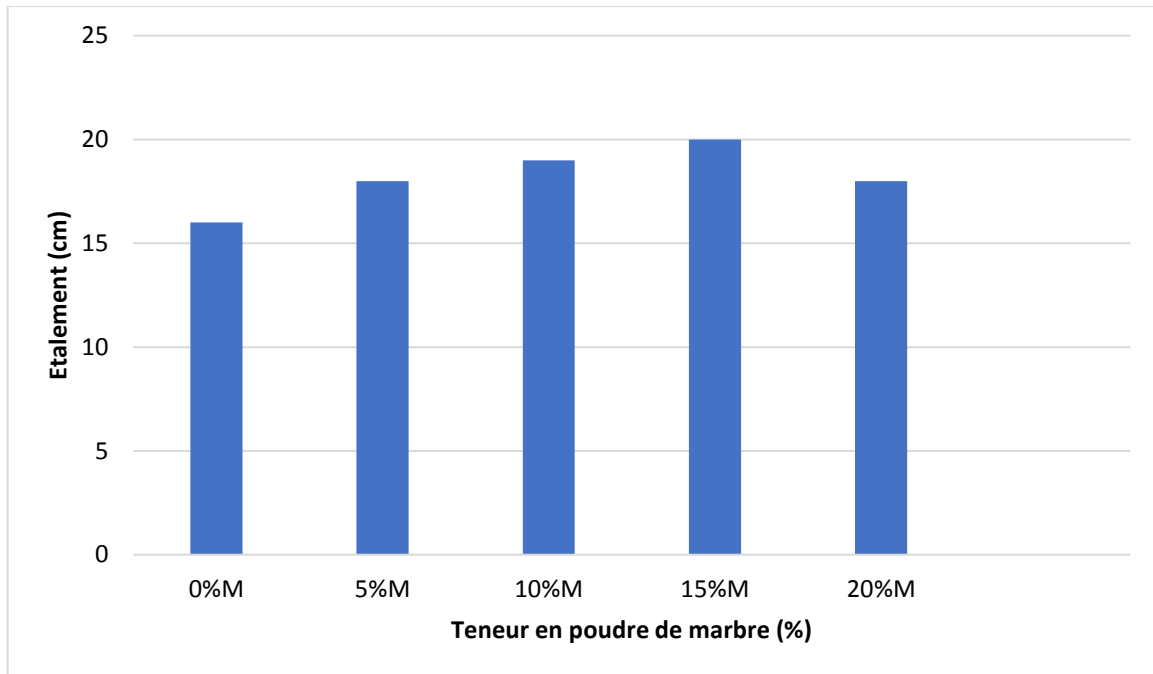
**Figure 1.10** : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre. [68]

#### 1.7.4. Substitution du sable par le marbre :

- **A l'état frais**

Selon Rahman et al [69], une augmentation de la teneur en déchets de marbre dans le mortier améliorera légèrement sa maniabilité. Ces résultats sont confirmés par Hebhou et al [70], comme le montre la figure 1.12, 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 [71] ont constaté que l'utilisation du marbre réduit l'affaissement, réduisant ainsi la maniabilité.





**Figure 1.11** : Valeurs d'étalement. [70]

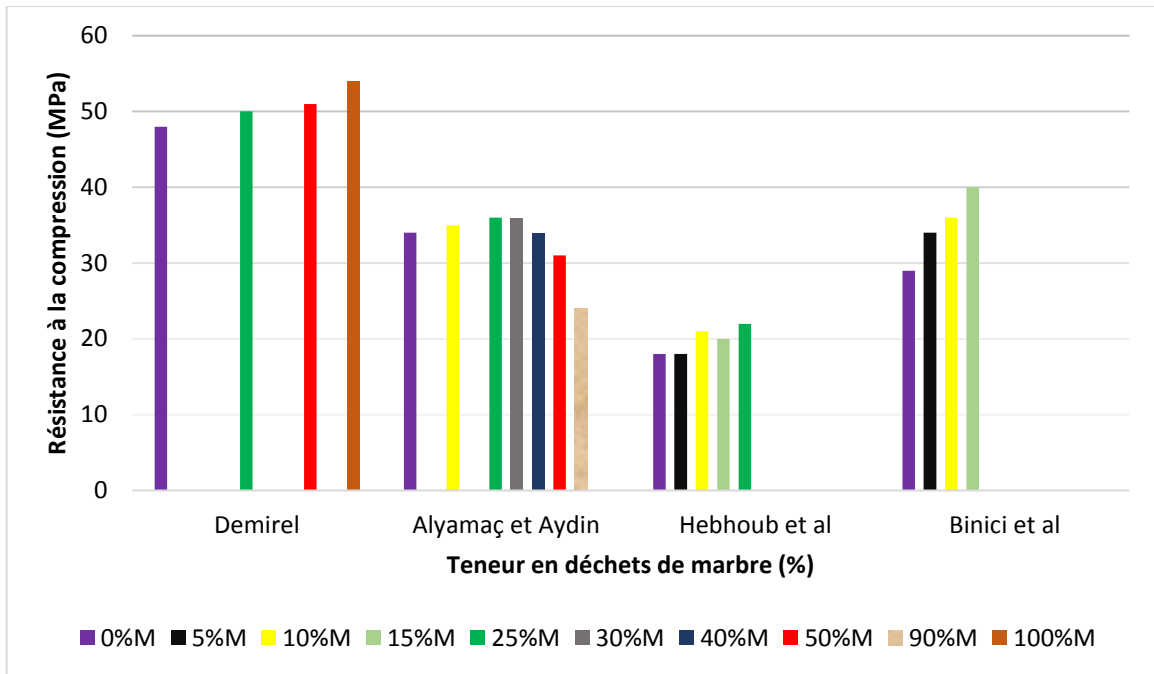
Concernant la teneur en air, Hebhouh et al [70] ont noté que quel que soit le pourcentage de remplacement, les déchets de marbre conduiront à sa réduction. La diminution significative de la quantité d'air entraînée dans le mortier composé de sable de marbre est liée à l'augmentation de la compacité du mélange après remplacement du sable naturel par du marbre.

- **A l'état durci**

Hebhouh et al [70] et Binici et al [72] 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 a remarqué une augmentation de la résistance lorsque le taux de remplacement atteignait 100 %.

Les résultats obtenus par Alyamaç et Aydın [71] sont légèrement différents. La résistance augmente jusqu'à 90 % puis diminue. Ces résultats sont présentés sur la figure 1.13.

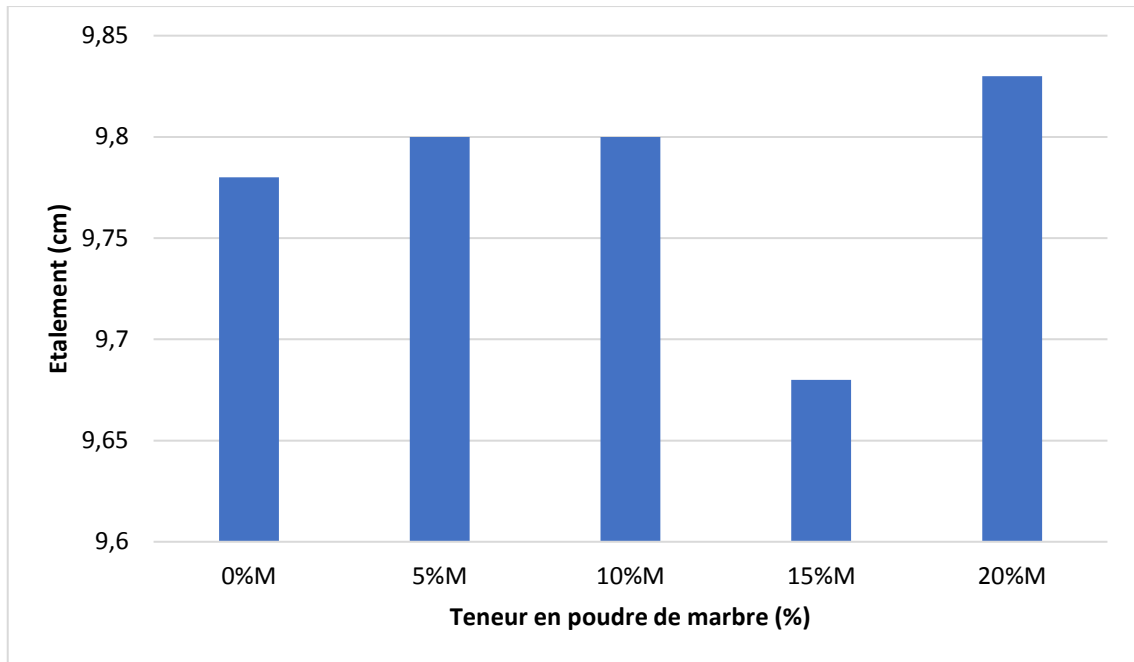
Selon l'étude de Hebhouh et al [70], un mortier autoplaçant à base de sable de marbre résiduel contient un grand nombre de particules fines, qui favorisent l'accumulation de particules lors du processus de malaxage, augmentant ainsi la résistance. Cependant, la caractéristique du sable de marbre est que les particules sont plus nettes et poreuses, il est donc mieux combiné avec le coulis de ciment du mélange.



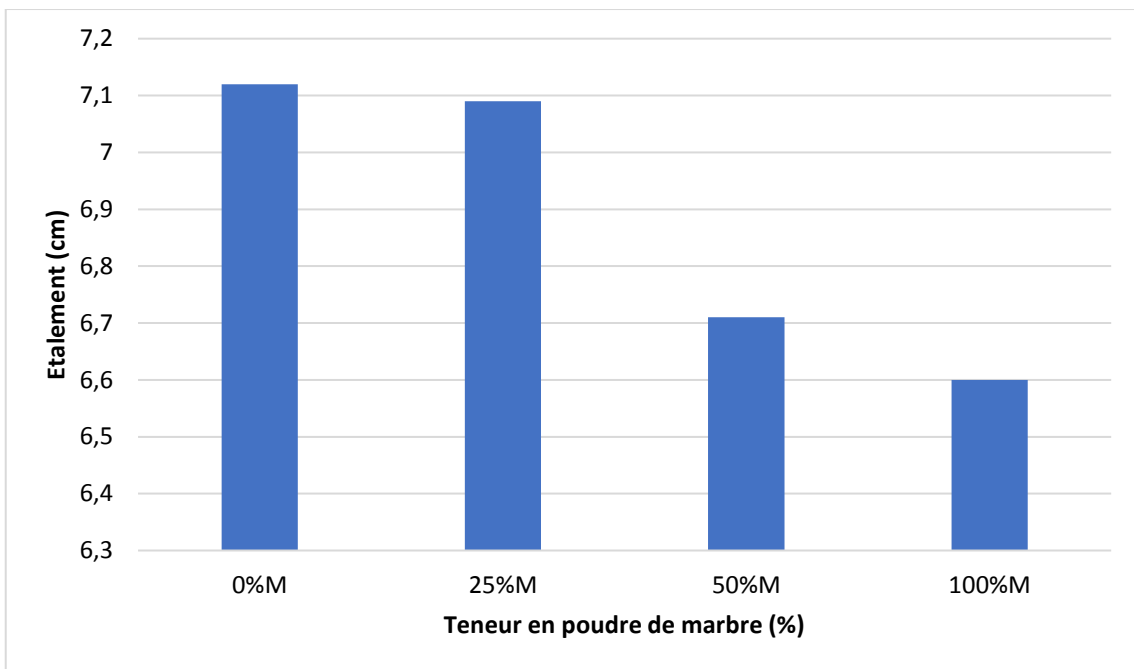
**Figure 1.12 :** Variation de la résistance à la compression. [70] [71] [72] [73]

Omar et al [74] ont trouvé que la valeur de résistance maximale était obtenue avec un taux de remplacement de 15 %, tandis que Rahman et al [69] ont trouvé que la meilleure valeur de résistance a été enregistrée à un taux de 30 %. Etait inférieur au béton témoin.

A partir de la figure 1.13, Hebhou et al [70] 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 [73] Comme le montre la figure 1.13.



**Figure 1.13:** Résultats d'absorption d'eau.[70]



**Figure 1.14:** Résultats de la porosité. [72]

Concernant le retrait des mortiers, Hebhou et al [70] 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.

## 1.8. Mortier et Béton autoplaçant à base de fibres de verres

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, avec des propriétés différentes, essentiellement cylindriques, avec des diamètres et des longueurs différentes. Ils sont répartis dans la matrice dans un sens aléatoire ou préférentiel.

Le béton fibré est un mélange homogène de matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renforcement discontinus sous forme de fibres.

### 1.8.1. Historique des fibres :

Une analyse approfondie de ce concept nous dit que cette 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 augmenterait sa résistance à la compression et à la traction. Il conclut que dans un avenir proche, il n'est pas impossible d'utiliser des matériaux de renforcement de cette nature, c'est-à-dire d'offrir une résistance aux particules dans toute la masse, et d'introduire çà et là des tôles d'acier courtes, notamment du côté étiré, pour faire Le béton devient un matériau de structure plus véritablement homogène [75]. Par la suite, Graham (1911), Weakly (1912) et Fickley (1914) ont délivré une série de brevets.

Depuis 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces procédés recommandent généralement d'ajouter des fibres au béton pour améliorer ses performances. Mais 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 similaires à ceux utilisés aujourd'hui pour le béton fibré.

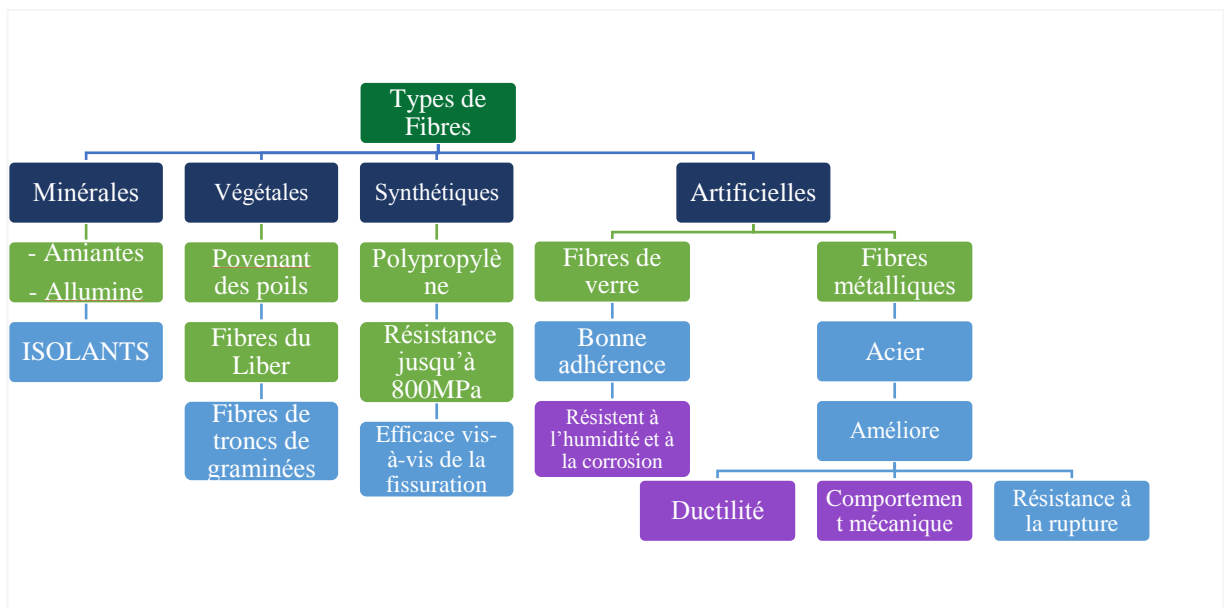
### 1.8.2. Caractéristiques et propriétés des fibres :

Chaque fibre a des propriétés et des caractéristiques spécifiques : taille (le diamètre est généralement inférieur à 1 mm, la longueur est généralement inférieure à 60 mm, etc.), forme (lisse, crantée, ondulée, double fil, crochet, etc.), résistance mécanique (résistance à la traction), Il en résulte une variété de propriétés et de caractéristiques mécaniques.

### 1.8.3. Le rôle des fibres :

Le rôle de la fibre La fonction principale de la fibre est d'empêcher la propagation des microfissures. Selon les fibres utilisées (forme et propriétés) et la structure qu'elles adoptent, cet effet conduit également à des améliorations sur les aspects suivants :

La cohésion du béton frais; la déformabilité avant rupture ;la résistance à la traction par flexion ;la ductilité et la résistance post-fissuration ;la limitation de la fissuration due au retrait et la répartition homogène de la fissuration.



**Figure 1.15:** Organigramme des différents types de fibres.

Il existe quatre grandes familles de fibres :

- Fibres minérales : Elles comprennent une variété de fibres (amiante, alumine, etc.) et sont utilisées en grande quantité dans une variété d'applications traditionnelles.

- Fibres artificielles : Ce type de fibre est généralement utilisé dans le domaine industriel, notamment dans le domaine du génie civil. Il comprend la fibre de verre, la fibre de carbone, la fibre d'acier, etc. Ils sont maintenant les plus courants dans l'industrie de la construction.
- Fibre végétale : La fibre végétale est principalement de la cellulose résistante aux alcalis. La fibre végétale est également résistante à la plupart des acides organiques, mais sera détruite par les acides inorganiques forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres de laine, les fibres libériennes, les fibres vasculaires et les fibres extraites du tronc de certaines graminées. Ils sont couramment utilisés dans la fabrication du papier et les panneaux de construction.
- Fibres synthétiques : Cette famille comprend de nombreux types de fibres, telles que (nylon, polypropylène, acrylique, polyester, etc.). Ils sont apparus sous le nom de rayonne à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Ils sont dérivés de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géants avec des structures similaires aux plastiques.

#### 1.8.4. Les fibres de verre :

En raison de ses propriétés mécaniques et de sa rigidité, la fibre de verre est un matériau de renforcement du béton très efficace. Ils se dispersent facilement dans la matrice cimentaire, ce qui permet de fabriquer des produits aux bords fins et aux formes précises dans diverses formes.

En empêchant la propagation de microfissures dans le béton, ils augmentent la résistance à la traction et la ductilité du béton.

Ils ont une bonne résistance à la corrosion et une bonne résistance chimique.

Ils ont une excellente résistance au feu (jusqu'à 800°C). Cette caractéristique et son coefficient de dilatation du même ordre de grandeur que celui du coulis de ciment font du béton de fibres de verre une bonne résistance à haute température. Il existe plusieurs types de fibres de verre (généralement à base de verre résistant aux alcalis et répondant à la norme NF EN 15422), qui peuvent être utilisées dans diverses applications selon leurs caractéristiques inhérentes et leur dosage.

La fibre de verre présente généralement les caractéristiques suivantes :

- Bonne adhérence au support.
- Diverses formes de disponibilité (coupe, continue...).
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.

Sur chantier, le mortier de fibre de verre est utilisé pour le plâtrage monocouche des murs extérieurs et certains procédés d'isolation thermique.



**Figure 1.16:** Fibres de verre.

#### 1.8.4.1. Le traitement et le recyclage des déchets de fibre de verre :

Le recyclage des déchets de fibres de verre Inventée par les Français en 1836, la fibre de verre est restée longtemps dans les cartons. Il a été breveté en 1930 et est aujourd'hui largement utilisé, devenant dans nos jours un matériau composite indispensable. Ce filament de verre est connu pour ses nombreuses qualités (durable, léger, imperméable, isolant, etc.), et est principalement utilisé pour renforcer certains bétons ou polymères.

#### 1.8.4.2. Valorisation des déchets de fibres de verre :

Entre les rebuts de production et les matériaux en fin de vie, les volumes de déchets fibre de verre à traiter augmentent sans cesse. Et ce n'est qu'un début, avec les futurs bateaux de plaisance, pales des premières éoliennes ou encore démantèlement d'aéronefs hors d'usage.

Deux grands circuits de valorisation restent prédominants :

- **La réutilisation :**

Dans un premier temps, le déchet composite est déchiqueté pour réduire sa taille. Ensuite, le produit obtenu passe par deux phases de broyage pour accentuer la réduction. A

l'aide d'un tamis, une poudre et des fibres courtes sont récupérées. Ce traitement des déchets permet d'obtenir deux types de composés (compound) :

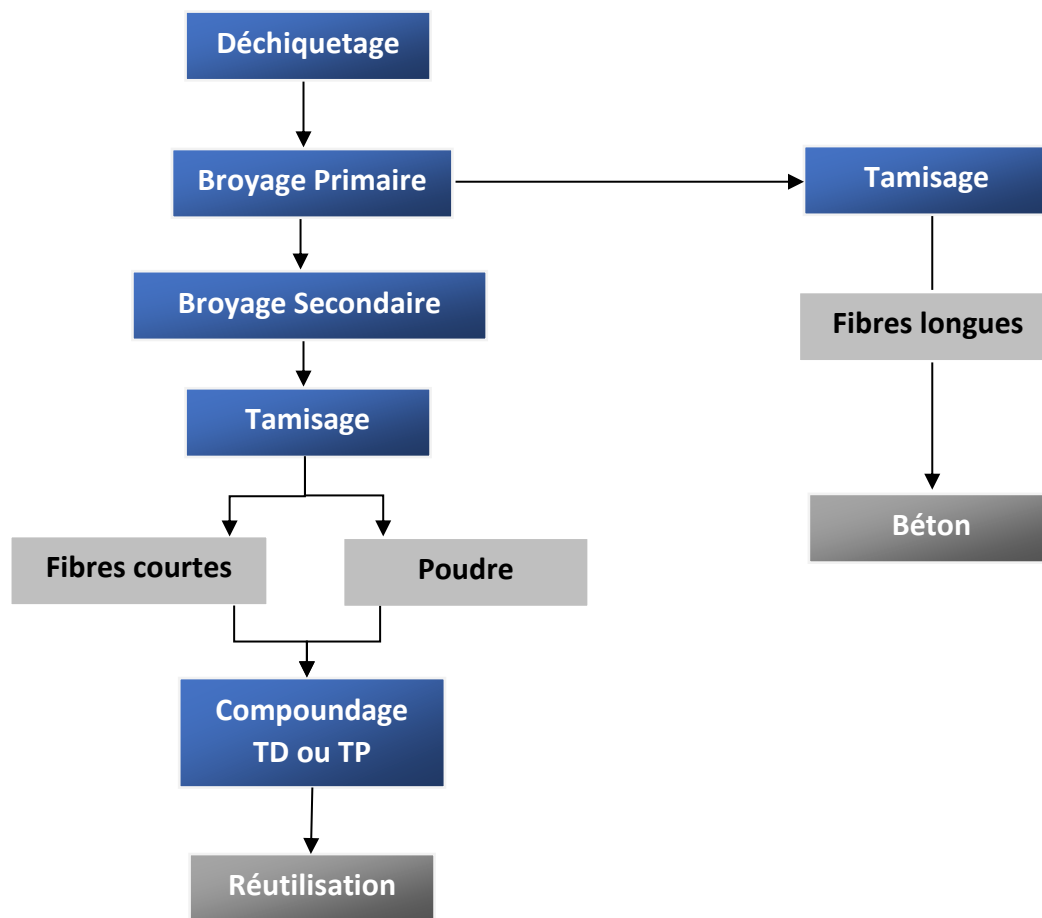
- les thermodurcissables (TD) ;
- les thermoplastiques (TP).

Ils pourront alors être recyclés en un nouveau matériau.

- **La fabrication du béton :**

De la même manière que pour la réutilisation, les déchets subissent un déchetage puis un seul broyage avant de passer dans un tamis. Les fibres longues obtenues entreront dans la composition de certains bétons et le renforcera pour fabriquer des matériaux composites.

De nombreux travaux de R&D sont aussi en cours pour améliorer le recyclage des déchets de fibre de verre. Des expérimentations sont actuellement menées avec un objectif affiché : assurer 100 % du recyclage de la fibre de verre d'ici 2025.



**Figure 1.17:** Processus de valorisation des déchets de fibres de verre.



## 1.9. Conclusion

Les MAP et BAP, est une nouvelle génération de béton venant du Japon. Ce sont des bétons très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité. Les propriétés des BAP à l'état frais sont obtenues grâce à l'utilisation d'un grand volume de pâte riche en fines, un adjuvant de type superplastifiant et un faible volume de gravillon.

L'optimisation de la formulation des MAP nécessite un réglage minutieux de plusieurs paramètres. En effet, la nature et le dosage d'additions minérales et la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal sont des paramètres clés pouvant avoir une influence significative sur les performances des MAP.

La fonction principale des fibres dans le béton est de réduire l'ouverture et la propagation des fissures en état de service et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, étalement et air occlus), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de la durabilité. Ainsi, des bétons autoplaçants (BAP) ont été développés afin que la mise en place soit réalisée sans vibrations, seulement sous l'effet de la gravité.

## CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS

### 2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous intéressons d'abord à la caractérisation des matériaux utilisés dans différentes compositions de mélanges, puis nous continuons à décrire les méthodes de préparation des mortiers autoplaçants. Enfin, des essais relatifs au mortier à l'état frais et à l'état durci sont réalisés.

### 2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

#### 2.2.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment CEM II/B 42,5 de la cimenterie de Mssila. Ses propriétés physiques et mécaniques ainsi que sa composition chimique et minérale sont présentées dans les tableaux 2.1 et 2.2.

**Tableau 2.1 :** Composition chimique et minéralogique du ciment.

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

**Tableau 2.2 :** Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

Rc à 28 (MPa)	$\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	La finesse (cm <sup>2</sup> /g)	Début de prise	Fin de prise
47	3030	1036,32	2960	1h15min	4h15min

### 2.2.2. Sable

Le sable utilisé pour fabriquer notre MAP est un mélange de deux types de sable : le premier est du sable grossier, arrondi, roulé et de classe granulaire (0/5) mm. Par rapport à sa taille, il est généralement appelé « sable baglia ». La région Baglia de Boumerdes. Le second type est le sable fin de Bougezoul, de granulométrie (0 / 2,5) mm, caractérisé par la finesse. Le sable est montré à la figure 2.1.



**Figure 2.1 :** Sable corrigée, Sable de Baghlia, Sable de Bougezoul.

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/Bougezoul). Nous pouvons obtenir notre composition (pourcentage) en calculant les fractions comme suit :

Soit :

Mf1 = 3.61 Module de finesse du sable grossier de Baghlia.

Mf2 = 1.42 Module de finesse du sable fin de Bougezoul.

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 :

$$G1 = \frac{Mf-Mf2}{Mf1-Mf2} = \frac{2.5-1.42}{3.61-1.42} = 0.493... \times 100 = 49.3\%$$

$$G2 = \frac{Mf1-Mf}{Mf1-Mf2} = \frac{3.61-2.5}{3.61-1.42} = 0.507... \times 100 = 50.7\%$$

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

On calcule alors le Mf avec un taux de 50%.

$$G1 = \frac{Mf-Mf2}{Mf1-Mf2} = \frac{x-1.42}{3.61-1.42} = 0.5 \text{ donc } x = 2.515$$

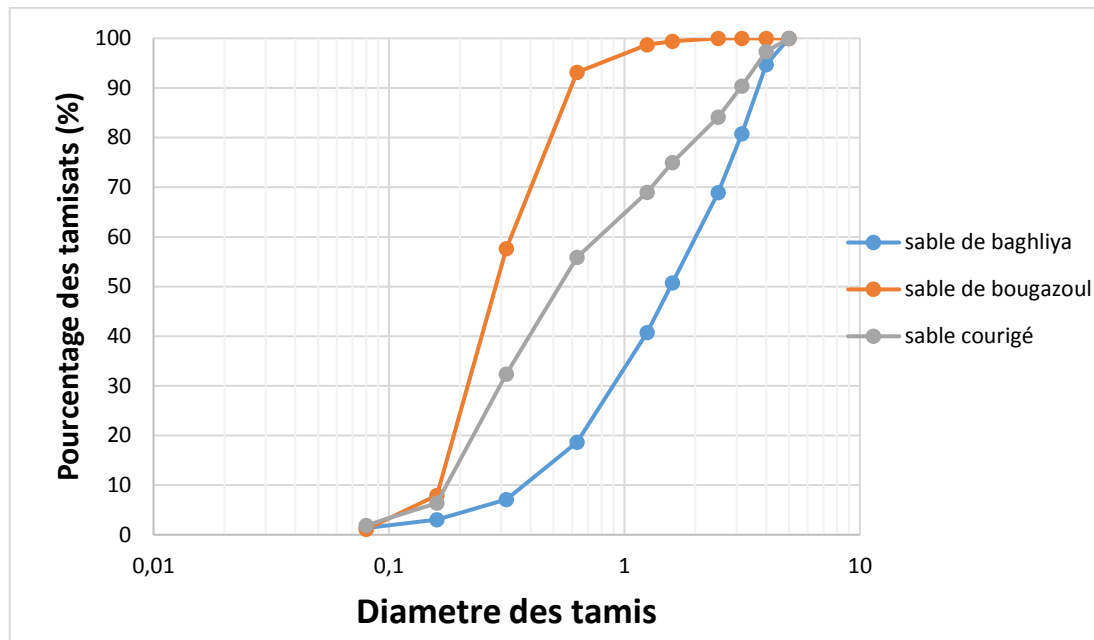
Donc le module de finesse du sable corrigé égale à 2.515, et qui est compris entre 2.2 et 2.8.

Les caractéristiques principales des deux sables ainsi que le sable corrigé sont représentées dans le tableau 2.3 Ci-dessous :

**Tableau 2.3 :** Caractéristiques principales des deux sables ainsi que le sable corrigé.

Sable	S/Boughezoul	S/Baghlia	S/Mélange
Classe granulaire (mm)	0.25	0.5	Mélange
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2651.51	2450.02	2550.76
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1513.08	1543.07	1528.07
Coefficient d'absorption (%)	-	-	1.5
Module de finesse	1.42	3.61	2.515
Composition (%)	50	50	100

Les courbes granulométriques des 2 sables ainsi que du sable corrigé sont données dans la figure (2.2).

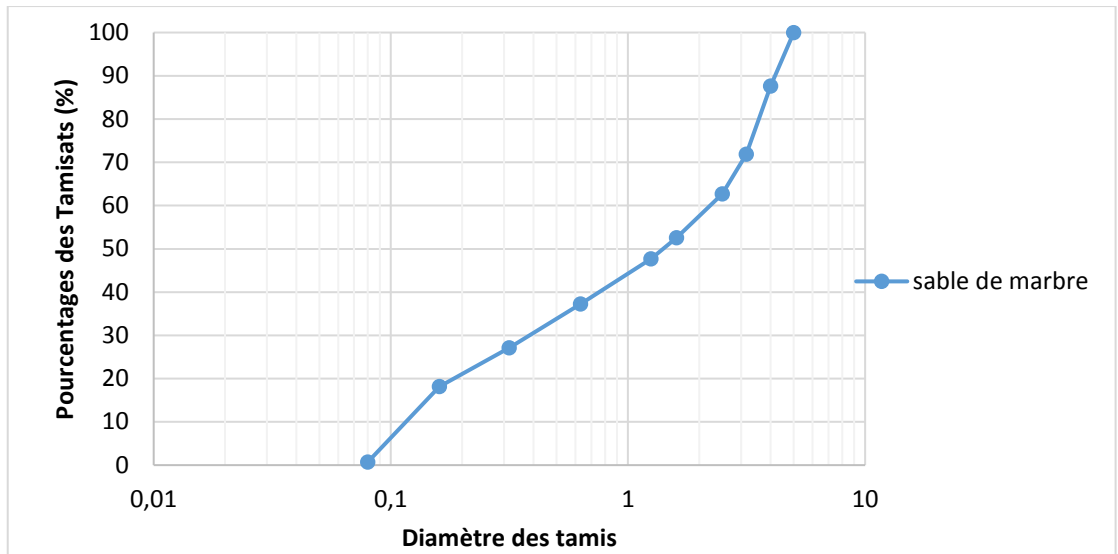


**Figure 2.2:** Courbe granulométrique des sables.

### 2.2.3. Sable de déchet de marbre

Afin d'obtenir le sable de marbre illustré à la figure 2.2, 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 classe granulométrie du déchet de sable est montrée dans la figure 2.3



**Figure 2.3 :** Courbe granulométrique de sable de marbre recyclé.



**Figure 2.4:** Sable de marbre obtenue.

Les caractéristiques physiques du sable de marbre sont représentées sur le tableau 2.4.

**Tableau 2.4 :** Caractéristiques physiques du marbre.

Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2727.273
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1619.118
Coefficient d'absorption (%)	0.5
Module de finesse (M.F)	2.4

**Tableau 2.5 :** Caractéristiques chimiques du marbre.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	PaF
0.38	0.16	0.12	52.73	1.96	0	0	0	0.0008	42.78

#### 2.2.4. Les fibres de verres

Les fibres de verres ont été coupé et disperser en une longueur qui ne dépasse pas les 50mm. On a introduit les fibres de verres en deux fois. La première, on a pris 0.25kg/m<sup>3</sup> en les ajoutant avec le marbre pour les différents taux de substitutions. Tandis que pour la deuxième, on les a ajoutées avec une quantité qui est de 0.5 kg/m<sup>3</sup>.



**Figure 2.5:** Les déchets de fibres de verre.

#### 2.2.5. Eau de gâchage

Pour préparer divers mélanges de ciment, nous devons utiliser l'eau propre exempte de toutes impuretés, dans notre cas, nous avons utilisé l'eau du robinet du laboratoire de génie civil.

### 2.2.6. Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un superplastifiant et haut réducteur d'eau composé de poly carboxylates, confectionné par la société Granitex-NP et mis sur le marché par sa dénomination commerciale « MEDAFLOW 30 », ses caractéristiques sont représentées dans le tableau 2.6

**Tableau 2.6 :** Caractéristiques du « MEDAFLOW 30 ».

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

### 2.3. Méthodologie de travail et formulation du MAP

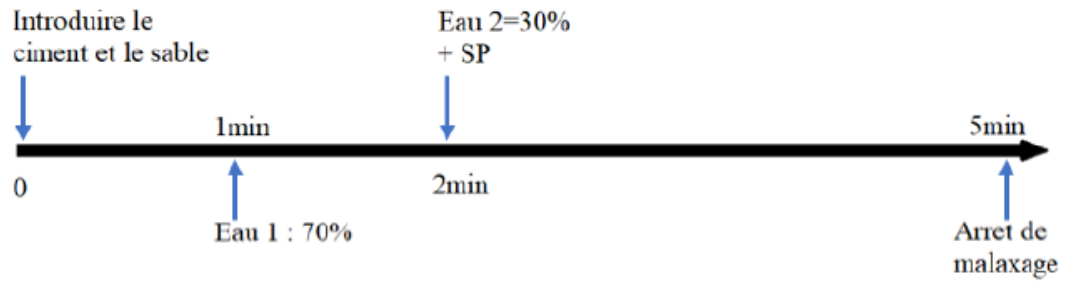
Pour la formulation de MAP, nous avons utilisé la méthode japonaise. Le but de cette formule est d'optimiser la quantité de superplastifiant pour obtenir le meilleur mélange de mortier autoplaçant homogène et stable « sans ségrégation, sans ressuage ».

Nous avons déterminé les quantités nécessaires des constituants à l'aide d'une feuille de calcul Excel, nous avons utilisé la méthode japonaise ou le rapport Eau/ liant (E/L) est fixé à 0,38 et S/M=0,5.

Ce dosage sera vérifié en modifiant le pourcentage de superplastifiant sur la base du test de mortier frais pour obtenir un étalement qui varie entre 270 mm et 320 mm, et un temps d'écoulement en entonnoir en V de 2 à 10 secondes.



Le procédé de la formulation est expliqué dans la figure 2.6 ci-dessous :



**Figure 2.6:** Séquence de malaxage de mortier.



**Figure 2.7:** Malaxeur.

## 2.4. Substitution de sable de marbre

Pour différentes préparations de mortiers autoplaçants, Nous avons remplacé le sable naturel par 10 %, 15 %, 30 % et 50 % de sable de déchets de marbre pour connaître leur effet sur le MAP.

## 2.5. Essais à l'état frais

### 2.5.1. Essai d'étalement au Mini-Cône :

#### ▪ **Appareillage :**

L'essai d'étalement au mini-cône nécessite les éléments suivants : plaque d'étalement, mini-cône, règle, seau, truelle, chiffon humide, main écope et niveau.

L'essai consiste à remplir un mini-cône en MAP, et à le soulever. Une fois que le cône est enlevé, 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. Un contrôle visuel de la galette du mortier peut s'avérer intéressant



**Figure 2.8:** essai d'étalement pour mortier.

### 2.5.2. Essai à l'entonnoir en V :

- **Appareillage :**

L'essai à l'entonnoir en V nécessite les éléments suivants : entonnoir en forme de V, règle, truelle, chiffon humide, chronomètre et niveau.

- **Mode opératoire :**

La méthode consiste à remplir un mini-entonnoir en V en MAP tout en maintenant le clapet qui se situe à la base du mini-entonnoir fermé. Le clapet est ensuite ouvert permettant au MAP de s'écouler au travers l'orifice. Le temps d'écoulement  $T_v$  est le temps qui sépare l'instant de l'ouverture du clapet et l'instant où la lumière du jour devient visible du haut du mini-entonnoir

Le temps d'écoulement du mortier autoplaçant doit être compris entre 2 et 10 secondes.



**Figure 2.9:** Dispositif de l'essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).

### 2.5.3. L'essai de l'air occlus :

L'essai consiste à mesurer le pourcentage d'air dans le mortier, pour lequel nous suivons les étapes suivantes :

- Remplir le récipient à raz puis nettoyer soigneusement les rebords du récipient.
- Positionner et fixer le couvercle, fermer la soupape principale et ouvrir le robinet A et le robinet B.
- Injecter l'eau dans le robinet A jusqu'à ce qu'il ressort du robinet B, fermer les deux robinets et pomper l'air.
- Ajuster à l'aide du bouton correcteur, lancer l'analyse grâce au bouton de piston et lire la valeur de la teneur en air en %.



**Figure 2.10 :** Essai de l'air occlus.

### 2.6. Essais à l'état durci :

Nous avons fait des échantillons d'essai dans des moules prismatiques de 40\*40\*160mm. Après la coulée, le moule est stocké dans un endroit humide pendant 24 heures jusqu'à ce qu'il soit démoulé. L'échantillon doit être démoulé et conditionné dans une cuve remplie d'eau saturée de chaux à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  pour assurer un durcissement standardisé avant la date de l'essai.



**Figure 2.11:** Moule prismatique à mortiers



**Figure 2.12:** Des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .

### 2.6.1. La résistance à la compression :

Pour toutes les caractérisations physico-mécaniques, des spécimens prismatiques de (4x4x16 cm<sup>3</sup>) mûries à l'eau. Les résultats obtenus sont la moyenne des valeurs de trois éprouvettes. On effectue la lecture de la charge d'écrasement P en KN et la résistance à la compression Rc en MPa sur l'écran de l'appareil.

La contrainte est la moyenne de six mesures. Les essais sont effectués conformément à la Norme. [76]

La résistance en compression (Rc) est définie comme le rapport entre la charge de rupture de l'éprouvette et la surface de sa section transversale, selon la formule suivante :

$$R_c = \frac{F}{A}$$

Où :

Rc : résistance à la compression, en MPa (équivalent à N/mm<sup>2</sup>) ;

F : charge de rupture, en N ;

A : surface de la section transversale de l'éprouvette, en mm<sup>2</sup>

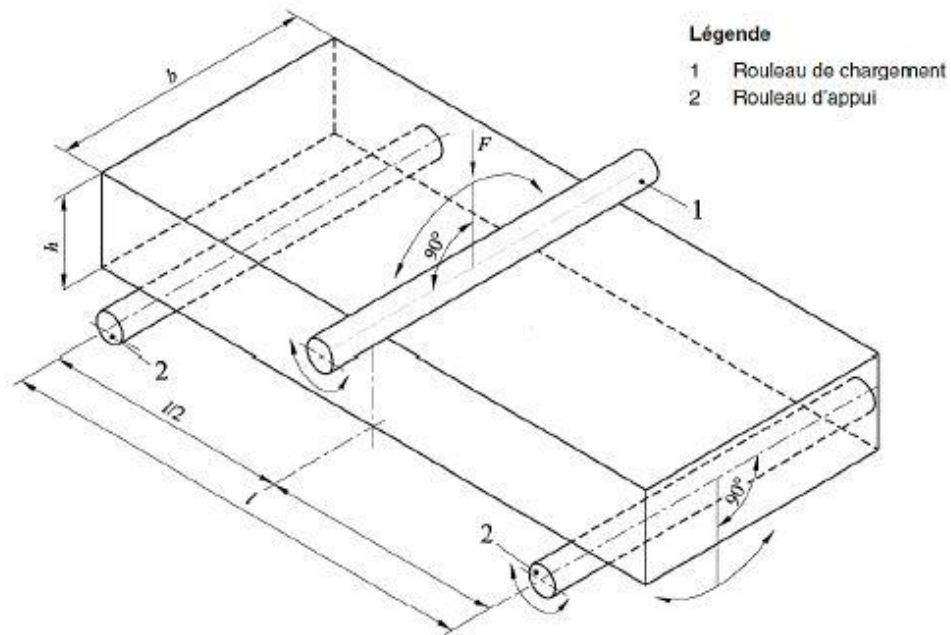


**Figure 2.13:** Essai de compression pour MAP.

### 2.6.2. La résistance à la flexion :

La mesure de la résistance à la traction par flexion (Rt) est effectuée sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm<sup>3</sup>, Les essais sont effectués selon la norme. [76]

Les résultats obtenus sont la moyenne des valeurs de trois éprouvettes.



**Figure 2.14 :** Schéma du dispositif expérimental.

La résistance à la flexion (Rtf) est définie selon la formule suivante :

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

Où

Rtf : résistance à la flexion, en MPa (équivalent à N/mm<sup>2</sup>) ;

F : force de rupture, en N ;

l : distance entre les rouleaux d'appui, en mm ;

b : largeur de l'éprouvette au droit du plan de rupture, en mm ;

h : épaisseur de l'éprouvette au droit du plan de rupture, en mm



**Figure 2.15 :** Essai de flexion pour MAP.

### 2.6.3. Absorption capillaire

Le test est réalisé sur des échantillons (4x4x16) selon la norme EN 13057. Le résultat est la moyenne des valeurs mesurées des deux échantillons testés pour chaque composition. A la fin du durcissement (28 jours), l'éprouvette est séchée à poids constant dans une étuve ventilée à  $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Après séchage, enduire la périphérie (face inférieure) de l'éprouvette de peinture époxy, la poser sur son socle, et placer l'éprouvette dans une cuve d'eau à niveau d'eau constant (environ 2 à 3 mm) avec une cale inférieure à 1 cm (En bas en haut) pendant toute la période d'essai. Les éprouvettes sont soumises à une absorption d'eau unidirectionnelle (Figure 2.16) à intervalle de temps précisé par la procédure utilisée (l'absorption est mesurée après 1min, 2min, 5min,



10min, 20min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 1j, 2j, 3j, 5j, 6j, 7j et 8 jours), on relève le poids de chaque éprouvette après l'avoir essuyée au moyen d'un chiffon humide. L'absorption capillaire est exprimée en  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par la formule suivante [77] :

$$C = \frac{Mx - M0}{A * \rho}$$

Avec :

Mx : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g)

M0= masse initial de l'éprouvette (g)

A : section de l'éprouvette ( $\text{cm}^2$ )

$\rho$  : masse volumique de l'eau= $1\text{g/cm}^3$

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

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

A : surface du spécimen en contact avec l'eau

Q : le volume d'eau absorbé en  $\text{cm}^3$

t : temps écoulé en (s)

S : coefficient de sportivité du spécimen en ( $\text{cm/s}^{1/2}$ )



**Figure 2.16:** Absorption d'eau par succion capillaire.

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.

#### 2.6.4. Porosité

Par définition, l'essai de la porosité accessible à l'eau est le pourcentage du volume de vide  $V_v$  par rapport au volume total  $V_t$ .

La porosité accessible à l'eau est un paramètre clé pour évaluer la durabilité. Il est déterminé par le taux d'absorption d'eau par immersion, qui est la différence entre la masse de l'échantillon saturé en eau et son état sec. Dans cet essai, deux éprouvettes (4x4x16) cm sont séchées dans une étuve à 55°C jusqu'à masse constante (changement de 0,1% après 24 heures). Par conséquent, la masse sèche "Msec" de l'échantillon est déterminée.

L'échantillon est placé dans une enceinte fermée (dessiccateur), sous une pression constante pendant 4h. Ensuite l'eau est introduite progressivement jusqu'à remplissage des éprouvettes, on déconnecte la pompe. L'échantillon est maintenu dans la saturation pendant  $18h \pm 2h$

Les éprouvettes sont sorties du récipient et pesées dans l'air avec une balance pour déterminer la masse de l'éprouvette saturé « Meau »

La porosité accessible à l'eau  $\varepsilon$ , est exprimée en terme relatif (pourcentage), déterminée par l'équation suivante [78] :

$$\varepsilon \% = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100$$

Avec :

Meau : la masse du spécimen immergé dans l'eau

Mair : la masse du spécimen pesé a l'air

Msec : la masse du spécimen à sec



**Figure 2.17** : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.

### 2.6.5. Attaques sulfatiques( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

Le principe de base des essais consiste à immerger des éprouvettes de forme  $(4*4*16)$   $\text{cm}^3$  en mortier dans une solution sulfatique.

Il faut savoir que l'eau a un PH neutre (7), et que le mortier est basique, les réactions chimiques qui vont en découler, font que le PH de l'eau augmente, l'incorporation de la poudre de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans l'eau permet de garder un PH inférieur à 9. Donc, des mesures régulières du PH de la solution doit être effectuée et dès que les mesures du PH donne des valeurs entre 8.5 et 8.8, soit la solution doit être changée complètement ou bien le PH est réajusté par un apport de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de sodium. Selon la norme ASTM C1012-95a, nous devons incorporer 50g de poudre de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans 1L d'eau. La solution doit être changée chaque mois .[79]



**Figure 2.18 :** Immersion totale des échantillons de l'eau dosée à 5 % de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

## 2.7. Conclusion

Dans notre travail, on utilise des matériaux locaux disponibles dans le marché Algérien pour la préparation des mortiers autoplaçants. Notre objectif est la production d'un MAP économique et écologique. Afin d'atteindre ce but, on a procédé à la substitution du sable par la poudre de marbre et on a étudié effets de la combinaison de l'ajout de déchet de fibre de verre et déchet de marbre sur MAP à L'état frais.

Pour formuler le MAP, des essais préliminaires ont été effectués pour déterminer la teneur en sable et le dosage en superplastifiant, l'effet de la poudre de marbre sur la rhéologie des MAP a été étudié à travers l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V. Des essais sont menés ensuite pour étudier l'influence de la poudre de marbre sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité de MAP.

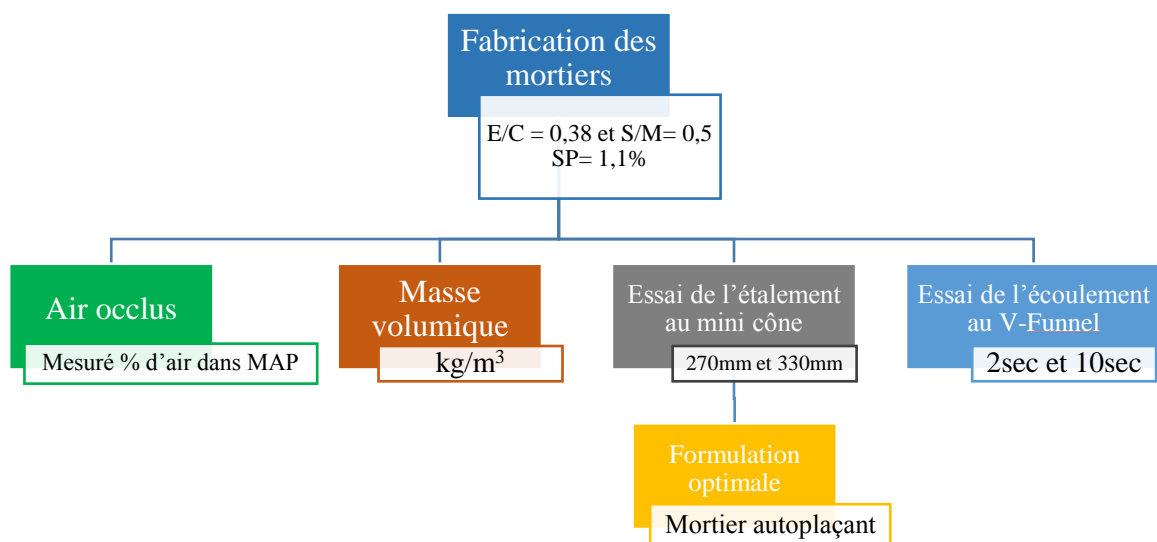


Figure 2.19 : Les essais réalisés à l'état frais.

## CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus dans le cadre de nos essais expérimentaux de mortiers autoplacants (MAP) à l'état frais et durci, et à l'étude de l'effet du remplacement du sable naturel par le déchet de marbre sur le MAP à l'état frais et durci, et l'étude de l'effet de substitution des fibres de verres sur le MAP à l'état frais.

### 3.2. Optimisation du dosage en superplastifiant

Les superplastifiants jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés rhéologiques du mortier dans la réduction de la teneur en eau.

Nous avons commencé notre travail en optimisant la quantité de superplastifiant (sur le mortier de référence), en fixant les rapports S/M=0.5, et E/L=0.38 et en variant le dosage du superplastifiant Sp de 1% à 1.2%, afin d'obtenir un MAP optimal.

**Tableau 3.1** : Variation du dosage en superplastifiant.

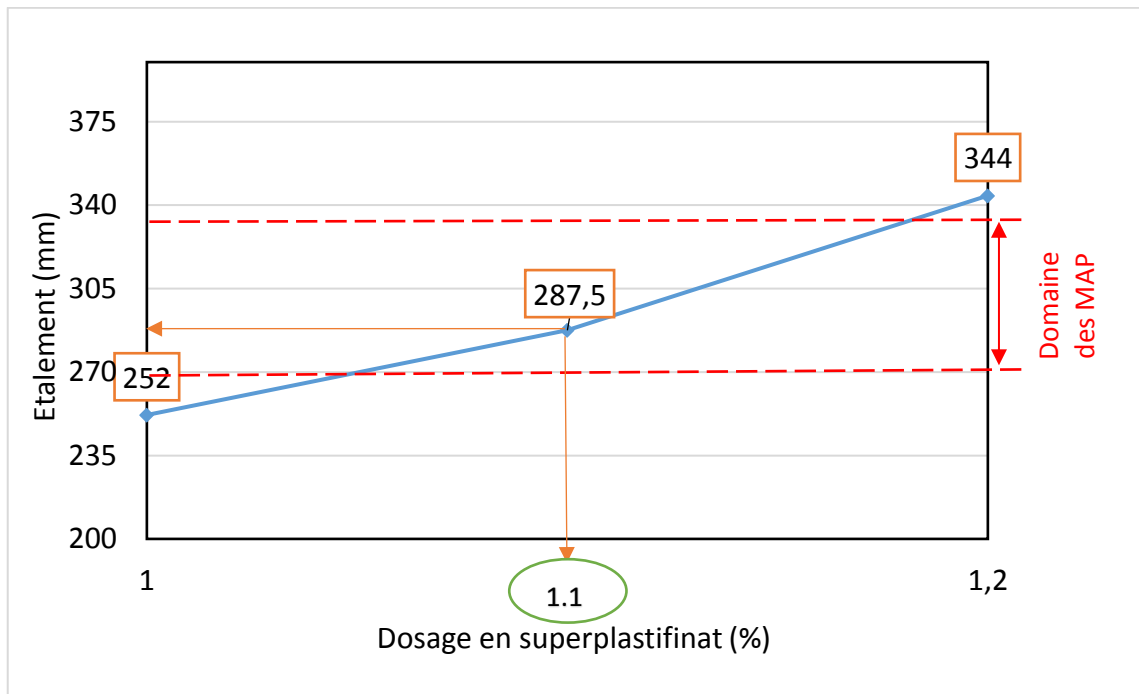
Ciment (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)	Sp (%)	Sp (kg)
1.070	2.010	0.429	1	0.010
		0.429	1.1	0.011
		0.429	1.2	0.012

#### 3.2.1. Essai au mini cône :

La figure 3.1 montre les résultats du test d'étalement réalisé sur MAP, en modifiant la quantité de superplastifiant. D'après les résultats, nous avons remarqué qu'avec l'augmentation de la quantité du superplastifiant, l'étalement de la galette augmente car le superplastifiant disperse les particules de ciment et améliore la fluidité du mélange.

D'après les résultats obtenus le dosage de 1.1% en SP donne un bon étalement avec une galette homogène et un diamètre de 287.5mm 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.



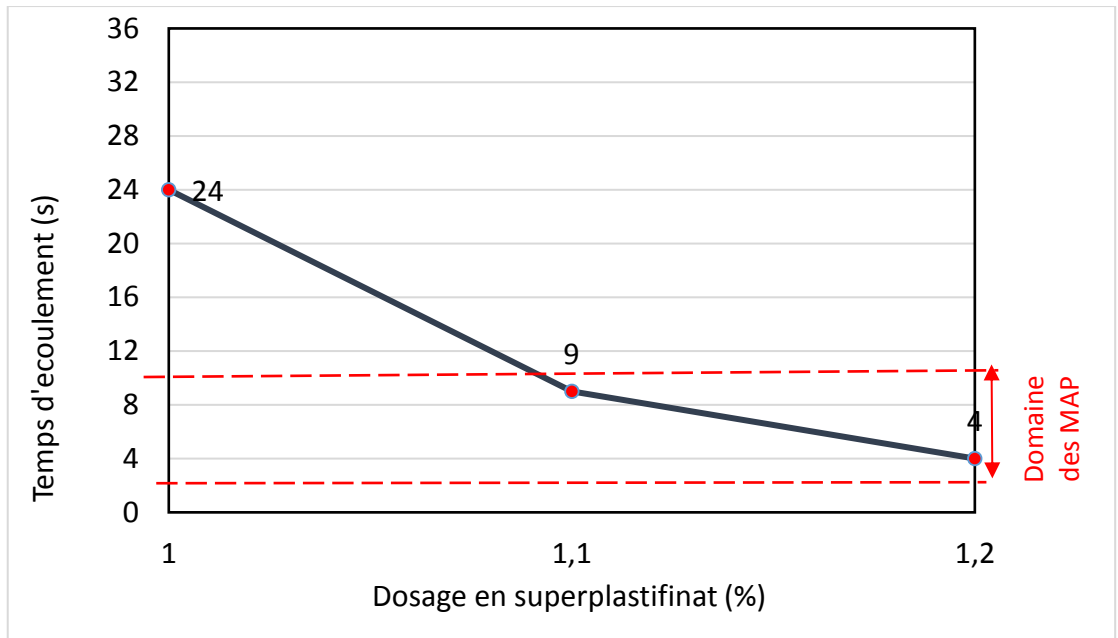
**Figure 3.1:** Valeurs d'étalement des MAP en fonction du dosage en superplastifiant.

### 3.2.2. Essai de V – funnel

La figure 3.2 montre le temps d'écoulement du mortier en fonction de la quantité du superplastifiant. Selon les résultats obtenus nous pouvons dire que les dosages de 1%, 1.1% et 1.2% donnent un bon temps d'écoulement qui est compris entre 2 et 10s.

Nous remarquons aussi qu'il y'a une diminution dans le temps d'écoulement jusqu'à 4s pour 1.2% de dosage de SP.





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

En final, et en vue des résultats obtenus par les 2 essais, nous optons pour un dosage de superplastifiant SP=1.1%.

### 3.3. Effet de substitution de déchet de sable de marbre sur l'ouvrabilité des

#### MAP à l'état frais :

Après avoir caractérisé le mortier autoplaçant et déterminé le dosage optimal en superplastifiant qui est de 1.1%, nous passons à l'étude de l'influence des déchets de sable de marbre sur le comportement des MAP a l'état frais et sur sa stabilité vis-à-vis de ressuage et de ségrégation.

Notre formulation adoptée est caractérisée par les paramètres suivants :  $S/M = 0.5$ ,  $SP = 1.1\%$  et  $E/L = 0.38$  et en substituant le sable naturel par le sable de déchet de marbre avec les pourcentages 0%, 15%, 30% et 50%.

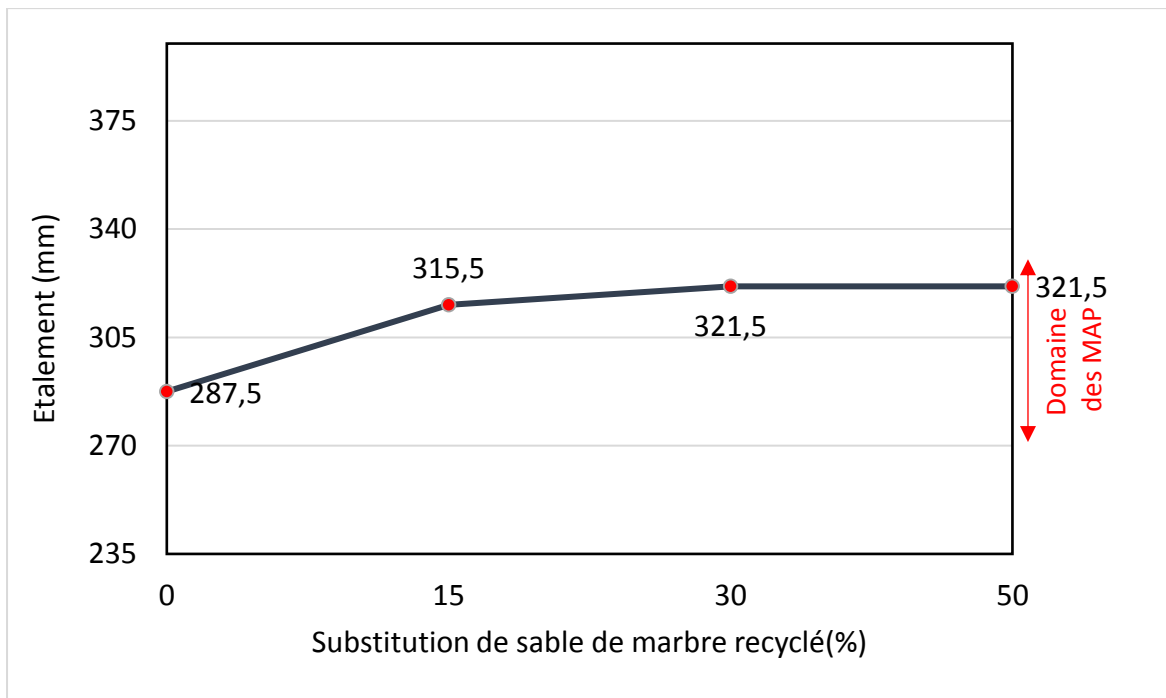
Le tableau 3.2 illustre les quantités de substitution de sable de déchet de marbre.

**Tableau 3.2 :** Composition des mortiers obtenus en fonction du rapport optimale SP/L.

Constituants	MOR 0% marbre	MOR 15% marbre	MOR 30% marbre	MOR 50% marbre
Ciment (kg)	1.070			
Déchet de marbre (kg)	0	0.302	0.603	1.005
Sable (kg)	2.01	1.708	1.408	1.005
Eau (kg)	0,429	0,427	0,425	0,422
SP 1.1%(kg)	0.012			

### 3.3.1. Etalement au mini cône

La figure 3.3 montre l'étalement de différents mortiers en fonction du taux de remplacement du sable par les déchets de sable de marbre.



**Figure 3.3 :** Etalement en fonction de teneurs en déchet de marbre.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les diamètres d'étalements des galettes augmentent avec l'augmentation du taux de substitution de déchet de marbre.

Monica et al, ont trouvé que l'utilisation de marbre à 50% de substitution de sable naturel augmentait l'ouvrabilité du mortier [80]. De même pour Boukhelkhal et al ont qui ont substitué le ciment par les déchets de poudre de marbre dans le BAP [82].

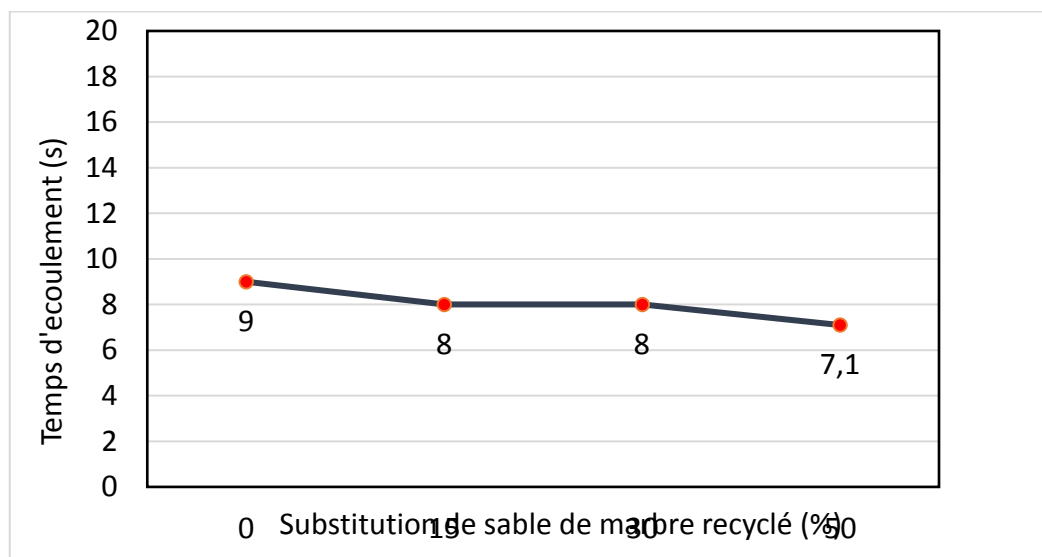
Par contre Binici et al ont trouvé que l'utilisation de sable de déchet de marbre à 15% diminuait l'ouvrabilité [81].

Cette amélioration est expliquée par les auteurs par la concentration du calcaire dans le marbre [80].

Kore et al ont aussi montré que l'ouvrabilité des bétons augmentait avec la substitution du déchet de marbre en tant que gros agrégat. Ce fait est attribué à une faible absorption d'eau et la surface plane et lisse d'agrégat de marbre [83].

### 3.3.2. Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel

La figure 3.4 montre l'effet de la teneur en déchet de marbre sur le temps d'écoulement à l'entonnoir en V-funnel. Nous remarquons que les temps d'écoulement du mortier de référence et les mortiers avec 15, 30 et 50% de substitution de sable naturel par de sable de déchet de marbre sont comparable (autour de 10s).



**Figure 3.4:** Le temps d'écoulement (V-funnel) en fonction de teneurs en DM.

Chibani et al 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 [84].

Boukhelkhal et al ont aussi trouvé que la substitution du ciment par la poudre de déchet de marbre faisait diminuer le temps d'écoulement [82]

### 3.4. Effet de l'ajout des fibres de verre sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais :

Après avoir caractérisé le mortier autoplaçant et déterminé le dosage optimal en superplastifiant qui est de 1.1%, nous passons à l'étude de l'influence des déchets des fibres de verres sur le comportement des MAP a l'état frais

Notre formulation adoptée est caractérisée par les paramètres suivants : S/M =0.5, SP= 1.1% et E/L=0.38 et en ajoutent les fibres de verres avec les quantités 0kg/m<sup>3</sup> ; 0.25 kg/m<sup>3</sup> ; 0.5 kg/m<sup>3</sup>

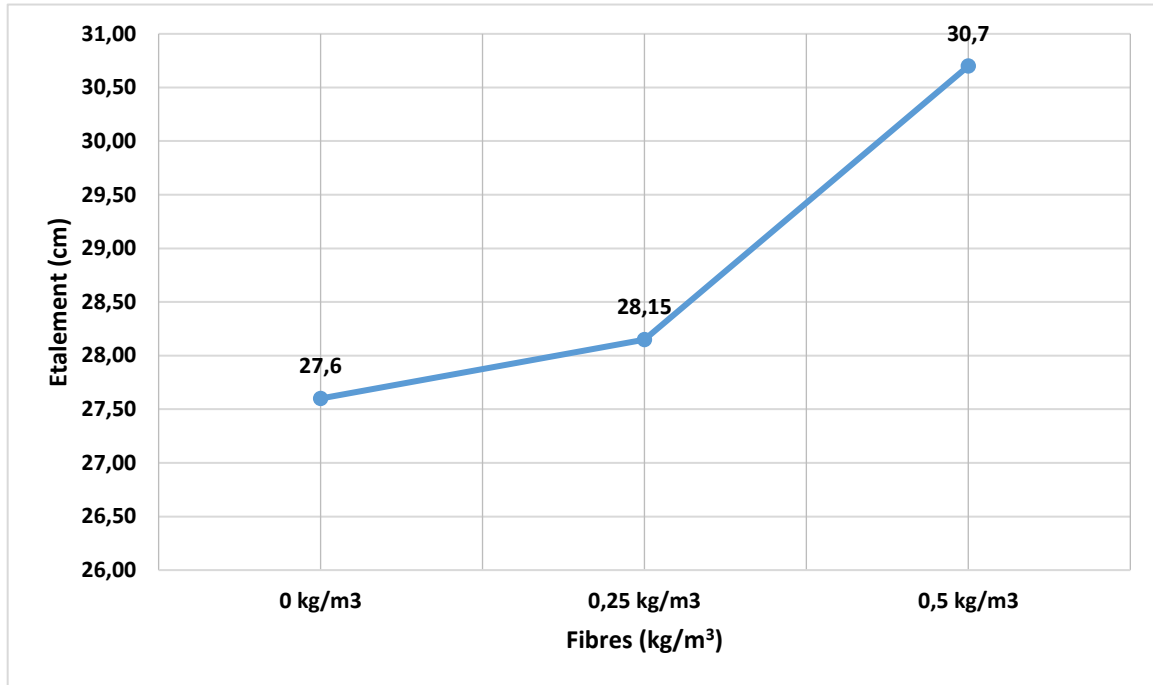
Le tableau 3.3 illustre les quantités de fibres de verre.

**Tableau 3.3 :** Composition des mortiers obtenus en fonction du rapport optimale SP/L.

Fibres (kg/m <sup>3</sup> )	0	0.25	0.5
Ciment (kg)	1.070	1.070	1.070
Sable (kg)	2.01	2.01	2.01
Eau(kg)	0,429	0,429	0,429
SP (kg)	0.012	0.012	0.012

### 3.4.1. Étalement au mini cône :

La figure 3.5 montre l'étalement de différents mortiers en fonction de fibre de verre.

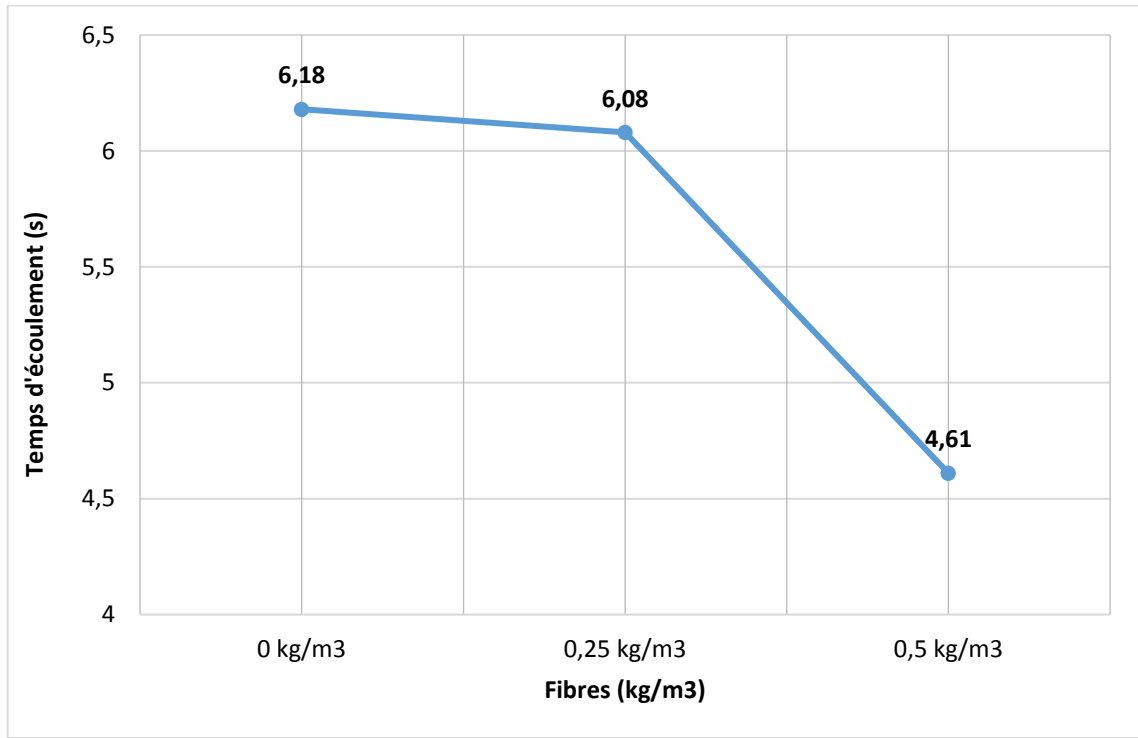


**Figure 3.5 :** Étalement en fonction des déchets de fibre de verres.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les diamètres d'étalement des galettes augmentent avec l'augmentation de la quantité de fibres de verres.

### 3.4.2. Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel :

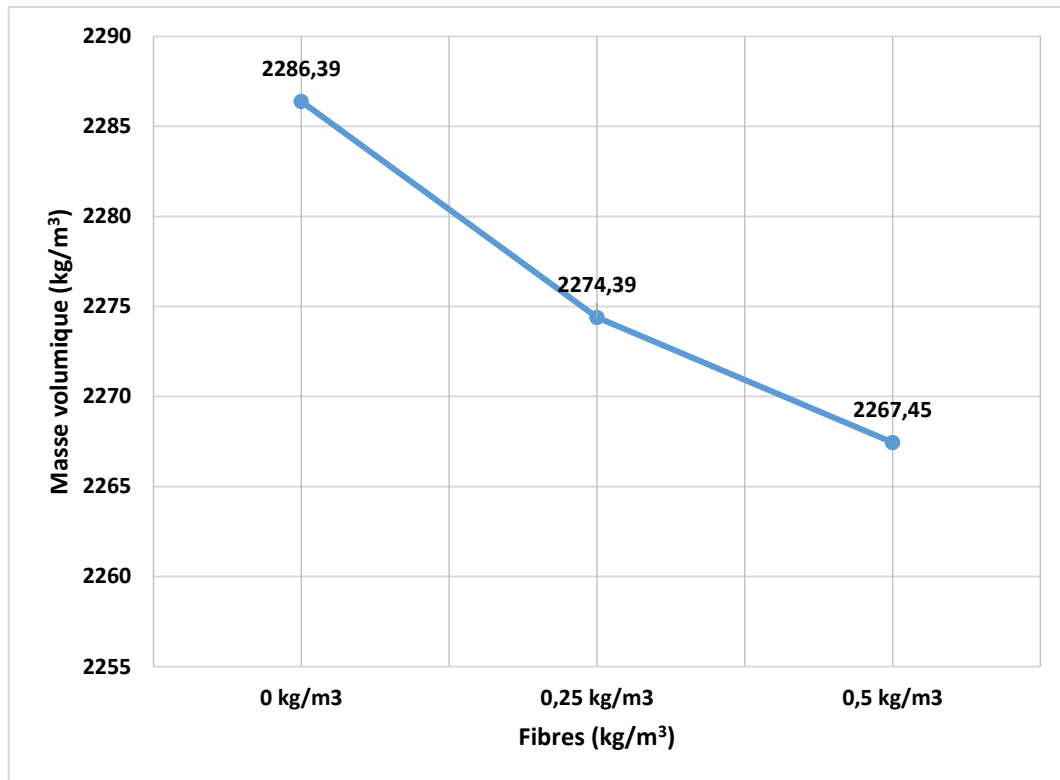
La figure 3.6 montre l'effet de l'ajoute de fibre de verres sur le temps d'écoulement à l'entonnoir en V-funnel. Nous remarquons en générale que le temps d'écoulement diminuer tant que la quantité des fibres augmente.



**Figure 3.6:** Le temps d'écoulement en fonction des fibres de verre.

### 3.4.3. L'effet de l'ajout de fibre sur la masse volumique du MAP :

La figure 3.7 illustre les résultats de la masse volumique en fonction de quantités de fibres de verre.

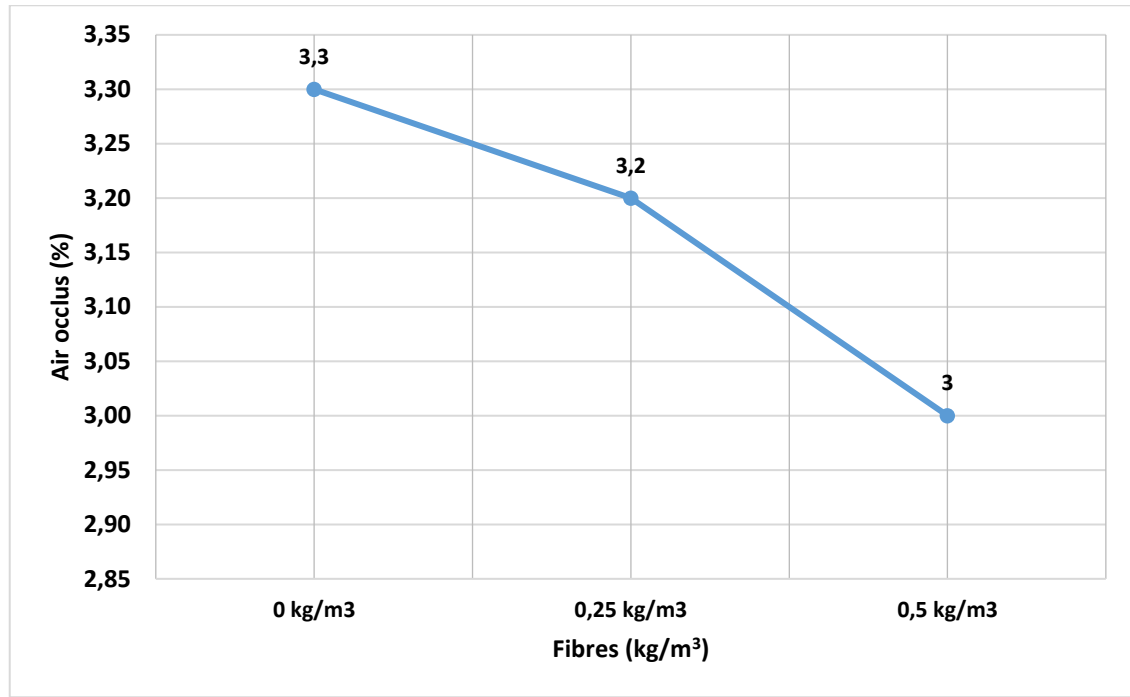


**Figure 3.7 :** Masse volumique en fonction des fibres de verre.

On remarque dans la figure 3.7 une diminution de masse volumique avec l'augmentation de quantité des fibres.

### 3.4.4. L'essai de l'air occlus :

La figure 3.8 montre les résultats :



**Figure 3.8 :** Air occlus en fonction des fibres de verre.

De la figure 3.8 on constate une diminution du pourcentage de l'air occlus avec l'augmentation de la quantité de fibre de verre.

### 3.5. L'Effet de combinaison de fibres de verre et déchets de marbre sur MAP :

Après avoir caractérisé le mortier autoplaçant et déterminé le dosage optimal en superplastifiant qui est de 1.1%, nous passons à l'étude de l'influence des déchets de fibres de verre et déchets de marbre sur le comportement des MAP a l'état frais.

Notre formulation adoptée est caractérisée par les paramètres suivants :  $S/M = 0.5$ ,  $SP = 1.1\%$  et  $E/L = 0.38$  et en ajoutent les fibres de verre avec les quantités de  $0\text{kg/m}^3$  ;  $0.25\text{ kg/m}^3$  ;  $0.5\text{ kg/m}^3$  et en substituant le sable naturel par le sable de déchets de marbre avec les pourcentages 0%, 15%, 30%.

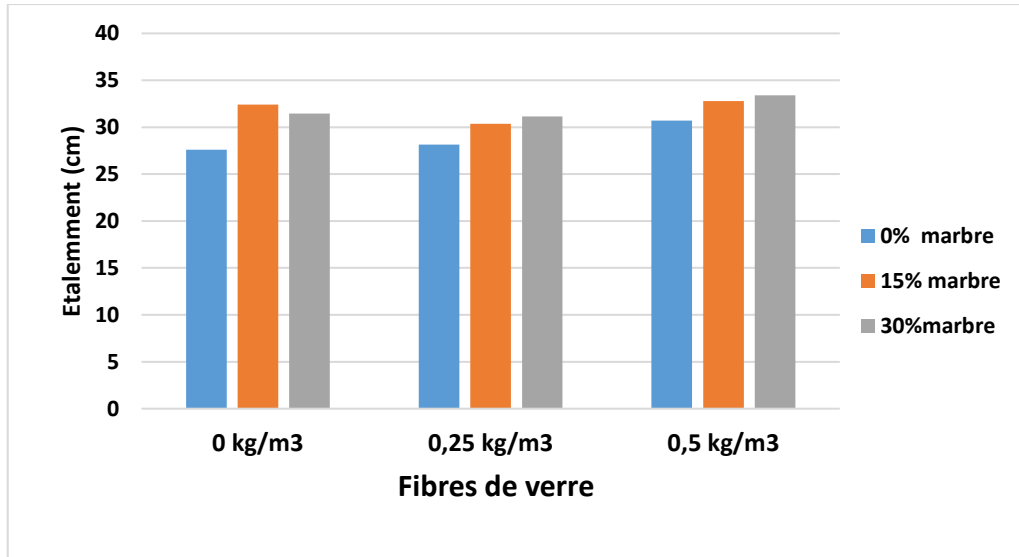


**Tableau 3.4 :** Composition des mortiers obtenus en fonction du rapport optimale SP/L.

Constituants	MOR 0% marbre	MOR 15% marbre	MOR 30% marbre
Quantité de fibres de verre (kg/m <sup>3</sup> )	(0 ; 0.25 ; 0.5)		
Ciment (kg)	1.070		
Déchet de marbre (kg)	0	0.302	0.603
Sable (kg)	2.01	1.708	1.408
Eau (kg)	0,429	0,427	0,425
SP 1.1%(kg)	0.012		

### 3.5.1. Étalement au mini cône :

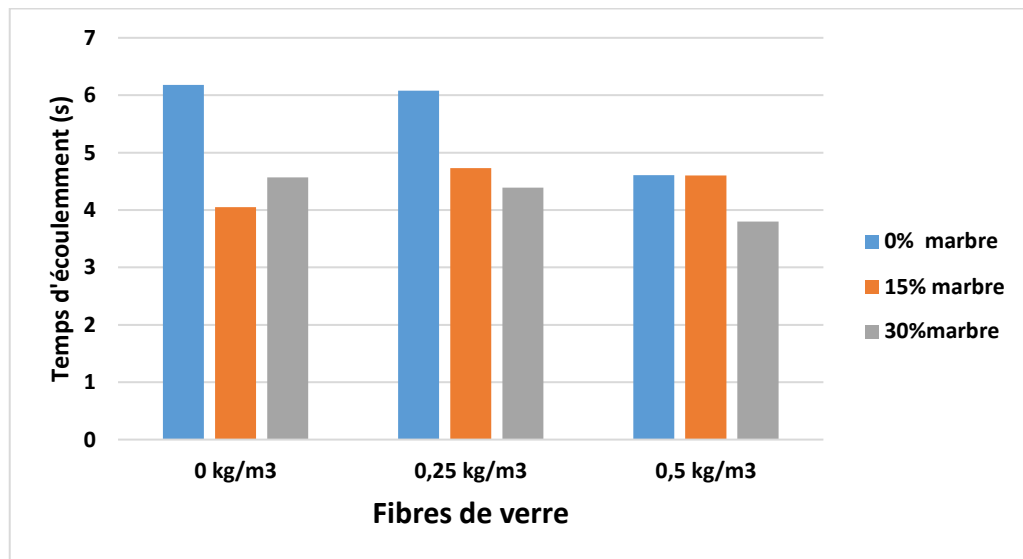
A travers les résultats obtenus dans figure 3.9 nous remarquons que les diamètres d'étalement des galettes augmentent avec l'augmentation du taux de substitution de déchet de marbre et l'augmentation de quantité des déchets de fibres de verre.



**Figure 3.9 :** Etalement en fonction des déchets fibres et marbre.

### 3.5.2. Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel :

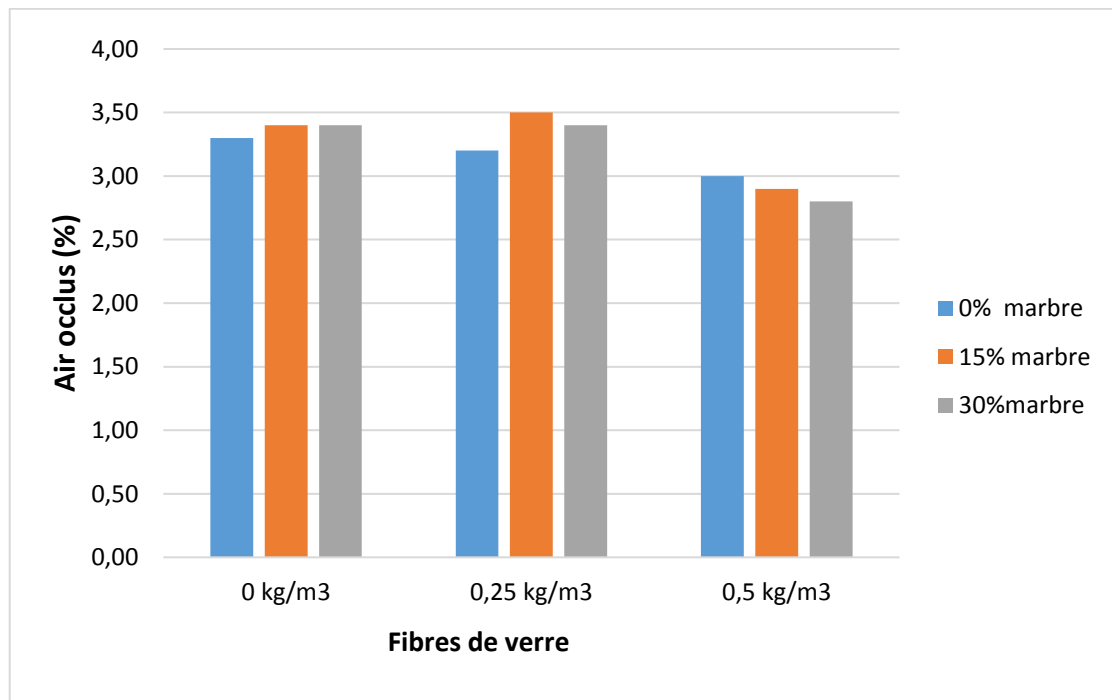
La figure 3.10 montre l'effet de la teneur en déchet de marbre et déchet de fibre de verre sur le temps d'écoulement à l'entonnoir en V-funnel. On remarque une diminution de temps d'écoulement avec l'augmentation de fibre de verre et déchets de marbre.



**Figure 3.10:** Temps d'écoulement en fonction des fibres et marbre.

### 3.5.3. Essai de l'air occlus :

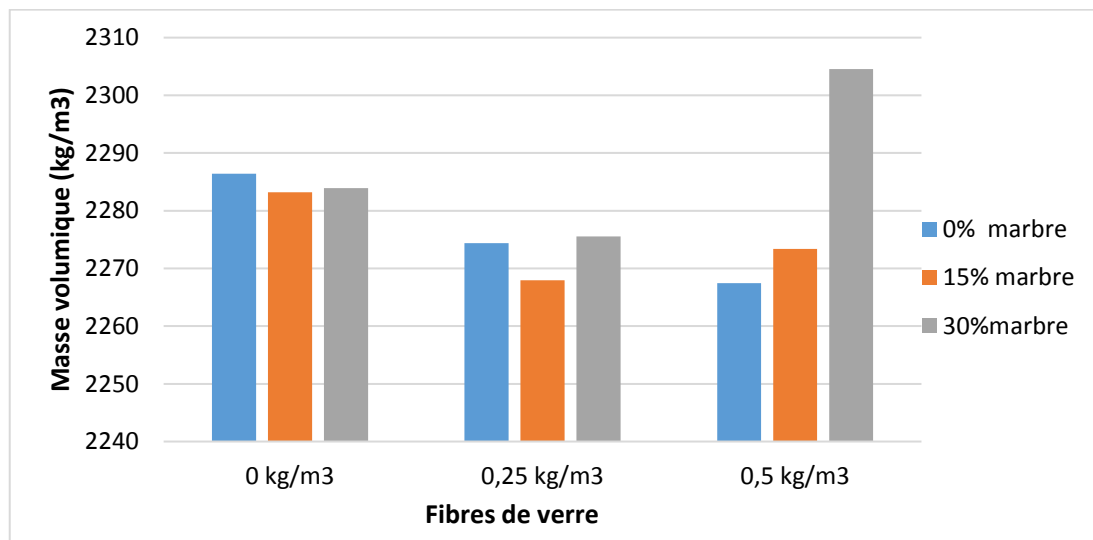
La figure 3.11 présente le taux de l'air occlus en fonction de teneurs en DM et déchets de fibres de verre. Pour la quantité de  $0\text{kg/m}^3$  de fibres de verre on remarque que le pourcentage d'air occlus est presque stable (entre 3.3 et 3.4) avec une petite augmentation de 0.1 pour la substitution de 0%DM et 15%DM et pour la quantité  $0.25\text{ kg/m}^3$  on constate une augmentation de 0.3% pour la substitution 0% et 15% de DM et une diminution de 0.1% pour substitution 15% et 30% de DM. Et pour  $0.5\text{ kg/m}^3$ , on constate une diminution de 0.1 pour la substitution 0% et 30% de DM.



**Figure 3.11:** Air occlus en fonction des fibres de verres et marbre.

#### 3.5.4. Mesure de la masse volumique :

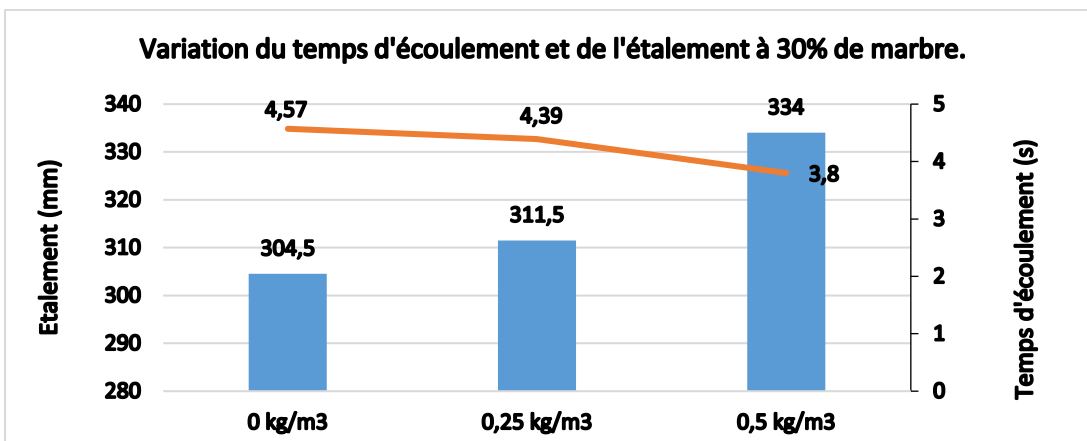
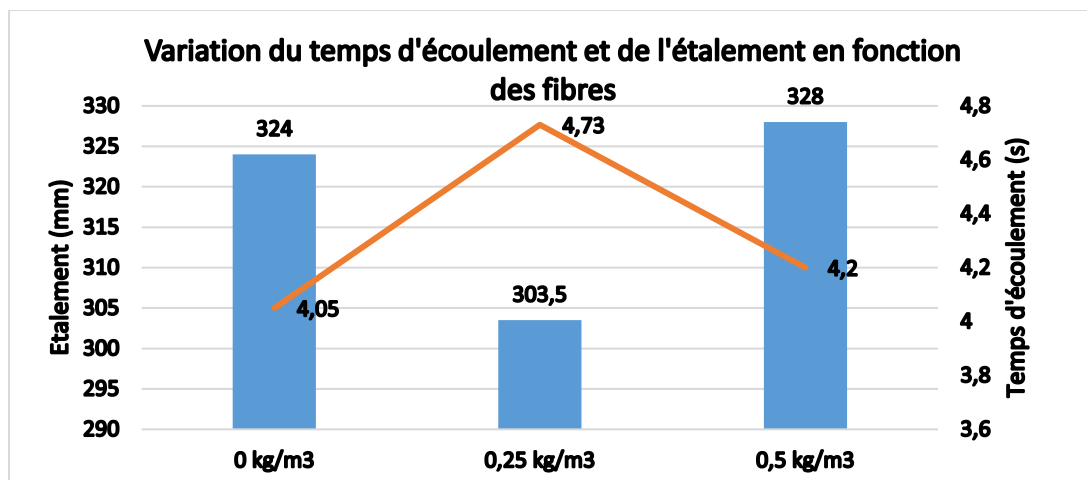
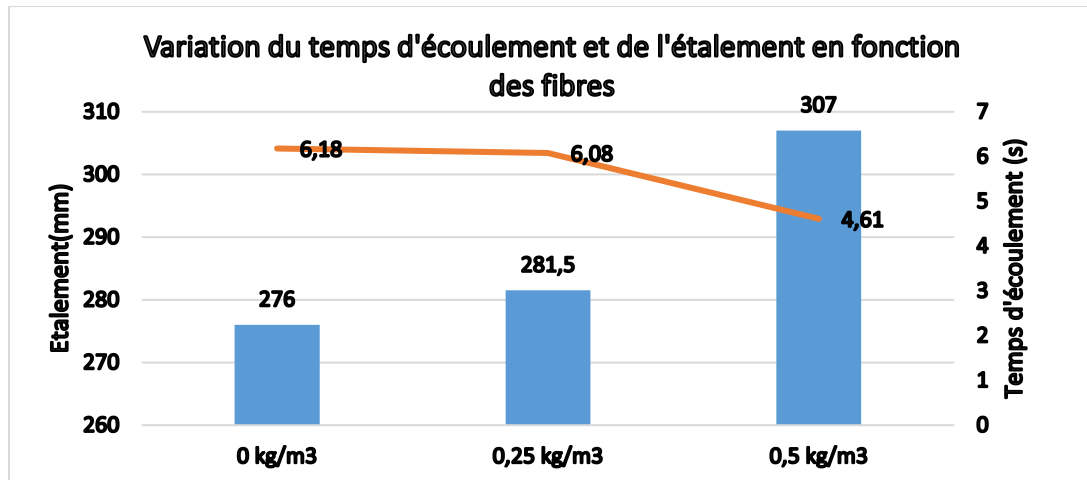
La figure 3.12 Présente la masse volumique en fonction de déchets de marbre et fibres de verre. On remarque que les quantités de 0 kg/m<sup>3</sup> et 0.25 kg/m<sup>3</sup> de déchets de fibres de verre : il y a une diminution de la masse volumique pour la substitution de 0% et 15% de DM et une augmentation pour la substitution de 15% et 30% de DM, et pour la quantité de 0.5 kg/m<sup>3</sup> de la masse volumique, elle augmente avec l'augmentation de taux de DM.



**Figure 3.12:** La masse volumique en fonction des fibres de verre et déchets de marbre.

#### 3.6. La variation du temps d'écoulement et de l'étalement en fonction de fibres de verre pour chaque pourcentage de DM :

La figure 3.13 Présente la variation du temps d'écoulement et d'étalement en fonction de la variation des fibres et du marbre.



**Figure 3.13:** Comparaison des résultats de variation de temps d'écoulement et l'étalement en fonction de fibres de verre pour chaque pourcentage de DM.

A travers les résultats obtenus nous remarquons que les diamètres d'étalement augmentent avec l'augmentation de quantité des fibres de verres et le taux de substitution de déchet de marbre. Le temps d'écoulement diminue au fur et à mesure que l'étalement augmente.

3.7. La variation de la masse volumique et de l'air occlus en fonction du taux de marbre pour chaque quantité de fibres de verre :

La figure 3.14 Présente la variation de la masse volumique et de l'air occlus en fonction du taux de marbre pour trois quantités de fibres de verre 0 kg/m<sup>3</sup>, 0,25kg/m<sup>3</sup> et 0.5kg/m<sup>3</sup>.

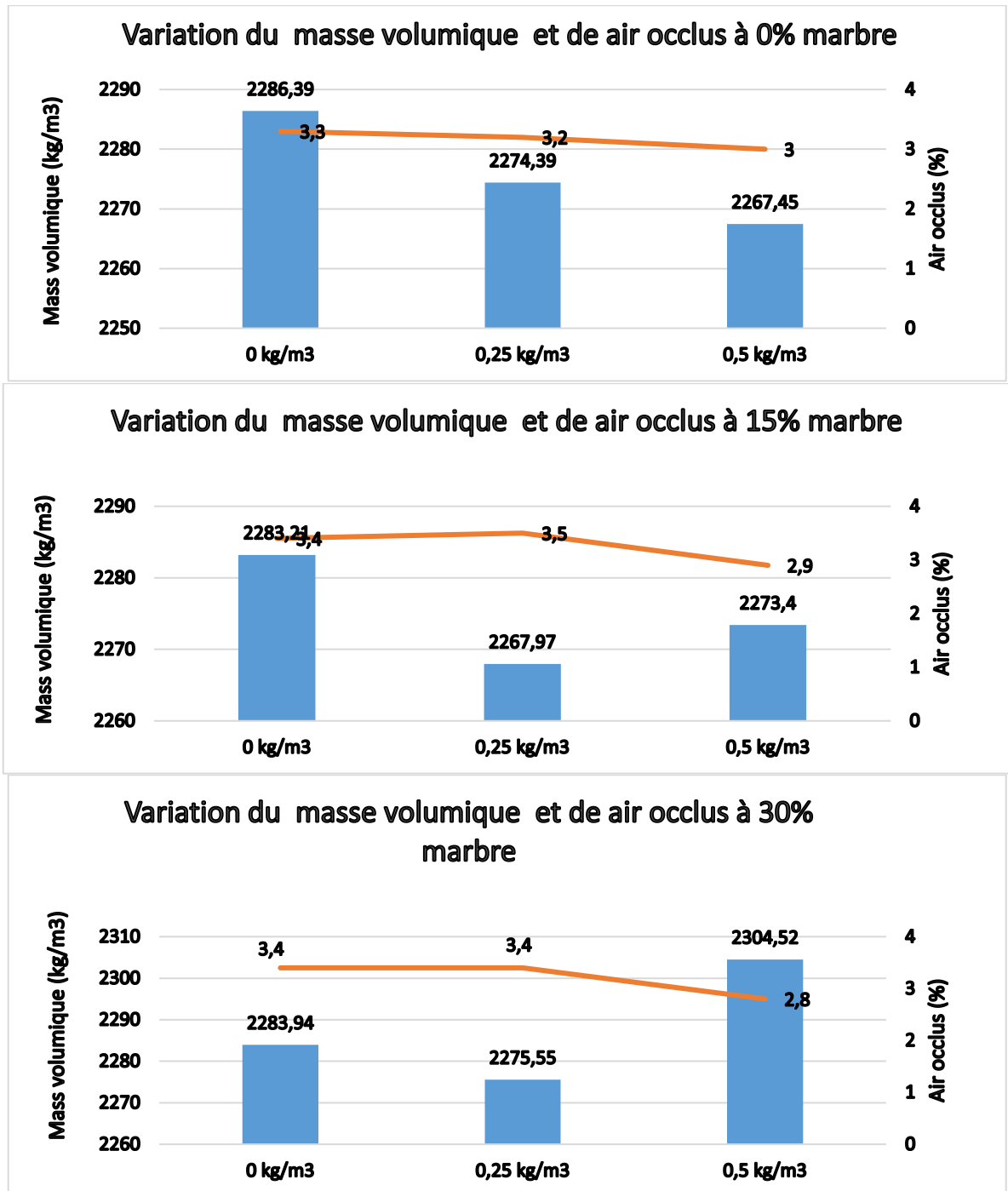


Figure 3.14: Comparaison des résultats de variation de la masse volumique et l'air occlus en fonction de Taux de marbre pour chaque quantité de fibres de verre.

On remarque que plus la masse volumique augmente plus l'air occlus diminue. À 0% de marbre, la masse volumique diminue. À 15 % de marbre, la masse volumique était élevée et lors de l'ajout de fibre, elle diminuait. À 30% de marbre, la masse volumique augmente et était la plus élevée. La masse volumique diminue à mesure que le % de marbre augmente, et lorsque on ajoute les fibres de verres la masse volumique augmente

3.8. Effet de substitution de déchet de sable de marbre sur le MAP à l'état durci :

3.8.1. La résistance à la compression et la flexion après l'attaque sulfatique de mortier :

Les résultats de la résistance à la flexion et à la compression de mortiers à base de déchet de marbre sont présentés respectivement dans les tableaux 3.5 et 3.6.

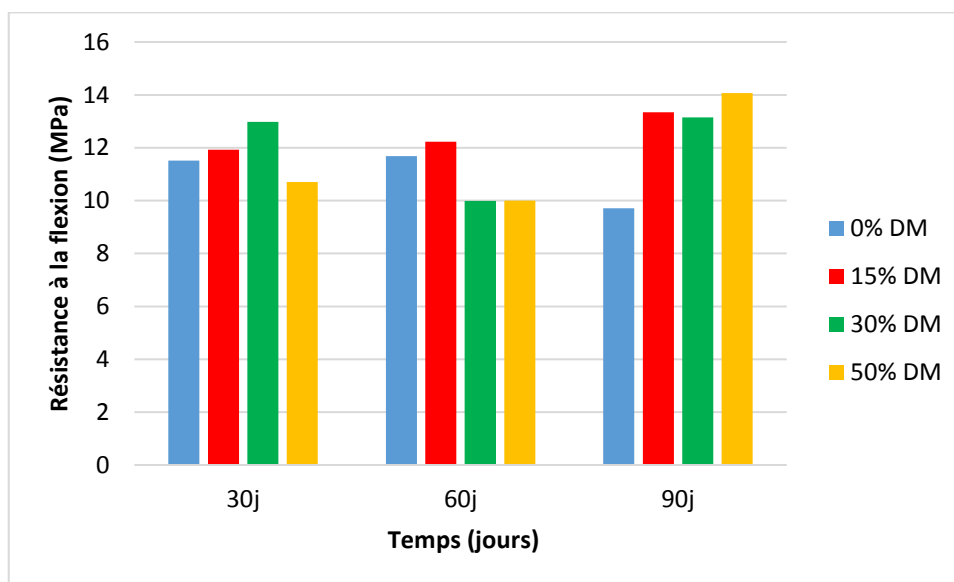
**Tableau 3.5 :** La résistance à la flexion à 30,60 et 90 jours.

Résistance à la flexion (MPa)				
/	MAP 0% DM	MAP 15% DM	MAP 30% DM	MAP 50% DM
30j	11.51	11.93	12.98	10.70
60j	11.68	12.22	9.99	10
90j	9.71	13.33	13.14	14.06

**Tableau 3.6 :** La résistance à la compression à 30,60 et 90jours.

Résistance à la compression (MPa)				
/	MAP 0% DM	MAP 15% DM	MAP 30% DM	MAP 50% DM
30j	58.8	64.35	62.85	64.9
60j	56.55	71.4	66.15	72.05
90j	59.55	53.8	63.05	68.25

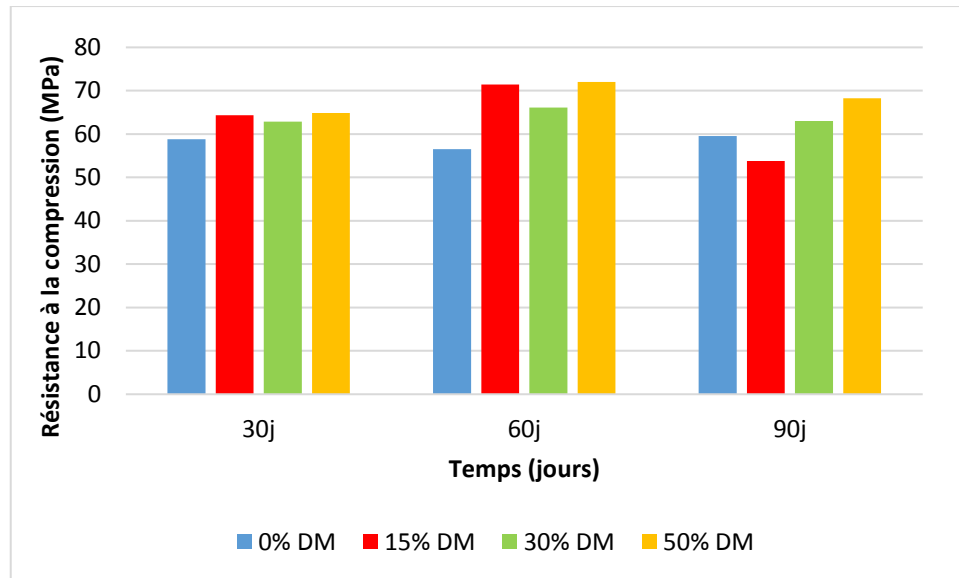
Les résultats sont illustrés dans les figures 3.15 et 3.16



**Figure 3.15:** Résistance à la flexion.

La Figure 3.15 montre les résultats de la résistance à la flexion des MAP sous l'immersion totale. En général, la résistance à la flexion est développée avec le temps pour tous les mélanges de MAP (Sauf 0% DM) (voir la Figure 3.15).



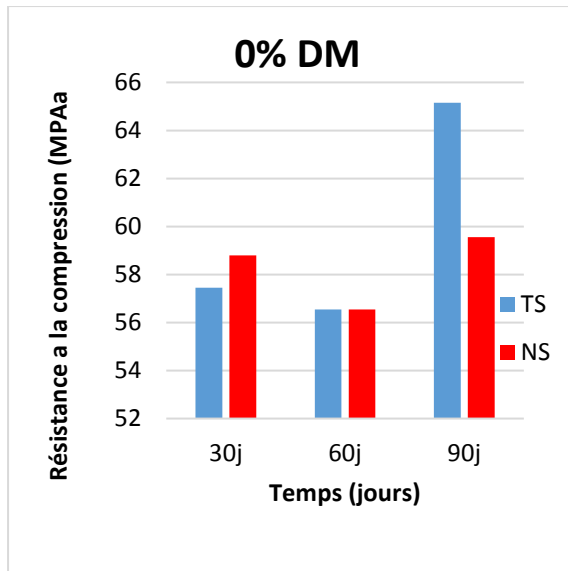


**Figure 3.16:** Résistance à la compression.

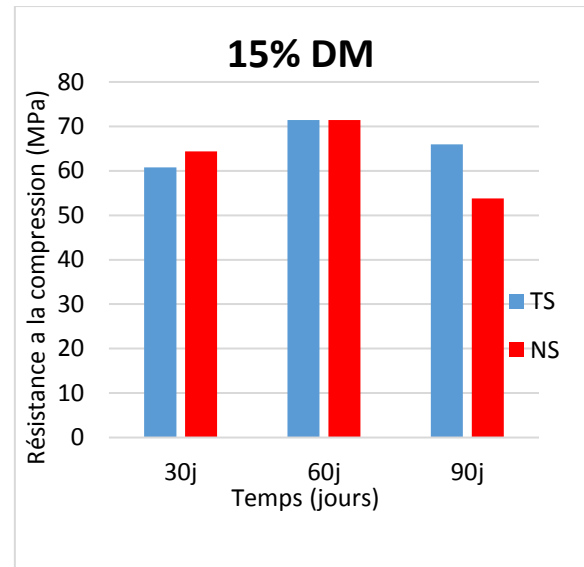
La Figure 3.16 montre les résultats de la résistance à la compression des MAP sous l'immersion totale. En général, la résistance la compression continue à diminuer durant l'exposition. Par exemple, la résistance à la compression pour le MAP de 15% de DM est réduite de 64.35 à 53.8 après 90 jours de l'immersion.

**Pour la compression :**

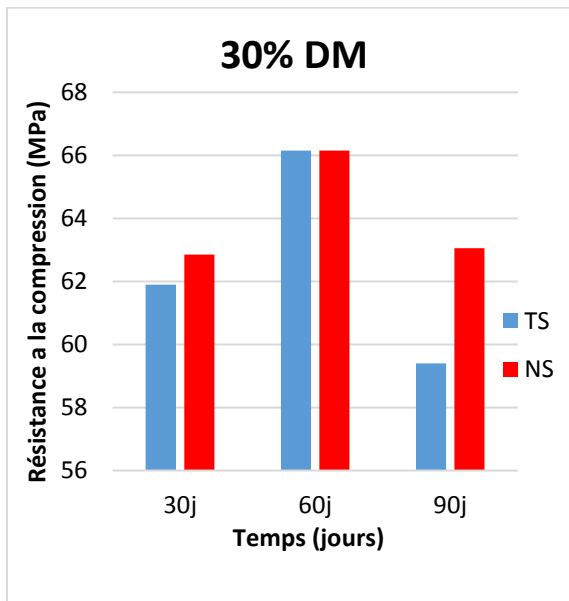
Comparaison des résultats pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates (TS) et les éprouvettes immergé dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NS) :



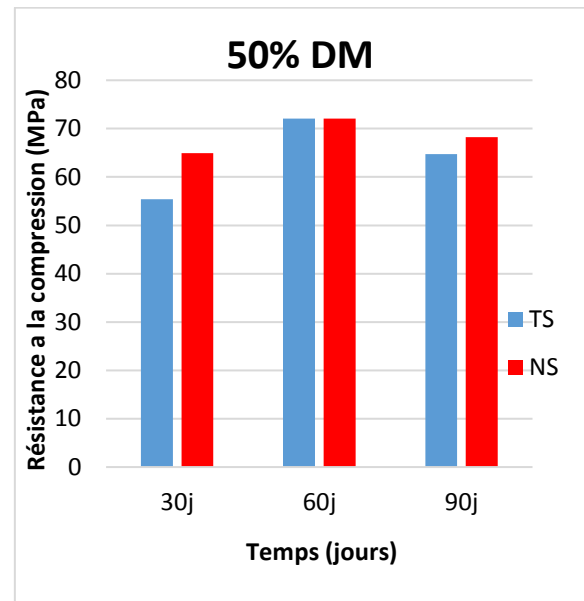
Taux de substitution de déchet de sable de marbre 0%



Taux de substitution de déchet de sable de marbre 15%



Taux de substitution de déchet de sable de marbre 30%



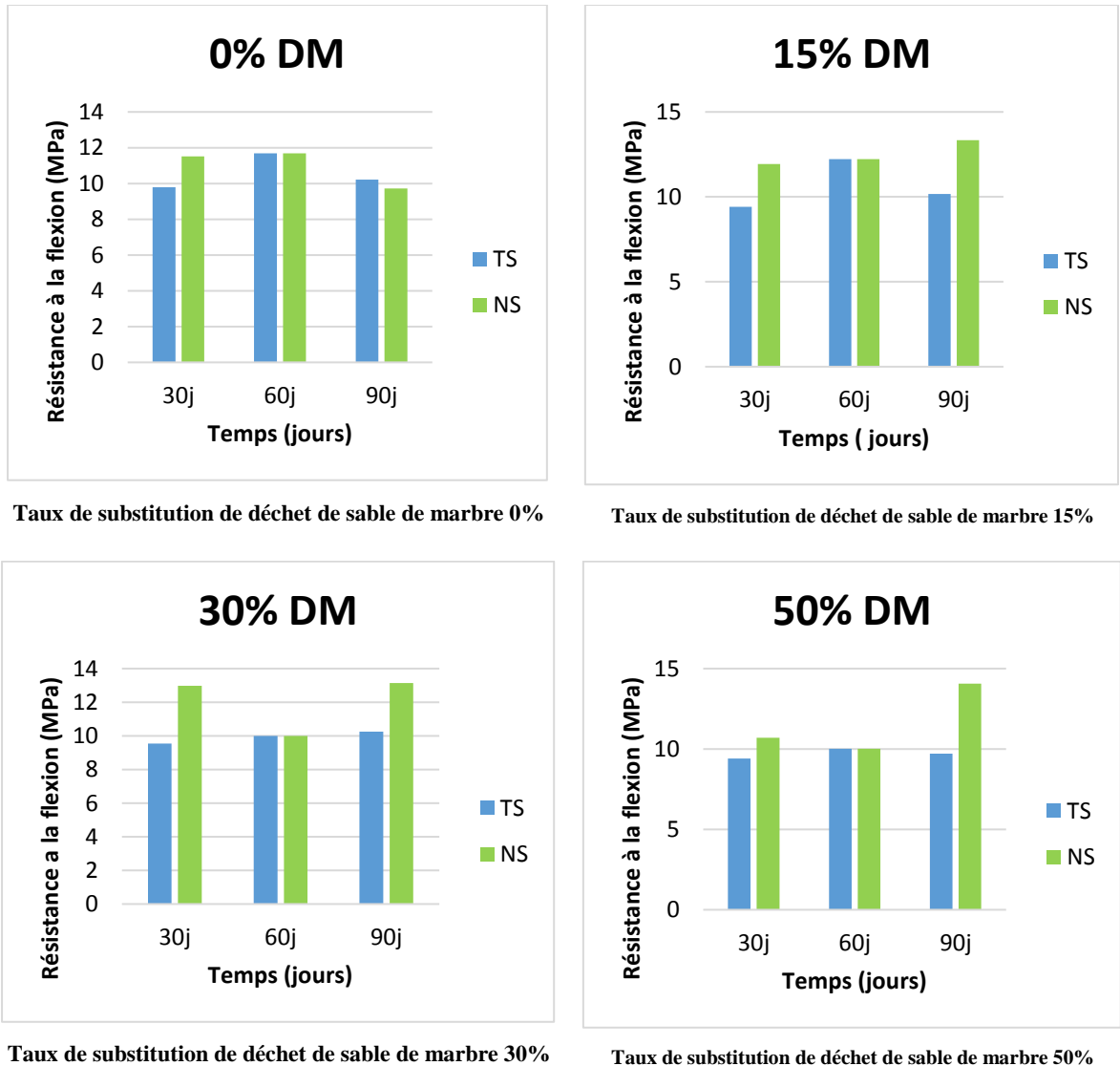
Taux de substitution de déchet de sable de marbre 50%

**Figure 3.17:** Comparaison des résultats pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates et les éprouvettes immergés dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

On remarque que plus le taux de substitution de déchet de marbre augmente plus la résistance à la compression augmente. A 0% DM la résistance des témoins sulfates était la plus élevée à 90 j. Pour les taux de substitution 15%DM 30%DM 50% DM la résistance à la compression est plus grande à 60 j.

### Pour la flexion:

Comparaison des résultats pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates (TS) et les éprouvettes immergés dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NS) :



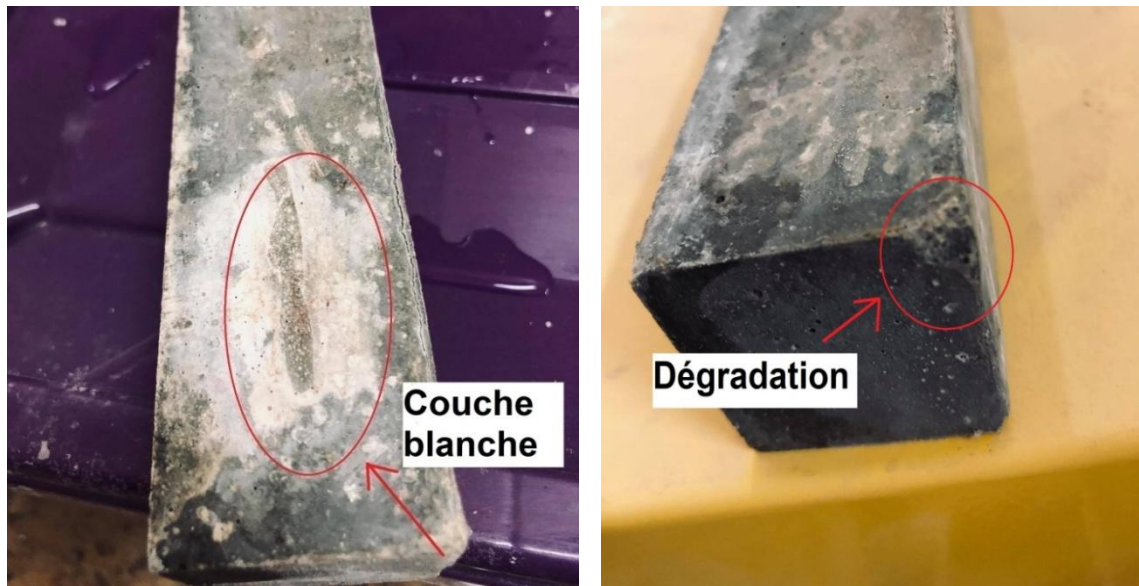
**Figure 3.18:** Comparaison des résultats pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates et les éprouvettes immergés dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### 3.8.2. Examen visuel :

Pour évaluer la dégradation de chaque éprouvette de MAP immergé, une comparaison a été faite visuellement (à partir des photos numériques) après 90 jours de conservation dans le milieu sulfatique.

Le Figure 3.19 présente l'état des éprouvettes de différent pourcentage de DM après immersion dans la solution 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Comme la Figure 3.19, après 90 jours d'exposition, tous les spécimens ont montré un léger écaillage sur la longueur de l'éprouvette. Toutefois, les spécimens produits une dégradation visuelle sur les bords (Voir Figure 3.19). En outre, une couche blanche est apparu sur la surface des échantillons.



**Figure 3.19** : Examen visuel sur les échantillons de MAP : après 90 jours d'immersion dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

### 3.8.3. L'absorption d'eau par capillarité après l'attaque sulfatique de mortier :

**Tableau 3.7 :** Valeurs moyennes d'absorption d'eau des mortiers à base de sable de marbre à 30jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

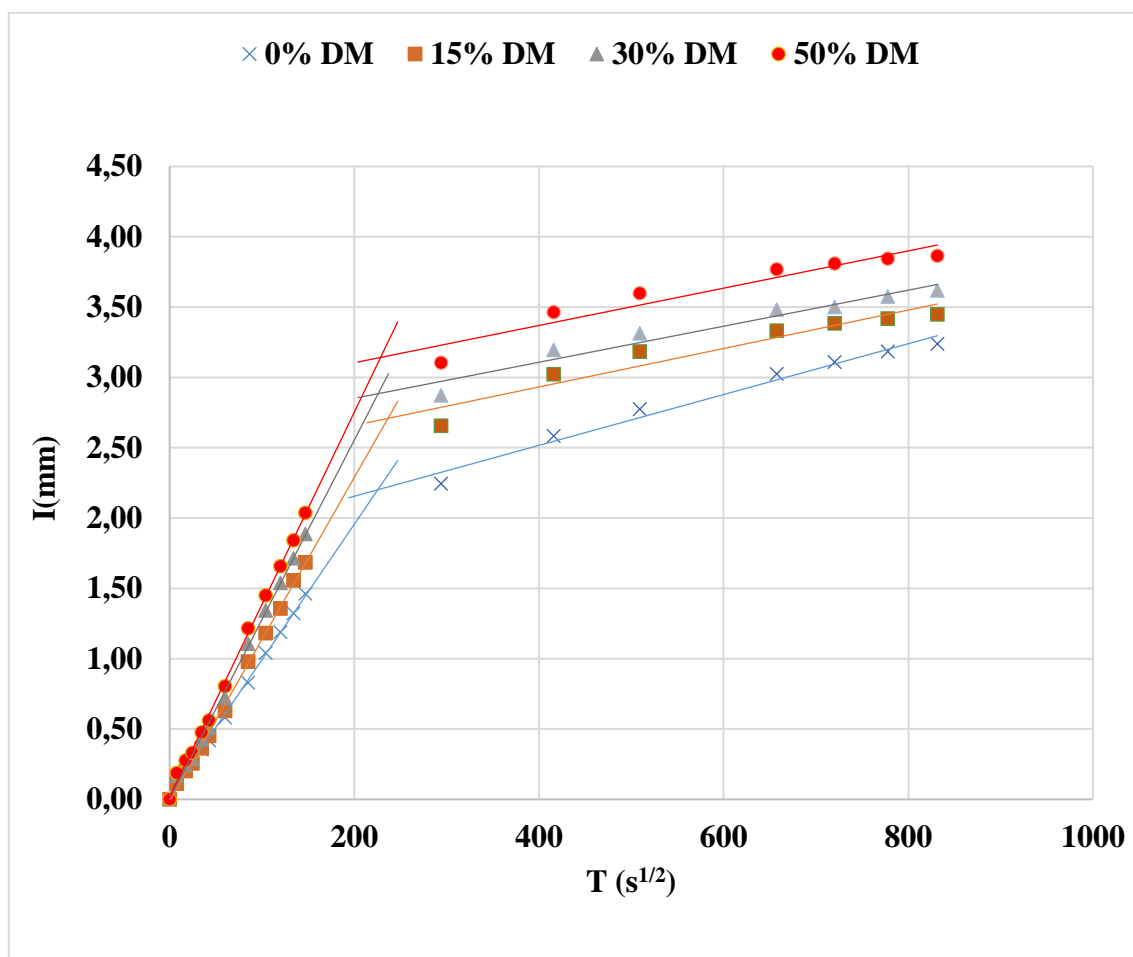
Teneur en déchet de sable de marbre recyclé (%)		0%		15%		30%		50%	
t	t (sec <sup>1/2</sup> )	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)
0 min	0	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1 min	8	0,23	0,15	0,18	0,11	0,27	0,17	0,30	0,19
5 min	17	0,36	0,23	0,32	0,20	0,39	0,24	0,44	0,28
10min	24	0,44	0,27	0,41	0,26	0,46	0,29	0,53	0,33
20min	35	0,56	0,35	0,58	0,36	0,68	0,43	0,76	0,47
30min	42	0,67	0,42	0,72	0,45	0,81	0,51	0,90	0,56
1h	60	0,93	0,58	1,01	0,63	1,15	0,72	1,29	0,80
2h	85	1,32	0,83	1,57	0,98	1,77	1,11	1,95	1,22
3h	104	1,66	1,04	1,89	1,18	2,15	1,34	2,32	1,45
4h	120	1,90	1,19	2,17	1,36	2,46	1,54	2,65	1,66
5h	134	2,11	1,32	2,49	1,56	2,74	1,71	2,95	1,84
6h	147	2,34	1,46	2,70	1,68	3,02	1,89	3,26	2,04
1j	294	3,59	2,24	4,25	2,66	4,60	2,87	4,97	3,10
2j	416	4,13	2,58	4,84	3,02	5,11	3,19	5,54	3,46
3j	509	4,44	2,77	5,10	3,18	5,30	3,31	5,76	3,60
5j	657	4,84	3,02	5,33	3,33	5,57	3,48	6,03	3,77
6j	720	4,97	3,11	5,42	3,38	5,60	3,50	6,10	3,81
7j	778	5,09	3,18	5,47	3,42	5,72	3,57	6,15	3,84
8j	831	5,18	3,24	5,51	3,45	5,79	3,62	6,18	3,86

L'influence de DM après l'attaque sulfatique sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée dans le tableau 3.7 et la figure 3.20. Les valeurs de cette figure montrent une augmentation de l'absorption avec le temps, et ce pour tous les mélanges. Nous remarquons que, à 30 jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, le mortier de 0% DM est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit, alors que le coefficient d'absorption des autres mortiers

est plus grand, et augmente au fur et à mesure que la teneur en DM augmente. A 60 jours et 90 jours d'immersion, les mortiers à 0% de marbre présente une plus grande absorption.

Kore et al 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 [83].

Boukhelkhal et al ont aussi trouvé que l'absorption d'eau par capillarité dans le béton augmentait avec l'augmentation de substitution de DM. [85]



**Figure 3.20** : résultats de l'absorption capillaire par unité de surface des MAP à 30 jours d'immersion dans la solution de  $Na_2SO_4$ .

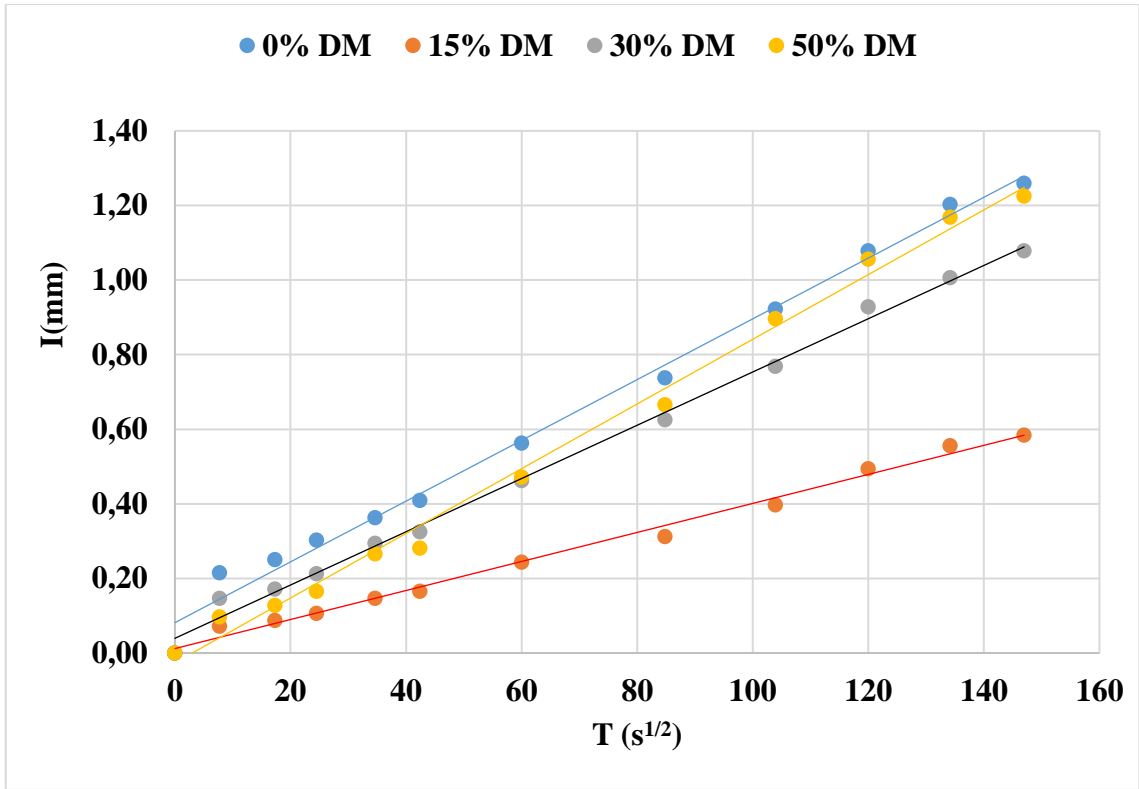


Figure 3.21 : résultats de l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des MAP à 30 jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

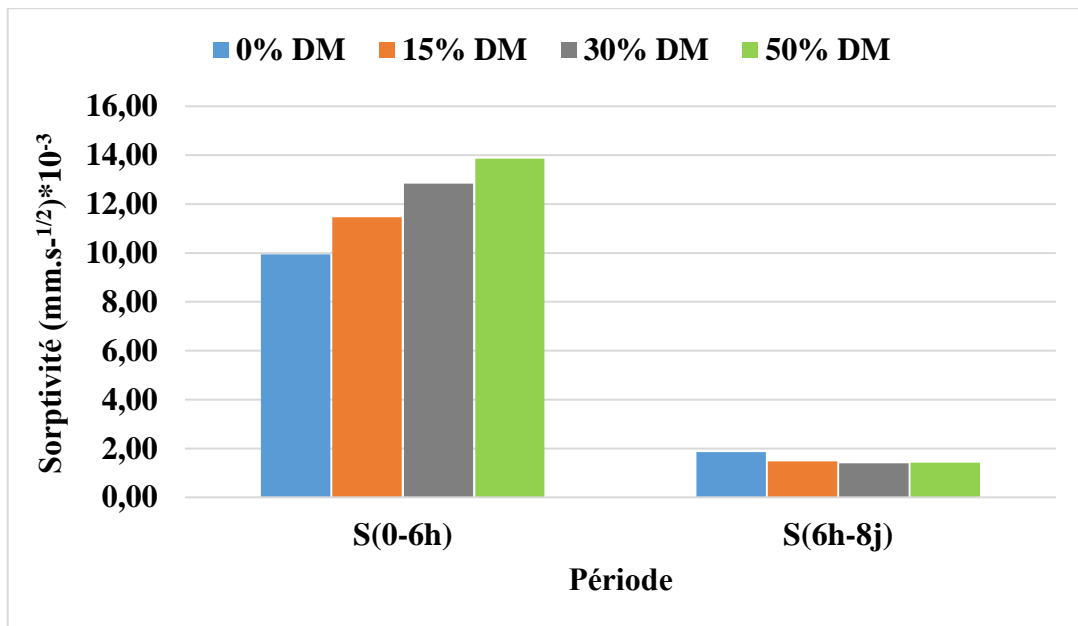


Figure 3.22: Sorptivité à 30 jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

**Tableau 3.8** : Valeurs moyennes d'absorption d'eau des mortiers à base de sable de marbre à 60jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Teneur en déchet de sable de marbre recyclé (%)		0%		15%		30%		50%	
t	t (sec <sup>1/2</sup> )	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)
0min	0	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1min	8	0,34	0,22	0,12	0,07	0,24	0,15	0,16	0,10
5min	17	0,40	0,25	0,14	0,09	0,27	0,17	0,21	0,13
10min	24	0,49	0,30	0,17	0,11	0,34	0,21	0,27	0,17
20min	35	0,58	0,36	0,24	0,15	0,47	0,29	0,43	0,27
30min	42	0,66	0,41	0,26	0,17	0,52	0,32	0,45	0,28
1h	60	0,90	0,56	0,39	0,24	0,74	0,46	0,76	0,47
2h	85	1,18	0,74	0,50	0,31	1,00	0,63	1,07	0,67
3h	104	1,47	0,92	0,63	0,40	1,23	0,77	1,44	0,90
4h	120	1,72	1,08	0,79	0,49	1,49	0,93	1,69	1,06
5h	134	1,93	1,20	0,89	0,56	1,61	1,01	1,87	1,17
6h	147	2,01	1,26	0,93	0,58	1,72	1,08	1,96	1,23
1j	294	3,44	2,15	1,69	1,06	2,84	1,78	3,07	1,92
2j	416	4,40	2,75	2,13	1,33	3,51	2,19	3,59	2,24
3j	509	4,94	3,09	2,39	1,50	3,90	2,44	3,86	2,41
5j	657	5,77	3,60	2,76	1,72	4,45	2,78	4,19	2,62
6j	720	6,03	3,77	2,85	1,78	4,62	2,89	4,30	2,68
7j	778	6,21	3,88	2,96	1,85	4,76	2,97	4,35	2,72
8j	831	6,41	4,00	3,03	1,90	4,88	3,05	4,24	2,65



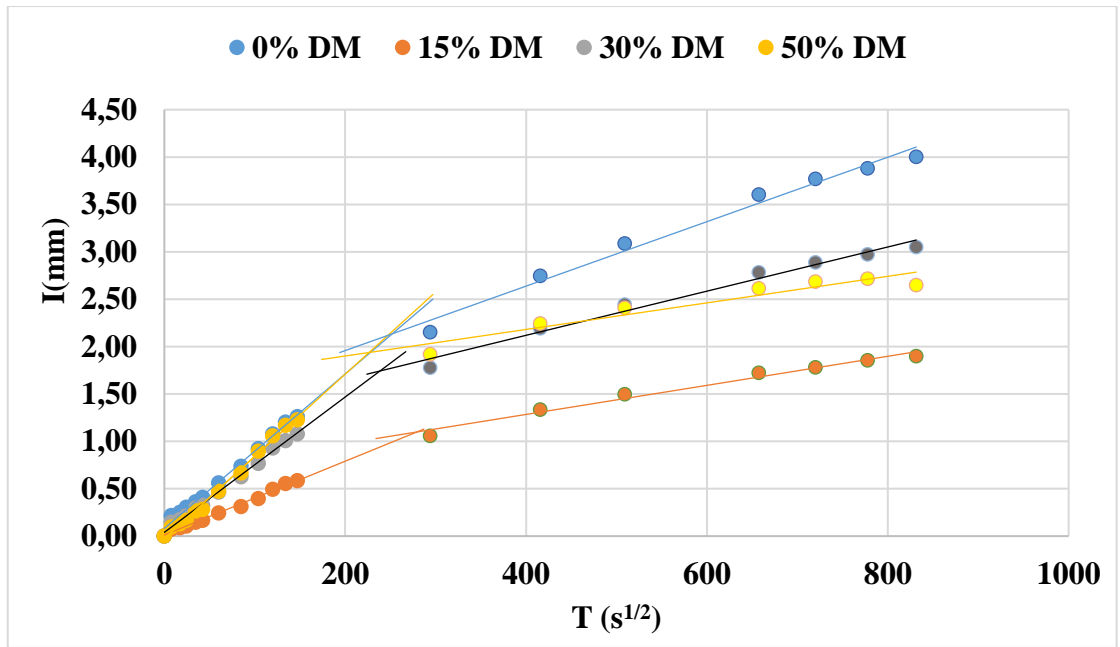


Figure 3.23 : résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des MAP a 60jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

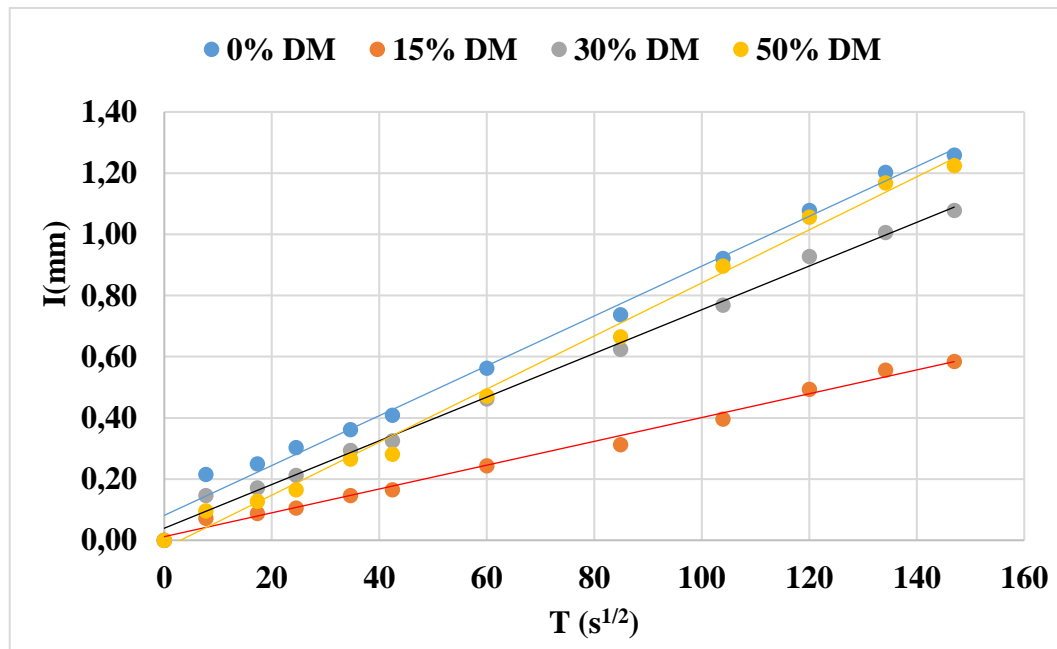
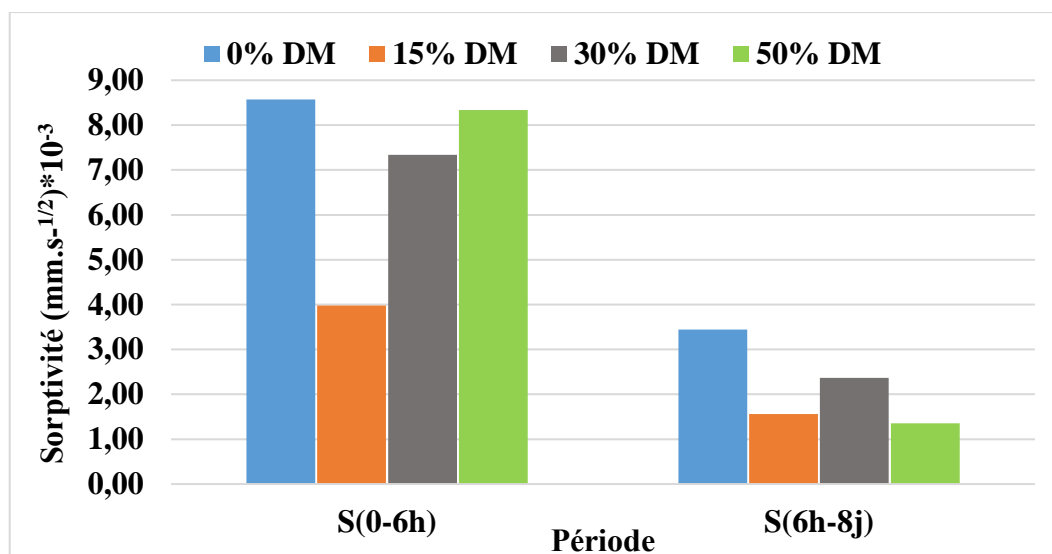


Figure 3.24 : résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des MAP à 60jours d'immersion dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



**Figure 3.25:** Sorptivité à 60 jours d'immersion dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

**Tableau 3.9 :** Valeurs moyennes d'absorption d'eau des mortiers à base de sable de marbre à 90 jours d'immersion dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Teneur en déchet de sable de marbre recyclé (%)		0%		15%		30%		50%	
t	t (sec <sup>1/2</sup> )	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)	m(g)	I (mm)
0min	0	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1min	8	0,24	0,15	0,13	0,08	0,11	0,07	0,07	0,04
5min	17	0,25	0,16	0,14	0,09	0,14	0,09	0,08	0,05
10min	24	0,33	0,20	0,15	0,09	0,19	0,12	0,11	0,07
20min	35	0,38	0,23	0,17	0,11	0,21	0,13	0,11	0,07
30min	42	0,45	0,28	0,18	0,11	0,23	0,14	0,15	0,09
1h	60	0,53	0,33	0,23	0,14	0,28	0,18	0,18	0,11
2h	85	0,78	0,49	0,31	0,19	0,43	0,27	0,26	0,16
3h	104	0,94	0,58	0,36	0,23	0,51	0,32	0,31	0,19
4h	120	1,10	0,68	0,43	0,27	0,57	0,36	0,35	0,22
5h	134	1,22	0,76	0,48	0,30	0,65	0,40	0,39	0,25
6h	147	1,35	0,84	0,52	0,33	0,69	0,43	0,43	0,27
1j	294	2,60	1,63	1,00	0,63	1,26	0,79	0,77	0,48
2j	416	3,41	2,13	1,73	1,08	1,95	1,22	1,12	0,70
3j	509	4,20	2,63	1,90	1,19	2,20	1,38	1,45	0,91
5j	657	4,57	2,85	2,08	1,30	2,38	1,48	1,61	1,01
6j	720	4,84	3,03	2,24	1,40	2,51	1,57	1,74	1,09
7j	778	4,95	3,09	2,25	1,41	2,51	1,57	1,74	1,09
8j	831	5,38	3,37	2,49	1,56	2,73	1,71	1,94	1,22

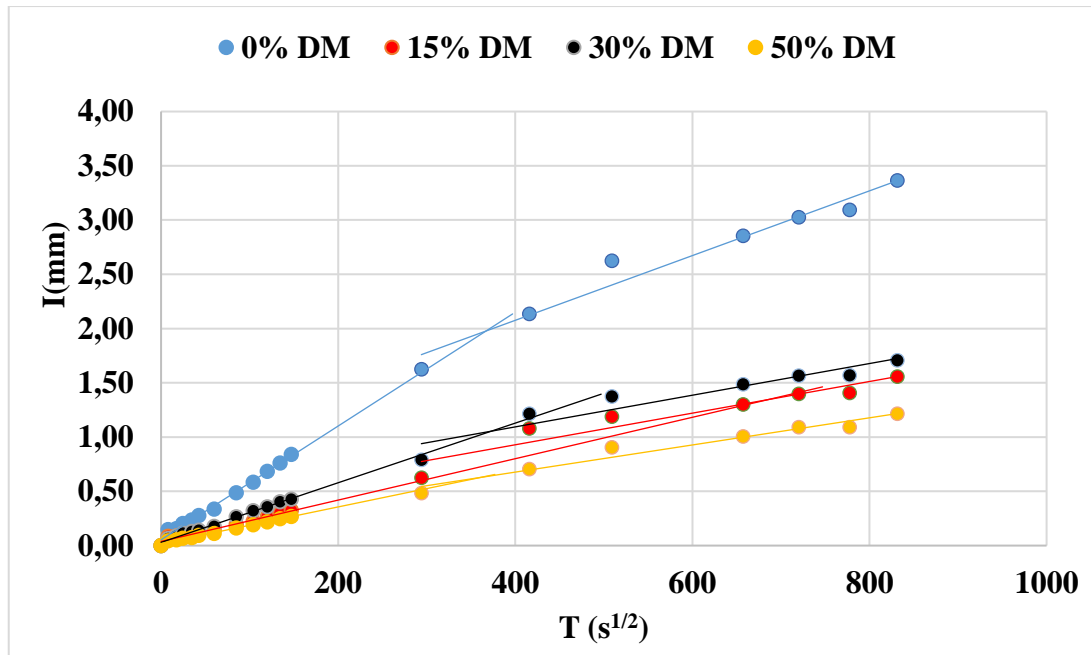


Figure 3.26 : résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des MAP a 90jours d'immersion dans la solution de  $Na_2SO_4$ .

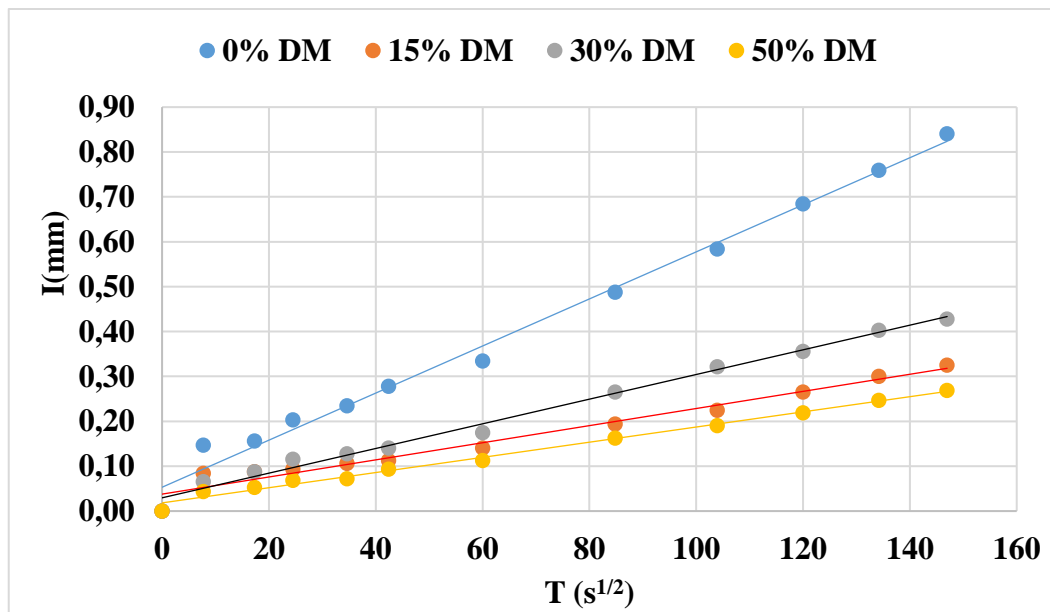
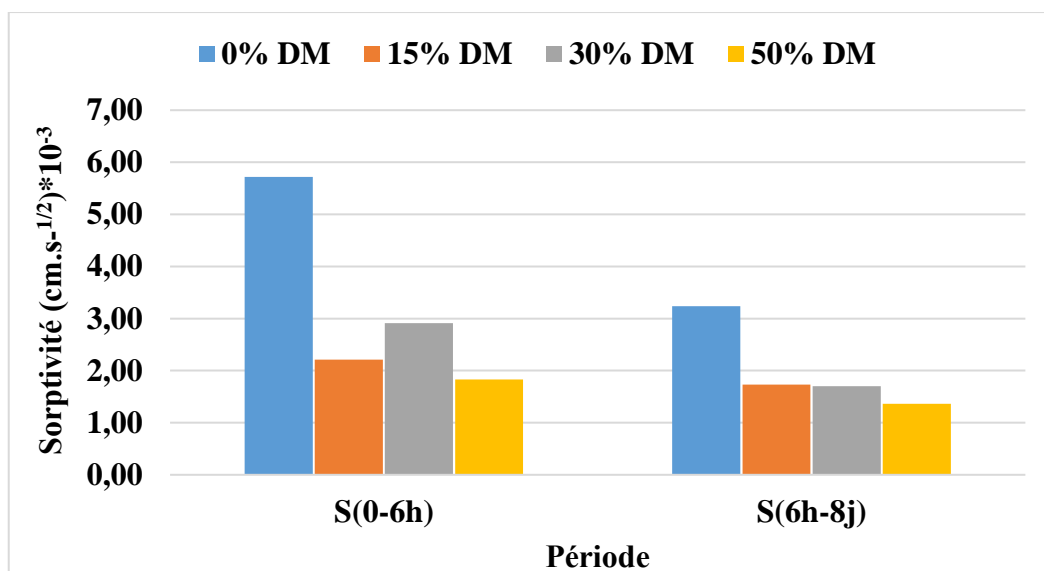


Figure 3.27 : résultat de l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des MAP à 90jours d'immersion dans la solution de  $Na_2SO_4$ .



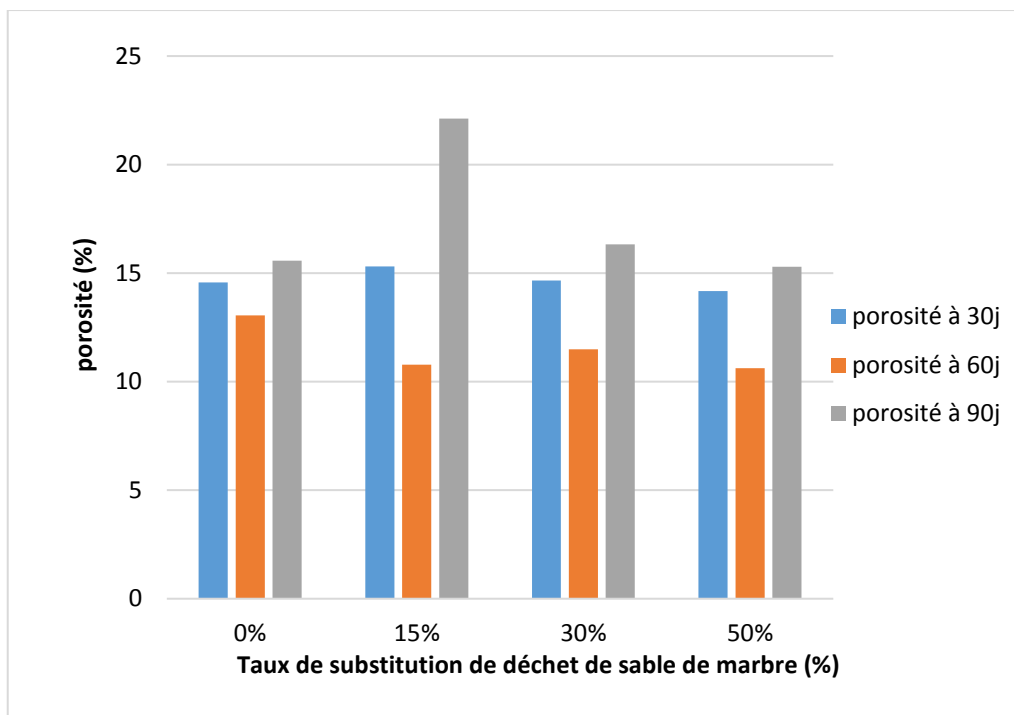
**Figure 3.28** : Sorptivité à 90 jours d’immersion dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

#### 3.8.4. La porosité après l’attaque sulfatique de mortier :

Le résultat de la porosité sur les différents mortiers à base de déchet de sable de marbre recyclé après 30j,60j et 90j de cure humide sont présentés dans la figure 3.29.

**Tableau 3.10** : pourcentage de la Porosité en fonction de taux de substitution de déchets de sable de marbre a 30j, 60j et 90j.

Déchet de sable de marbre (%)	0%	15%	30%	50%
La porosité à 30j (%)	14,57	15,30	14,65	14,17
La porosité à 60j (%)	13,05	10,78	11,49	10,62
La porosité à 90j (%)	15,57	22,12	16,32	15,29

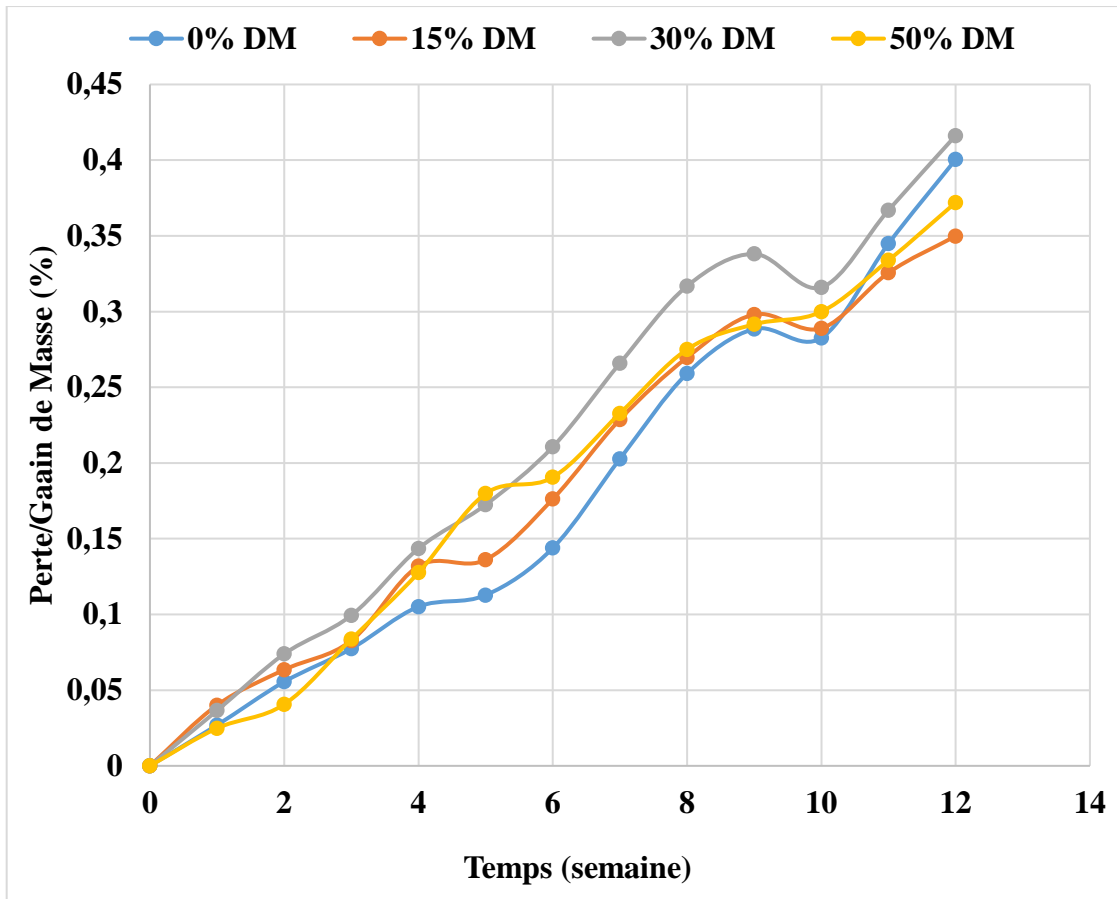


**Figure 3.29** : Evolution de la porosité des MAP a 30j, 60j et 90j.

### 3.8.5. La variation de la masse dans la solution de sulfate pour l'immersion totale :

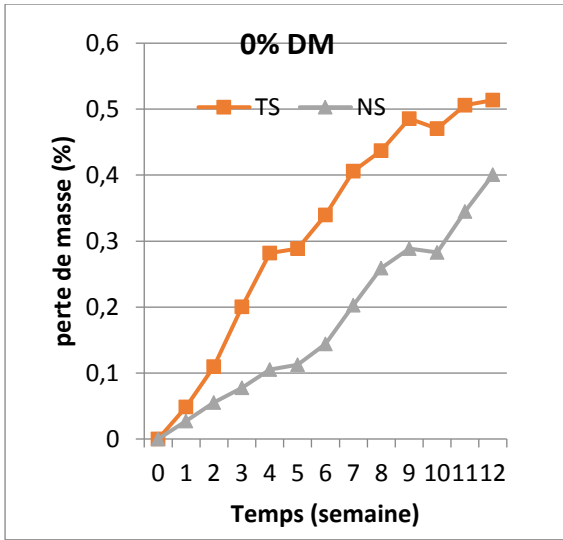
Les changements de la masse sont variés avec la durée de l'immersion. Toutefois, cette variation de poids n'a pas montré des tendances significatives. Le gain de masse peut provenir de formation des sous-produits (ettringite) par la réaction chimique entre la matrice de ciment (c.à.d. l'hydroxyde de calcium) et des ions de sulfate. À cet effet, les sous-produits ont rempli les vides dans le MAP. Ces symptômes concordent parfaitement avec un cas de réaction de gonflement interne [86].

Les résultats sont illustrés dans la figure 3.30

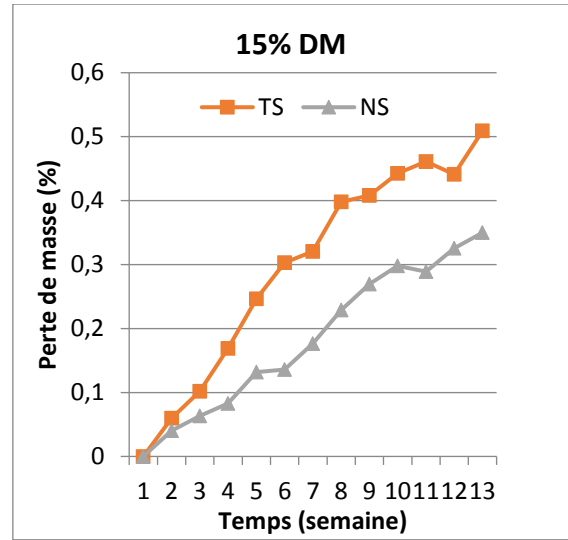


**Figure 3.30 :** La perte de masse du MAP par immersion en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en fonction de temps.

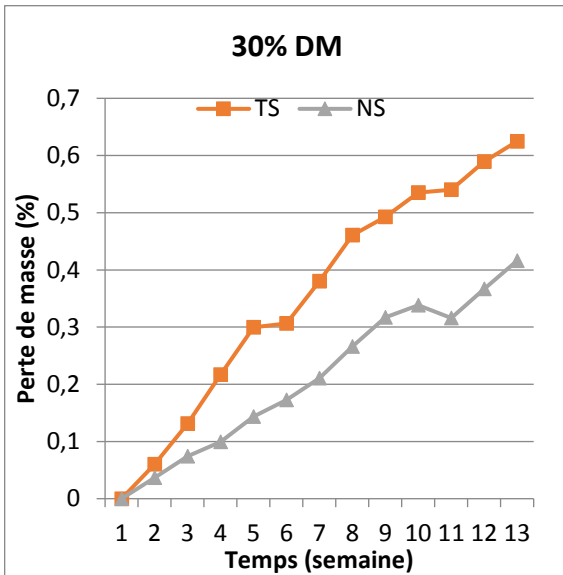
En comparant les éprouvettes immergées dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NS) avec les éprouvettes témoins (TS), nous remarquons que quel que soit le taux de substitution du marbre, les éprouvettes immergées dans l'eau absorbaient plus d'eau que les éprouvettes immergées dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



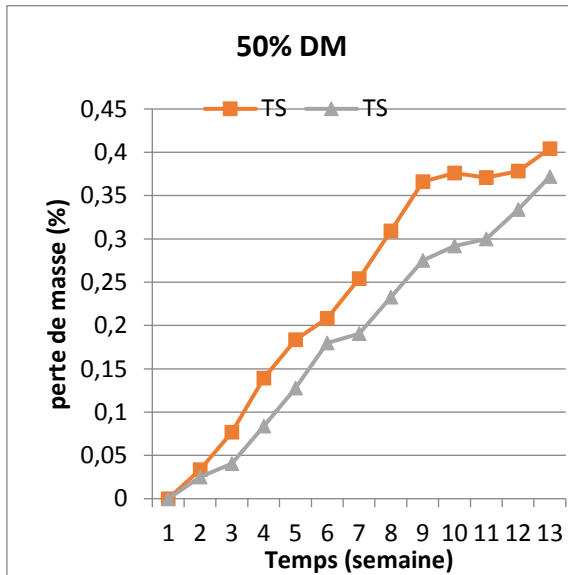
Taux de substitution de déchet de sable de marbre 0%



Taux de substitution de déchet de sable de marbre 15%



Taux de substitution de déchet de sable de marbre 30%



Taux de substitution de déchet de sable de marbre 50%

**Figure 3.31:** Comparaison des résultats de perte de masse pour chaque pourcentage de l'éprouvettes témoin sulfates et les éprouvettes immergés dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### 3.9. Conclusion

Les résultats de cette étude expérimentale montrent que l'utilisation du sable de marbre dans les MAP est très avantageux aussi bien à l'état frais et à l'état durci.

L'ajout de fibres de verre sur MAP augmente l'étalement et diminue temps d'écoulement.

Les essais de mini cône et le V-funnel effectués sur le mortier dont l'objectif visé est la détermination du dosage optimum en superplastifiant nous ont permis de constater qu'il était important d'optimiser le dosage du SP.

L'ouvrabilité du MAP (étalement, capacité de passage et de remplissage) augmente considérablement lorsque le taux de substitution du sable naturel par le sable de déchet de marbre augmente.

À l'état durci, le remplacement du sable par le sable de marbre mène à une augmentation des résistances à la compression et à la flexion.

Le sable de déchet de marbre améliore la résistance à la compression et à la flexion du mortier.

Le taux de substitution optimal de sable naturel par les déchets de marbre a été constaté à 15%, ou nous avons obtenu la meilleure porosité et 50%, ou nous avons obtenu la meilleure résistance à la compression et la flexion.



## CONCLUSION GENERALE

Au début de ce mémoire, nous nous sommes fixés deux objectifs : le premier est de trouver le substitut de granulats naturels par la valorisation des déchets de marbre et déchets de fibres de verres dans le mortier autoplaçant. Le deuxième est d'étudier sur l'effet de substitution du sable naturel par le sable de déchet de marbre l'ajout de fibres de verre sur le comportement du mortier autoplaçants à l'état frais et à l'état durci ce qui suit :

- L'essai du mini-cône et de l'entonnoir en V sur le mortier a pour but de déterminer la quantité optimale de superplastifiant, afin que nous puissions voir l'importance d'optimiser la quantité de SP.
- L'incorporation de déchets de marbre comme substitut augmenté l'ouvrabilité du mortier autoplaçant.
- Le sable de déchet de marbre améliore la résistance à la compression et à la flexion du mortier.
- L'absorption par capillarité augmente avec l'augmentation du taux de substitution dans les premiers temps (l'absorption d'eau par capillarité dans par les grands pores), ensuite la tendance s'inverse (l'absorption d'eau par capillarité dans les petits pores).
- La porosité ouverte à 30 et 60 jours a été nettement réduite par rapport au mortier témoin, mais elle est développée entre 60 et 90 jours, la meilleure porosité a été obtenue avec une substitution de 30% de déchet de marbre.
- Le taux de substitution optimal de sable naturel par les déchets de marbre a été constaté à 15%, ou nous avons obtenu la meilleure porosité et 50%, ou nous avons obtenu la meilleure résistance à la compression et la flexion.

## REFERENCES

- [1] P. K. Mehta, “Reducing the environmental impact of concrete,” *Concr. Int*, 2001.
- [2] S G. Technique and D. E. S. M. Régionaux, M. Morency, E. Perreault, “Lignes directrices relatives à la gestion de béton de brique et d’asphalte Issus des travaux de construction et de démolition des résidus du secteur de la pierre de taille,” Ministère du développement durable, de l’environnement et des parcs (MDDEP), Québec, Juin 2009.
- [3] Loi n° 92-646 relative à l’élimination des déchets ainsi qu’aux installations classées pour la protection de l’environnement.” France, 13 juillet 1992.
- [4] C. Cimpelli, “Guide technique pour l’utilisation des matériaux régionaux d’Ile de France Catalogue Des Structures : les bétons et produits de démolitions recyclés” Laboratoire régional de l’Ouest Parisien, France, 2003.
- [5] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, and X. Huang, “An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011),” *Constr. Build. Mater*, Jun. 2012.
- [6] F. Ceia, J. Raposo, M. Guerra, E. Júlio, and J. De Brito, “Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces,” *Constr. Build. Mater*, 2016.
- [7] V. Letelier, E. Tarela, P. Muñoz, and G. Moriconi, “Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete,” *Constr. Build. Mater*, 2017.
- [8] H. Mefteh, O. Kebaïli, H. Oucief, L. Berredjem, and N. Arabi, “Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete,” *J. Clean. Prod. Sep*. 2013.
- [9] R. Algérienne and D. Et, “Faculté des Sciences de l’Ingénieur Mémoire de Magister Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d’ajouts de déchets de briques réfractaires,” 2014.
- [10] Etude de l’influence de la qualité du sable sur les propriétés physico-mécaniques d’un béton courant, master en ingénierie de l’eau et de l’environnement, 2016.

- [11] Kasdi, Influence du dosage du ciment dans le béton d'usage courants sur ces propriétés à l'état durci, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [12] R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN « Granulat, sols, ciment et béton » Edition CASTEILLA-PARIS-2004.
- [13] ASTM C 494, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", American Society for Testing and Materials, USA, 1992.
- [14] Nowak, A.S., Laumet, P., Czarnecki, A.A., Kaszynska, M., Szerszen, M.M., and Podhoreck, P.J, "US Specific Self Compacting Concrete for Bridges", Final Report for Highway IDEA Project 89, University of Michigan, USA, 2005.
- [15] B. Abdi, "La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures," mémoire maitrisées Sci. Appliquées, université de Sherbrook, Quebec, Canad, 2005.
- [16] Okamura H. and Ouchi. M., "Self compacting concrete, development, present use and future", In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete; RILEM, 1999.
- [17] Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M., "Self compacting concrete." Structural Concrete, March2000.
- [18] Okamura H. and Ouchi M., "Self Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, April 2003.
- [19] Khayat, 2004: Khayat, K.H., Assaad, J., Daczko J., (2004). "Comparison of Field oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self Consolidated Concrete", ACI Materials Journal, March –April 2004.
- [20] Abdel Hamid R'MILI: Étude de formulation et de comportement des Bétons Auto-Plaçants: Incorporation du sable de concassage et du sable du désert, 13 janvier 2010.
- [21] Lachani, effet des ajouts minéraux sur la rhéologie des mortiers autoplaçants, mémoire master, UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB, 2017.
- [22] B. P., "Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water reducing admixtures," Constr. Build. Mater. 2011.

- [23] EFNARC, “Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete”, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002.
- [24] Sonebi, M., and Bartos P.J.M, “Hardened SCC and its bond with reinforcement”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999.
- [25] Felekoglu, B., Turkel, S., and Baradan, B, “Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete”, Building Environment 2007.
- [26] Dehwah, H.A.F, “Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash”, Construction and Building Materials, 2012.
- [27] Siddique, R, “Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash”, Materials and Design,2011.
- [28] Han, S.H., Kim, and J.K, “Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete”, Cement and Concrete Research,2004.
- [29] Uysal, M., Yilmaz, K., and Ipek, M, “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, 2011.
- [30] Roziere, E., Granger, S., Turcry, P., and Loukili, A. “Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Composites,2007.
- [31] Gram, H.E., and Pentti, P, “Properties of SCC - especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, September, 1999.
- [32] Persson, B, “A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete”, Cement and Concrete Research,2001.
- [33] Leemann, A., Lura, P., and Loser, R, “Shrinkage and creep of SCC – the influence of paste volume and binder composition”, Construction Building Materials, 2011.

- [34] Dehn, F., Holschemacher, K., and Weibe, D, “Self-compacting concrete time development of the material properties and the bond behavior”, The Leipzig Annual Civil Engineering, Germany,2000.
- [35] Uysal, M., and Yilmaz, K, “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Composites,2011.
- [36] Felekoglu, B., Turkel, S., and Baradan, B, “Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete”, Building Environment,2007.
- [37] I. Yurtdas, “Couplage Comportement Mecanique Et Dessiccation Des Matériaux a Matrice Cimentaire : Etude Experimentale Sur Mortiers,” thèse de doctorat, université des Sciences et de technologie de Lille, Laboratoire mécanique de Lille et l'école centrale de Lille,2003, [Online]. Available: ismail\_yurtdas@yahoo.com.
- [38] Hanzic, L., and Ilic, R, “Relationship liquid sorptivity and capillarity in concrete”, Cement Concrete Research,2003.
- [39] Topcu, I.B., Bilir, T., Uygunoglu, T, “Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete”, Construction Building Materials,2009.
- [40] Turkmen, I., and Kantarci, A, “Effect of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete”, Building and Environment,2007.
- [41] De Schutter, G., Audenaert, K., Boel, V., Vandewalle, L., Dupont, D., Heirman, G., Vantomme, J., and D'hemricourt, J, “Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: Overview of a Belgian research project”, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, August 17-20, 2003.
- [42] Uysal, M., Yilmaz, K., and Ipek, M, “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, 2011.
- [43] M. Al-Akhras, N, “Durability of metakaolin concrete to sulfate attack”, Cement and Concrete Research 2006.

- [44] Brown, P.W, “Evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment”, Cement and Concrete Research, 1982.
- [45] Wee, T.H., Suryavanshi, A.K., Wong, S.F., and Anisur Rahman, A.K.M, “Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures”, ACI Materials Journal 2000.
- [46] Hooton, R.D, “Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkalisilica reactivity”, ACI Materials Journal, 1993.
- [47] Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M, “Concrete: Microstructure, Properties, and Materials”, Third edition, USA, 2006.
- [48] R. Khelifa, X.Brunetaud, H. Chabil, and M. Al-Mukhtar., “The behaviour of self compacting concrete subjected to an external sulphate attack,” in Damage and Fracture Mechanics ,T. Boukharouba, M. Elboujdaini, G. Pluvinage (eds.), Springer, 2009.
- [49] S. Multon, M. Cyr, A. Sellier, N. Leklou, and L. Petit, “Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion,” Cem. Concr. Res, Mar. 2008.
- [50] M. R. Khelifa, “Effet de l’attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants,” Faculté des sciences de l’Ingénieur, Département de Génie Civil, Ecole Doctorale Sciences et Technologies Centre de Recherche sur la Matière Divisée, 2009.
- [51] N.Leklou, “Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne,” Thèse de Doctorat de l’université de Paul-Sébastien de Toulouse ,faculté de génie civil, 2008.
- [52] Z. Zhao, S. Wang, L. Lu, and C. Gong, “Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar,” Constr. Build. Mater. Jun. 2013.
- [53] M. G. Beltrán, A. Barbudo, F. Agrela, A. P. Galvín, and J. R. Jiménez, “Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths,” J. Clean. Prod., 2014.
- [54] C. S. Poon and K. Shicong, “Compressive Strength, Pore Size Distribution and Chloride-ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Class-F Fly Ash 1 Introduction 2 Experimental,” J. Wuhan Univ. Technol., 2006.

- [55] EN 12370. "Natural stone test methods – determination of resistance to salt crystallization". Comié Européan de Normalisation (CEN).,1999
- [56] S. Kou, C. Poon, and F. Agrela, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cem. Concr. Compos.* Sep. 2011.
- [57] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, Aug. 2009.
- [58] A. Shayan and A. Xu, "Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate," *ACI Mater. J.*, 2004.
- [59] F. Buyle-Bodin and R. Hadjieva-Zaharieva, "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete," *Mater. Struct.*,2002.
- [60] D. Sani, G. Moriconi, G. Fava, and V. Corinaldesi, "Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates," *Waste Manag.*, 2005.
- [61] V. Corinaldesi, "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates," *Constr. Build. Mater.*, Sep. 2010.
- [62] Ooreka, "Oorekamaison," site web, Comprendre le recyclage. <https://recyclage.ooreka.fr/comprendre/definition-recyclage>.
- [63] S. Sabrina, "Comportement des bétons à base de granulats recyclés," mémoire de magister, université de Mentouri Cantantine, 2006.
- [64] H. Chelabi and Z. Taleb, "Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre." mémoire de master, université d'Aklo Mohand Oulhadj, Bouira, 2017.
- [65] <https://www.meubliz.com/definition/marbre/>
- [66]<https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/architecturale/architecturale-exploitation-historique-marbre.jsp>
- [67] <http://www.groupes.polymtl.ca/glq1100/roches/marbre/marbre.html>

- [68] Dahmani, Influence du dosage du ciment dans le béton d'usage courants sur ces propriétés à l'état durci, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [69] 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 Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Waste Management through Design, August, 2019.
- [70] H. Houria, K. Leila, A. Assia, and B. Mouloud, "Introduction of Marble Waste Sand in the Composition of Mortar," in Use of Sandy Materials in Civil Engineering, IntechOpen, 2020.
- [71] K. E. Alyamaç and A. B. Aydın, "Concrete properties containing fine aggregate marble powder," KSCE J. Civ. Eng., 2015.
- [72] H. Binici, H. Kaplan, and S. Yilmaz, "Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete," Sci. Res. Essays, 2007.
- [73] B. Demirel, "The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete," Int. J. Phys. Sci., 2010.
- [74] 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., 2012.
- [75] ACI COMMITTEE 544, "State of the art report on fibre-reinforced concrete," Am.ConcIns.Proc, 2002.
- [76] AFNOR, NF EN 196-1, " Méthode d'essais des ciments. Partie 1 Détermination des résistances mécaniques", 2006
- [77] C1585-11 « Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes »
- [78] NFP18-495 « Béton-essai pour béton durci-essai de porosité et de masse volumique » Mars 2010.



- [79] M. Ghrici, S. Kenai, M. Said-mansour, and E. Kadri, "Some Engineering Properties of Concrete Containing Natural Pozzolana and Silica Fume" J. Asian Archit. Build. Eng. November, 2006.
- [80] Monica et al, Green Concrete: Using Industrial Waste of Marble Powder, Quarry Dust and Paper Pulp, 2013.
- [81] Binici et Al, Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates, 2008.
- [82] Dahmani, Influence du dosage du ciment dans le béton d'usage courants sur ces propriétés à l'état durci, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [83] Kore et al, Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete, 2016.
- [84] Chaid et al ; EFFET DE L'AJOUT CALCAIRE SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS, 2010.
- [85] Boukhelkhal et al, Influence de déchets de marbre sur la durabilité des bétons autoplaçants, 2013.
- [86] X. Brunetaud, "Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton," École centrale Paris., 2005.